DOI 10.15302/J-SSCAE-2024.04.002

多种能源融合发展战略研究

王国荣[1,2*]，周莉[1]，周守为[3]，刘清友[4]，张政[5]，钟林[1]，付强[6]，李清平[6]

（1. 西南石油大学机电工程学院，成都 610500；2. 油气藏地质及开发工程全国重点实验室，成都 610059；3. 中国海洋石油集团有限公司，北京 100027；4. 成都理工大学，成都 610059；5. 西南石油大学石油与天然气工程学院，成都 610500；6. 中海油研究总院有限责任公司，北京 100028）

摘要：我国能源强国和“双碳”战略目标的实现，需要加速构建现代能源体系，加快转变能源发展方式和提高能源生产保障能力；多种能源融合是解决各能源分系统割裂、调整优化能源格局、提高能源清洁利用效率的有效解决方案。本文在分析多种能源融合发展现有模式的基础上，总结了国外多种能源融合发展的趋势、我国多种能源融合的发展现状和瓶颈；对标能源强国建设的清洁、高效等特征，提出了集能源转换、互补、再利用以及零碳生产生活功能于一体的新型多能融合模式，进而提出了多种能源融合的基本发展路径。研究建议，立足资源禀赋、建立支撑多种能源融合发展的中长期规划，加快突破多种能源融合关键核心技术、提高装备可靠性，加强“多种能源融合”相关人才培养，优化多种能源融合产业链结构，以更好推进我国多种能源融合发展的规划、建设与实践。

关键词：多能融合；能源强国；双碳；清洁低碳；安全高效

中图分类号：TK01　　**文献标识码：**A

Multi-energy Integrated Development Strategy

Wang Guorong[1,2*], Zhou Li[1], Zhou Shouwei[3], Liu Qingyou[4], Zhang Zheng[5], Zhong Lin[1], Fu Qiang[6], Li Qingping[6]

(1. School of Mechanical Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China; 2. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Chengdu 610059, China; 3. China National Offshore Oil Corporation, Beijing 100027, China; 4. Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China; 5. Petroleum Engineering School, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China; 6. CNOOC Research Institute Co., Ltd., Beijing 100028, China)

Abstract: To strengthen its energy sector and realize the carbon peaking and carbon neutrality goals, China needs to accelerate the construction of a modern energy system, transform its energy development mode, and improve its energy production support capabilities. The integration and complementarity of multiple energy sources is an effective concept and scheme to solve the separation of energy subsystems, optimize the energy pattern, and improve the efficiency of clean energy utilization. Based on the analysis of the existing modes of multi-energy integration, this study summarizes the development status and bottlenecks of multi-energy integration in China and the development trend of multi-energy integration in other countries. Considering existing models, a new multi-energy integration model that integrates energy conversion, complementarity, reuse, and zero-carbon production is proposed to achieve the clean and efficient utilization of energy. To promote the planning, construction, and practice of multi-energy integration in China, we further propose a basic development path and the following suggestions: (1) formulating a medium- and long-term plan to support multi-energy integration based on resource endowment, (2) accelerating the breakthroughs in key core technologies for multi-energy

收稿日期：2024-03-04；**修回日期：**2024-04-17

通讯作者：*王国荣，西南石油大学机电工程学院教授，研究方向为油气装备开发及能源综合利用；E-mail: wanggr@swpu.edu.cn

资助项目：中国工程院咨询项目“推动能源强国建设战略研究”(2022-PP-03)

本刊网址：www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

integration to improve the reliability of equipment, (3) strengthening the training of talents related to multi-energy integration, and (4) optimizing the structure of the multi-energy integration industrial chain.
Keywords: multi-energy integration; energy power; carbon peaking and carbon neutrality; clean and low-carbon; safe and efficient

一、前言

能源是社会经济发展的关键物质基础和动力来源，是实现“双碳”和能源强国目标的重要领域[1,2]。我国正加快转变能源发展方式，构建清洁低碳、安全高效的能源体系，加强能源生产保障能力，充分发挥煤炭的“压舱石”作用[3]，不断提升勘探力度，发展多元清洁供电体系[4]。目前，多种能源的生产和利用方式发生了深刻变革，能源高质量发展取得了新的进步，为经济社会稳定发展和民生用能需求提供了坚实的保障。我国是世界最大能源生产国，总体能源自给率达到80%，能源消费结构以煤炭为主。然而，以“煤基”为主要表现形式的煤炭过度利用在对环境带来破坏外的同时，也给“双碳”目标的实现带来了巨大压力。近年来，我国油气对外依存度不断增加，能源安全保障面临挑战[5]，为增强能源韧性，需积极改变以煤为主的能源格局[6,7]。长期以来，传统化石能源、可再生能源、核能等分属不同的能源领域，逐渐形成了相对独立的能源发展格局，导致整体能源利用效率不高，未能协调发展[3,8,9]。我国能源领域存在能源保障体系不完善、地区分布不均、供给方式单一等问题，迫切需要调整能源结构、增强能源韧性、保障能源安全、提高能源利用效率。

仅仅依靠单一领域科技发展或单一类型能源变革难以解决跨系统的能源问题[9,10]。面向国家发展清洁低碳、安全高效的能源体系建设要求，已有研究围绕多种能源融合的理念、技术、项目示范等开展了深入探讨。具体包括：提出煤炭、石油、天然气、可再生能源、新能源和核能等多种能源融合互补的发展理念，布局一批多能融合技术的研发与示范项目[8,11]；深入研究多种能源融合互补示范项目、关键技术、互补优化调度方案，明确新时期我国能源融合发展的核心任务[12~14]；从能源总量、机制体制、能源安全等方面，分析未来一段时期内我国能源发展的关键问题，涵盖油气供给安全、核电发展立足自主、氢能和储能全产业链规模化发展等[15~17]；提出适合推进“双碳”能源技术综合示范的多能融合理念及路径，运用多维度评价指标来判别可再生能源项目[18,19]；从多能互补角度阐述多种能源系统的特点与特性差异，对可再生能源的最大消纳情况进行分析[20~22]。近年来，我国相关研究在基础理论体系、关键技术研发与应用方面取得了重大进展，各领域多种能源融合技术蓬勃发展，但仍存在多种能源融合占比小、覆盖面窄、技术不成熟以及融合体系不清晰等问题。

立足我国“双碳”战略目标，本文对标能源强国建设的清洁、低碳、高效等特征，分析现有多种能源融合领域的发展现状，寻求多种能源融合互补新模式，探索多种能源融合新路径，提出“双碳”战略及能源强国目标下的融合发展建议，以期为多种能源融合发展规划、建设及实践研究提供参考。

二、多种能源融合发展的现有模式和国际进展

（一）现有多种能源融合发展模式

多种能源融合是解决各能源分系统割裂、调整优化能源格局、提高能源清洁利用效率的有效方案[8,9,23]。现有的煤炭、石油、天然气、可再生能源、核能、氢能等能源在生产、储运、转化、回收等过程中可以通过融合互补手段实现能源的清洁高效利用，具有广阔的互补融合和协同优化空间[24]。目前，基于传统化石能源（煤炭、石油、天然气）、可再生能源（太阳能、风能、水能、地热能）、具有储能功能的能源（氢能、氨能，以下简称新能源）三大类能源的融合主要有以下4种模式。

1. 传统化石能源与可再生能源融合模式

与传统化石能源相比，可再生能源具有来源广泛且清洁低碳的优势，但受现有科学技术和电力基础设施建设的限制，可再生能源的发展应用仍面临诸多挑战[25,26]，如存在电力供给不稳定、成本偏高等问题。针对可再生能源的季节性、波动性等特点，利用煤炭发电可以对其进行动态补偿，实现能源多元化供应，有效提高能源利用效率。

2. 传统化石能源与新能源融合模式

在“双碳”背景下，氢气作为清洁能源的重要载体，作用日益凸显，而煤炭等传统化石能源具有高碳排放、高能耗和高水耗的特点[6]。基于化石能源和氢能的特点，将碳基能源与氢气进行耦合，两者相辅相成，可以发挥良好的协同作用，实现煤炭的洁净转化，减少碳排放[15]。例如，化石能源制氢与碳捕集、利用与封存（CCUS）技术耦合[27]，协同实现低碳化的化石能源制氢，同时解决了碳捕集和存储问题；此外，充分利用化石能源的富碳优势，利用氢气与原料煤直接反应，产生芳烃、聚烯烃、甲醇等化合物，进而减少反应步骤，实现近零排放和能耗降低。

3. 新能源与可再生能源融合模式

风、光、水等可再生能源发电具有波动性、随机性等特点，受我国现有技术水平和基础设施建设限制，还不具备大规模并网的条件，强行并网容易降低电能质量、影响电力系统的稳定性[28]。与之对应，新能源具有能量密度高、清洁低碳、储能容量大、储能时间长等特点，可以对可再生能源转换的电能进行储存和再发电，削峰填谷，减少弃风弃电，有效降低对电网的冲击，实现可再生能源向电能的平稳转化[29]。

4. 传统化石能源、可再生能源与新能源融合模式

传统化石能源与可再生能源融合互补发电，将煤炭与风、光资源就地转换，通过高压直流通道输送电力；对于无法实时消纳的电能，通过储能设备就地存储，将显著提高能源的利用率[30,31]。

（二）多种能源融合发展的国际进展

随着社会经济的快速发展，用能需求不断攀升，由此引发了大规模的区域性和全球性环境问题，对此，许多发达国家和地区在21世纪初提出了能源系统发展计划[32~36]，旨在建立高集成度、灵活高效的新型能源供应体系，促进冷、热、电、气等能源的横向互补耦合利用，实现源、网、荷、储等环节的纵向有机协调发展。

欧洲最早提出综合能源系统概念，将能源协调优化研究提到了首要位置，并在欧盟框架下统一开展综合能源系统相关技术研究[32]。欧洲自1999年起开展了多能流协同优化、能源和信息系统耦合集成等方面研究。除此之外，欧洲各国还根据自身需求推进“源网荷储”一体化和多种能源互补发展，进行了大量更为深入的有关综合能源系统的研究。欧盟在“H2020计划”的最后一期投入3480万欧元，由荷兰海洋能源中心牵头建设集海上风电、波浪能和漂浮式光伏为一体的海洋能多种能源互补电站。英国与欧洲大陆的电力和燃气网络通过相对小容量的高压直流线路及燃气管道相连，英国政府和企业长期致力于建立一个安全、可持续发展的能源系统。英国高度分布式电力系统项目侧重研究可再生能源与电力系统的协同优化，而高度分布式能源未来项目重点研究智能电网框架下集中式能源系统和分布式能源系统的协同。德国是能源转型的先驱者，着力于构建新型能源网络，充分利用先进的通信技术和调控手段来满足日益复杂的分布式用户终端电力需求[33]。2008年，德国启动的E-Energy能源互联网示范项目是一个标志性项目，涵盖智能发电、智能电网、智能消费和智能储能4个方面；继E-Energy项目后，德国持续注重综合能源服务领域的发展，布局建设了多个大型示范区域，推进了新能源及电动汽车并网示范项目、端能源云和未来能源网等项目，积极实施提高能效、弃核弃煤和发展可再生能源战略。1976年，丹麦发布的“电力供应法案”要求，新增电力负荷须全部来自热电联产，为供热系统应用电厂余热废热提供了有利的政策支持[32]；此后政府发布了一系列政策，鼓励电力系统与热力系统耦合发展，推广区域供暖和热电联产，提高电厂的灵活性和能源利用效率。

美国是当今世界的能源大国，其电网灵活性在经济脱碳中发挥了重要作用[32]。2001年，美国能源部提出了综合能源系统发展计划，大力发展智能电网、分布式能源及冷热电联供技术；2006年，提出实施“先进能源计划”；2007年，颁布“能源独立和安全法案”，明确要求社会主要供用能环节要开展综合能源规划。此外，美国先后制定和发布了“未来能源安全蓝图”“全面能源战略”“作为经济可持续增长路径的全方位能源战略”等文件，推动以智慧综合能源服务为代表的融合基础设施发展，进一步提高社会供能系统的稳定性和经济性。

日本贯彻推进能源供给多元化，以科技进步提高能源使用率和开发新能源的能源战略。当前，日本在坚持能源供给来源多元化的同时，强调能源独立以降低对外能源依赖。福岛核事故后，日本开始

加快布局核能以外的其他能源，致力于海上风电、制氢和智能社区的研究与示范[34]，实现交通、供水、信息和医疗供能系统的集成。

综上，主要发达国家和地区通过综合能源系统实现多种能源的融合互补，并且根据自身国情和需求制定适合自身发展的多种能源融合发展战略。

三、我国多种能源融合发展的现状与瓶颈

（一）我国多种能源融合发展的现状

随着多种能源互补融合发展概念的提出，我国布局了一批多种能源融合技术研发项目，大力推进多种能源融合互补示范工程建设，促进多种能源综合化利用，相继发布了《关于促进储能技术与产业发展的指导意见》（2017年）、《国家发展改革委 国家能源局关于推进电力源网荷储一体化和多能互补发展的指导意见》（2021年）、《国家发展改革委 国家能源局关于加快建设全国统一电力市场体系的指导意见》（2022年）、《2023年能源工作指导意见》（2023年）、《国家发展改革委 国家能源局关于新形势下配电网高质量发展的指导意见》（2024年）等一系列政策文件，推进综合能源改革试点建设[35~37]。《“十四五”能源领域科技创新规划》（2021年）提出，加快能源产业的数字化和智能化升级，实现多种能源协同互补及用能需求智能调控。《关于“风光水火储”“源网荷储”建设的指导意见（征求意见稿）》（2020年）指出，加速推进“源网荷储”一体化和多种能源互补发展，提升保障能力和利用效率，建设多种能源互补综合能源系统，提升可再生能源消纳水平，大力发展多种能源互补集成优化示范工程[23,19,31]（见表1）。

根据国家能源局的相关数据，截至2020年年底，全国各地申报的多种能源互补集成优化示范工程建设项目超过500个，首批多种能源互补集成优化示范工程入选项目共计23个。其中，鲁能青海海西多能互补集成优化国家示范工程总装机容量为7×10^5 kW，是集风电、光伏、光热、储能于一体的科技创新项目，也是集可复制性、引领性、先进性、经济性、示范性于一体的国家能源重点示范项目。青岛中德生态园多能互补综合能源示范工程打造了多种能源互补集成优化的分布式能源综合利用模式。锡东映月湖科技园多种能源互补示范项目是江苏省首个园区级多种能源互补示范项目，采用传统供能设备与“冷热电三联供+冷热蓄能”设备相结合的方式，利用多种能源优化调度系统，根据不同时段的负荷需求，采用不同的能源供应策略。华能陇东多能互补综合基地是我国首个千万千瓦级“风光火储输”多种能源融合互补绿色智慧综合能源基地，现已成功并网发电。雅砻江柯拉一期光伏电站是全球最大、海拔最高的水光互补电站，现已投产并为推进水、风、光资源协同运行做出了初步探索。

此外，我国在风光资源丰富的新疆、内蒙古等省份纷纷规划建设绿氢项目，表2列出了2023年我国拟规划建设的绿氢项目。当前，各个省市对多种能源互补发展的要求主要体现在：推进“风光火（储）”多种能源互补建设、推动实施多种能源互补技术实现能效提升、加快推进“可再生能源+储能”“源网荷储”一体化等。沿海省份主要针对海域用地进行多种能源互补工程规划，内陆省份则主要是开展“风光火储”多种能源互补建设。

（二）我国多种能源融合发展存在的问题

1. 能源融合发展体系和保障机制不完善

当前，我国能源结构仍然以化石能源为主，其中煤炭消费占能源消费的比重超过50%，远高出世界平均水平，迫切需要调整能源结构。煤炭、石油、天然气、可再生能源、核能等能源系统相对独立[38]，各种能源经生产、加工等环节衍生出众多能源载体，形成了复杂的能源体系。孤立的能源分系统难以实现协调发展，亟需调整我国的能源体系结构，破除各种能源种类之间的壁垒，突破能源种类之间互补及耦合利用的核心技术；通过多种能源融合系统建设，推动能源供应由单一化供应模式转变为多元化供应模式，以实现更高效、更可持续的能源发展。此外，我国传统能源退出加快而新能源替补能力不足，极易带来能源保障问题，亟需完善能源保障体系。目前，能源发展的被动融合居多，主动融合意识不强，相关的机制保障较为欠缺。多种能源融合产业服务体系尚不完善，运维水平较低。多种能源融合发展需要政府和市场双向发力，当前市场发挥的作用还不够充分，尚没有完全建立起市场化的机制和路径。

2. 多种能源融合的占比偏低

目前，我国的能源融合利用主要是推动“风光

表1　多能互补集成优化示范工程

融合模式	工程项目名称	状态	特点	评价
传统化石能源+可再生能源	贵州六盘水市多能互补能源基地	在建	首次运用零号高加回热系统，同步建设烟气脱硫、脱硝装置	有效实现低热值煤资源综合高效利用、改善矿区生态环境、节约土地和运力资源
	葫芦岛“风光火核储”一体化能源基地	在建	充分利用资源、区位优势，风光发电、抽水蓄能、火电等能源，风光火核储一体化能源基地建设初具规模	聚焦全国风电、光伏、储能等能源产业链的300余家上下游企业，壮大能源产业集群
	湖北“风光火储”一体化基地项目	在建	能源综合基地与电子信息技术、新能源与新材料领域的项目同步布局建设	进一步完善仙桃市电子信息技术产业链条，提升产业竞争优势
传统化石能源+新能源	中国石油化工股份有限公司、中国神华能源股份有限公司、中国石化集团新星石油有限责任公司等拥有多个化石能源制氢项目	技术成熟	原料充足、成本低廉、生产规模大、煤炭消耗大、高耗水、高污染	现阶段最有市场竞争力的制氢技术路线
新能源+可再生能源	国际氢能冶金示范区新能源制氢联产无碳燃料项目	在建	新能源制氢–绿色冶金–绿色化工综合示范	全球首个实现碳中和的氢能冶金化工综合示范项目
	内蒙古丰镇市年产5×10^4 t绿氢暨氢能装备产线项目	在建	集“风光氢储”于一体，采用国际先进的质子交换膜电解水技术（PEM）制氢技术	全球最大规模新能源PEM制氢项目
	中国电力工程顾问集团有限公司双鸭山市百万吨级绿色甲醇生产基项目	在建	绿氢制绿色甲醇	提出绿色氢基能源一体化解决方案，创新氢能产业发展新模式，激活绿色能源资源新价值
	哈尔滨市双城区“风光氢氨醇”一体化项目	在建	涵盖制氢、加氢、氢能化工、氢能装备全产业链条	完善哈尔滨市氢能全产业链建设
传统化石能源+可再生能源+新能源	内蒙古蒙西托克托200 MW新能源外送项目	首批机组正式并网发电	利用既有火电通道外送新能源，实现新能源项目送出线路投资零新增	积极发挥火电机组对新能源的支撑作用，依托煤电机组深度调峰能力，提升了“绿电”送出稳定性
	华能陇东能源基地首批100 MW风光项目	成功并网发电	“沙戈荒”大型风电光伏基地项目，具有集约化、数字化、标准化优势	风光同场集约化的规划布置方式提高了风光资源利用效率，具有显著的经济效益和生态效益
	鲁能青海海西多能互补集成优化国家示范工程	成功并网发电	设计光热发电储能系统，采用“新能源+”模式，构建“互联网+”智慧能源系统，多种能源深度融合	攻克多项技术难题，将风电、光伏等多种能源进行高效整合，实现一体化调控工作，实现弃风量小于5%
	京能乌兰察布1500 MW“风光火储氢一体化”大型风电光伏基地项目	首台风机成功并网发电	“风光火储氢”一体化	加快绿电进京基地建设，提高可再生能源消纳比例

水火储”清洁能源基地建设，因地制宜采用风能、太阳能、水能、煤炭等多种能源品种发电互相补充，并配套一定比例的储能。现已布局了松辽、冀北等九大清洁能源基地和福建、浙江等四大海上风

表2 2023年我国拟建设的绿氢项目

项目名称	投资金额/亿元	项目简介
陕西府谷县绿电制氢合成氨及储氢电池产业链项目	53	拟建设 6×10^4 m³/h 的电解水制氢、500 kg/d 的加氢站、2×10^5 t/a 的绿色合成氨、燃料电池产业研究院及电池储能系统制造项目
内蒙古丰镇市风光制氢一体化项目	36	建设制氢规模约 40 t/d，项目分两期建设
内蒙古满洲里市风光制氢一体化项目	100	建设 1.5 GW 新能源发电项目，建设年产 6×10^4 t 的制氢项目
中能建氢能源有限公司巴林左旗绿色氢基化工基地示范项目	50	拟建设年产约 2×10^4 t 的电解水制氢设施，年产 1×10^5 t 的低压合成氨装置
内蒙古赤峰风光制氢百万吨绿色甲醇项目	260	风光制氢 1×10^6 t 绿色甲醇
内蒙古丰镇市年产 5×10^4 t 绿氢暨氢能装备产线项目	330	采用 PEM 制氢技术，3 GW 可再生风光能源制氢
甘肃兰州新区绿电制氢项目	12.3	年产 2×10^4 t 氢、年产 6×10^4 t 氨
乌兰察布兴和县风光发电制氢合成氨一体化项目	41.39	园区制氢、氢燃料电池示范性生产线和绿电制氢配套风力发电项目
中能建双鸭山市百万吨级绿色甲醇生产基项目	168	一期先行建设年产 3×10^5 t 生物质气化耦合绿氢制绿色甲醇
榆林华秦新能源产业园（中西部氢谷）二期项目	16	以年产 4×10^4 t 氢气的一期工程为基础，建设百万兆瓦级以上“风光水电解制氢”基地，配套建设储氢基地和储氢研究中心，以“蓝氢+绿氢”为氢气来源生产合成氨，实施陕西首个绿氢制绿氨项目，并提供合成尿素所需要的原料
远景能源有限公司煤化工耦合绿氢绿醇项目	30	建设 5×10^4 Nm³/h 绿氢、2.5×10^4 Nm³/h 绿氧和 3×10^5 t/年绿色甲醇项目，并与榆林共同建设“零碳化工国际产业园”
豫北绿氢供应基地项目	30	建设 1 个多种能源互补的统一调控中心，新建 1 座 5×10^5 kW 的多种能源互补风力电站，1 座年产绿电 1×10^8 kW·h、1×10^4 Nm³/h 的制氢站，年产绿氢 1×10^4 t
中电建赤峰风光制氢一体化示范项目（元宝山区部分）	7.76	最大产氢量 3.4×10^4 Nm³/h，风电、光伏所产绿电生产绿氢产品，电解产生的 1.4 MPa 氢气直接送入氢气管网并最终送入下游的合成氨用户

电基地，推进“风光水火储”多能互补系统建设运行。尽管各能源基地建设取得重大突破，但从整体来看，清洁能源基地发电量占可再生能源总发电量的比重较小；各种能源与原材料工业、制造业等领域仍有较大的融合空间。此外，我国先后在山东、辽宁和浙江开始了核能供热的探索与实践，规划建设了多个核能供热工程，但目前核能与其他能源的融合利用仍较少。核能发电具有能量密度高、低碳排放、长期运行成本低等显著优势，与水电、光电、风电等可再生能源发电相比，具有无间歇性、电力稳定等优点，将核能用于发电制氢、海水淡化等具有广阔的利用前景。

3. 多种能源融合的技术仍不成熟

科技创新是实现能源融合的根本动力。多种能源融合的核心是储能和电力灵活调峰。目前，储能产业的各环节仍需要进一步取得技术突破[39,40]，如氢气的储存和运输是整个产业链难度最大的环节。雅砻江、金沙江、澜沧江等大型水电多能互补清洁能源示范基地，面临强不确定性、复杂异构并网、跨流域跨电网互联等挑战以及更复杂的综合要求，在设备巡检、容量配置、调度运行方面仍存在诸多科学难题和技术瓶颈亟待解决[41]。此外，在新型电力系统中，水、风、光等非化石能源大规模发展对电力系统可靠性和稳定性带来诸多挑战，需积极发展电化学储能、抽水蓄能、压缩空气储能等，突破长周期储能关键技术、分布式供能技术、新型电力电子设备，推进电网层级间的特高压主干网和微电网建设，满足系统内电能多向流动需求[20]。当前，虽已经初步建立了全国范围的电力市场体系，但仍需发展和完善符合我国多种能源融合发展模式下的电力调控系统，突破不同时间尺度下的功率平衡技术、扰动冲击下的控制与安全防御技术[42]。

4. 能源融合深度偏浅

目前，我国多种能源融合互补示范工程主要集中在多种能源的横向融合互补方面，如风光互补、水光互补、“水风光柴”互补等，缺乏“能源+”工业、建筑等领域的深度融合。能源产业链不同环节之间的互补性不足，不同能源在生产、供应、消费以及“源网荷储”等方面的纵向融合仍有较大的优化和协调空间[43]。此外，受现有基础设施建设、核心技术装备等条件限制，我国能源与互联网的融合尚不深入。

四、我国多种能源融合的主导模式和发展路径设计

（一）我国多种能源融合的主导模式

目前，我国的能源融合模式主要集中于“风光水火储”融合互补发电，存在融合模式较少、融合深度浅等问题。此外，我国能源资源种类丰富但分布不均，需要基于我国资源禀赋、结合当地资源条件和特点，因地制宜地选择能源融合模式，探索能源多样、选择灵活、可推广复制的能源融合发展新模式。本文在现有能源融合模式的基础上，从能源融合发展功能的角度出发，提出了我国多种能源融合的主导模式，即以电能和氢能为中心，集能源转换、互补、再利用及零碳生活功能于一体的多种能源融合模式（见图1）。

1. 能源转换

不同能源之间进行转换可以缓解单一能源的供应短缺问题，增加多种能源融合的占比。① 煤制天然气：通过煤化工技术将煤、焦炭、半焦等固体燃料和重油等液体燃料干馏或气化制成天然气。这种生产方式具有原料丰富、成本低、产生的CO_2易捕捉等优点。② 化石能源制氢：利用现有的化石能源资源（煤炭、天然气、甲烷、甲醇等）制氢，生产的氢气具有质量高、成本低、能力强等特点。③ 海上风光制氢：利用海上丰富的风能或太阳能发电，通过电解水制氢，显著降低制氢成本，方便储能和运输。

2. 能源互补降碳

不同能源在生产、利用、消费环节进行互补，可以显著降低碳排放量，加速实现碳达峰目标。① 天然气掺氢：将纯氢气掺入到天然气中（掺氢比例一般为3%~20%），在燃烧时可以减少碳排放量并提高燃烧热值。天然气掺氢技术具有较大的推广潜力，同时，掺氢技术也具有较好的经济和环境效益，在氢能经济的大背景下，具有相当广泛的应用前景。

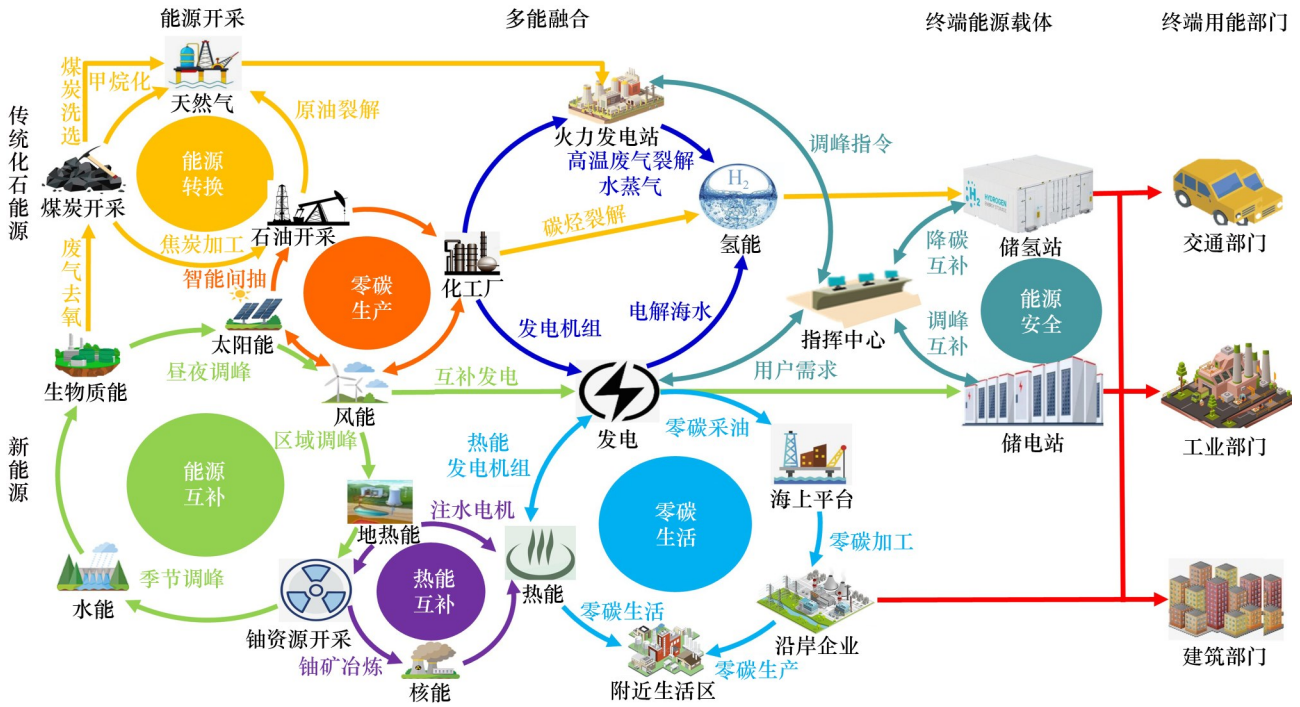

图1　多种能源融合模式

② 生物质–煤炭发电：利用生物质燃烧所产生的废气，去除燃煤系统中的氧气，从而实现节约煤炭和碳减排。生物质–煤炭发电是一种在清洁能源利用、可再生资源利用、促进农业发展等方面具有潜力的发电方式，既有利于我国实现“双碳”目标，也有利于推动传统煤炭企业的绿色低碳转型。③ 绿氢与煤化工融合：煤化工过程会产生大量的CO_2，而此过程中煤炭中的碳原子利用率仅为50%。若在煤化工过程中引入绿氢来生成烯烃化合物，可以从源头上减少碳排放。

3. 能源互补调峰

以光伏发电、风电为代表的可再生能源具有随机性、波动性、间歇性等特点，可利用火电进行互补、就地消纳制氢等方式进行互补调峰，提高供能的利用效率和灵活性。① 火电与可再生能源发电互补：将灵活改造的煤电作为可再生能源并网消纳的重要配套资源，发挥煤电调峰的低成本和高安全性作用，平抑可再生能源电力的波动性，保障可再生能源消纳和电力系统的稳定运行。② 海上风电 / 光伏发电电解制氢：通过合理布局海上风电、光伏等技术建设微电网，就近利用即将退役的油气平台改造为海水制氢平台，在平台上就地消纳电能进行电解水制氢，大幅提高海洋清洁能源供能比例，并利用现有的油气管道输送氢气，进一步降低运氢成本。

4. 能源再利用

我国是工业门类齐全的工业大国，拥有独立完整的现代工业体系，而工业能源消费量超过3×10^9 tce。与此同时，工业生产过程也会释放大量的副产热能和压差能，如果能将这部分余热内能和余压势能回收利用，则可以显著提高能源利用效率。① 余热利用：基于热交换、热功转换、余热制冷 / 制热等技术，回收余热用于工业供能和生活供暖，节省其他能源的消耗，降低加热成本，实现节能减排；② 余压利用：利用余压回收设备，将工业生产过程中的高压蒸汽、燃气余压、液体余压等压力能进行回收，用于驱动涡轮发电机或其他设备，将压力能转化为机械能 / 电能等其他形式的能源，实现节约能源和环境保护的目的。

5. 能源的零碳生产 / 生活利用

随着我国经济的不断发展，未来对能源的需求仍将逐渐增加。然而，我国部分区域的油气资源开发存在费用过高、关井后电力设施设备存在严重的浪费现象[44]。为此，将油气勘探开发与可再生能源、新能源深度融合，可显著降低油气开发成本，减少碳排放[45]。① 零碳采油 / 炼油：在油气勘探开发时，利用辖区丰富的风、光资源发电以代替传统煤电，可以实现原油生产的零碳排放。② 生活区附近的地热供暖：利用油气生产的伴生水热量为附近居民和工厂供暖、供热水等，满足生活需求。

（二）多种能源融合发展路径

基于多种能源融合模式，本研究提出了多种能源融合发展路径（见图2）。我国能源资源丰富且分布广泛，但各地区的资源分布并不均衡，需要基于我国资源禀赋，结合当地资源条件和特点，因地制宜地选择能源融合模式，发展多能融合工程。具体来看，合理配置储能，统筹各类电源规划、设计、建设、运营，优先发展新能源；充分发挥流域梯级水电站、具有较强调节性能水电站、火电机组、储能设施的调节能力，减轻送受端系统的调峰压力；促进传统化石能源、可再生能源、具有储能功能的新能源等各能源分系统之间有机整合、协调互补；将“能源+”与工业、交通、建筑等行业紧密结合，通过深度融合来应对能源和原料（材料）供需矛盾，实现能源与物质的跨系统融合，构建电、热、水等多元化能源供应系统。此外，基于多种能融合能源系统架构和利益主体间关系，从清洁低碳、安全可靠、利用效率、经济效益、社会服务水平等方面构建多种能融合能源系统评价指标体系，实现能源资源利用效率、环境效益、经济效益等多重目标的优化。

五、多种能源融合发展建议

（一）立足资源禀赋，制定支撑多能融合发展的中长期规划

可持续的多能融合发展中长期规划及完备的法律政策体系是推动多种能源融合发展的前提条件。建议立足我国能源资源禀赋，发挥国家体制优势，秉承清洁低碳、安全高效的原则，面向2035年和2060年，制定推动支撑多能融合互补发展的中长期规划，明确各阶段的发展目标、发展路线和各阶段的重点任务，进一步加强全局性顶层设计。在确保能源保供稳价和能源安全的基础上，因地制宜提出

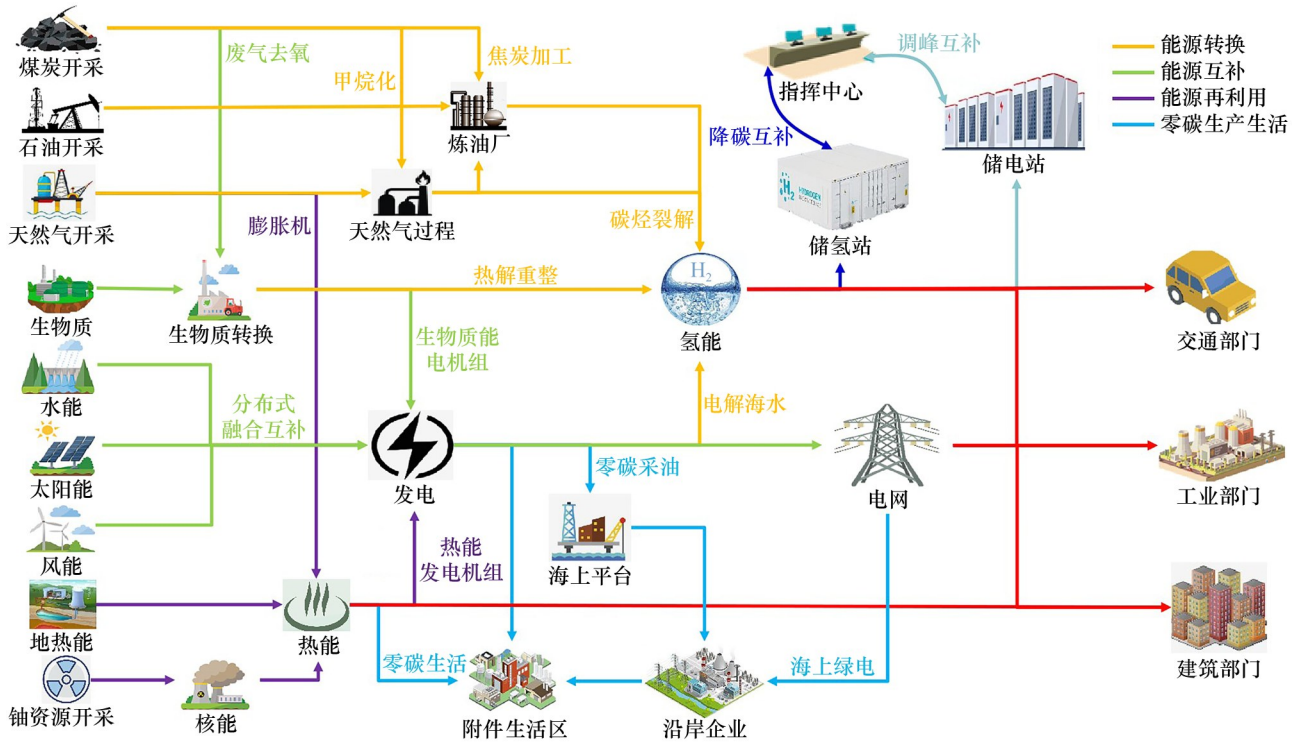

图2　多种能源融合发展路径

我国多种能源融合互补产业化发展的技术支撑方案。坚持全局发展观念，自上而下建立具有持久法律效力的、成体系的法规政策支撑，增强相关法律法规的针对性和有效性，为我国多种能源的融合互补发展提供法律保障。

（二）加快突破多种能源融合关键核心技术，提高装备可靠性

科技创新是实现能源融合的根本动力。建议全面评估现有多种能源融合发展供应链、产业链、创新链的薄弱环节，加强多种能源融合创新的新型基础设施建设，大力推动科学技术创新，加快关键核心装备技术攻关。以数字化科技为核心驱动力，强化开放共享数字化平台建设，充分发挥智能电网在能源网络拓展中的巨大潜力，打通不同能源间的信息壁垒，促进能源网络各个环节的互联互通和互补互济，提升多能融合产业链上、中、下游及行业间的协调运行效率，以数字化智能化促进多种能源融合互补发展。

（三）加强“多能融合”相关人才培养

人才是创新发展的核心要素，多种能源融合发展需要跨学科、跨领域的创新性复合人才。建议推动多种能源融合与相关学科专业融合发展，秉承开放教学的思维，在课程中进行融合教育，建立和完善多种能源融合教育体系。深化产教融合协同育人，充分利用能源融合发展领域的科研项目及科研平台，从科技前沿、基础研究和技术研发的角度，以问题为导向，以任务带学科，实现教育链、人才链与产业链、创新链的有机衔接，大力培养多种能源融合发展复合型人才。

（四）优化多种能源融合互补产业链结构

在全球格局深刻变革、国际竞争日趋激烈的背景下，我国能源产业链运行中的一些风险逐渐显现。建议鼓励各地区加强协同合作，弥合产业链协作的“断点”，共同构建具有竞争优势的能源产业链集群。构建制造与服务相互促进、良性循环的发展模式，推动产业结构的转型和链条结构的重塑，持续提升能源产业链的循环流畅度，增强能源产业链的弹性和应对风险的能力。同时，积极引进优质资本和先进技术，构建更加多元的多种能源融合发展产业链。

利益冲突声明

本文作者在此声明彼此之间不存在任何利益冲突或财务冲突。

Received date: March 4, 2024; **Revised date:** April 17, 2024

Corresponding author: Wang Guorong is a professor from the School of Mechanical Engineering, Southwest Petroleum University. His major research fields include oil and gas equipment development and energy comprehensive utilization. E-mail: wanggr@swpu.edu.cn

Funding project: Chinese Academy of Engineering project “Strategic Research on Promoting the Construction of Energy Power” (2022-PP-03)

参考文献

[1] 谢克昌. 面向2035年我国能源发展的思考与建议 [J]. 中国工程科学, 2022, 24(6): 1–7.
Xie K C. China’s energy development for 2035: Strategic thinking and suggestions [J]. Strategic Study of CAE, 2022, 24(6): 1–7.

[2] 梁红娟. 浅谈我国的能源现状及能源对策 [J]. 甘肃科技, 2019, 35(15): 6–8.
Liang H J. On China’s current energy situation and energy countermeasures [J]. Gansu Science and Technology, 2019, 35(15): 6–8.

[3] 余美玲. 新形势下我国能源发展的特点及趋势分析 [J]. 河南科技, 2019 (17): 128–130.
Yu M L. Analysis on the characteristics and trends of energy development in China under the new situation [J]. Henan Science and Technology, 2019 (17): 128–130.

[4] 马艳, 朱文斌, 宋绍伟, 等. 我国能源行业清洁化发展进程、现状与建议 [J]. 山东化工, 2021, 50(13): 84–85, 90.
Ma Y, Zhu W B, Song S W, et al. Clean development progress, status, and suggestion of Chinese energy industry [J]. Shandong Chemical Industry, 2021, 50(13): 84–85, 90.

[5] 中能传媒能源安全新战略研究院. 中国能源大数据报告(2023) [R]. 北京: 中能传媒能源安全新战略研究院, 2023.
Institute for New Strategies for Energy Security of China Energy Media Group Co., Ltd. China energy big data report (2023) [R]. Beijing: Institute for New Strategies for Energy Security of China Energy Media Group Co., Ltd., 2023.

[6] 陈志华. “3060”双碳背景下能源发展现状 [J]. 现代工业经济和信息化, 2023, 13(6): 195–196, 199.
Chen Z H. Current situation of energy development under the background of “30·60 dual carbon” [J]. Modern Industrial Economy and Informationization, 2023, 13(6): 195–196, 199.

[7] 李洪言, 张景谦, 陈健斌, 等. 2021年全球能源转型面临挑战——基于《bp世界能源统计年鉴(2022)》[J]. 天然气与石油, 2022, 40(6): 129–138.
Li H Y, Zhang J Q, Chen J B, et al. Global energy transition faces challenges in 2021—Based on the *bp statistical review of world energy (2022)* [J]. Natural Gas and Oil, 2022, 40(6): 129–138.

[8] 苏健, 梁英波, 丁麟, 等. 碳中和目标下我国能源发展战略探讨 [J]. 中国科学院院刊, 2021, 36(9): 1001–1009.
Su J, Liang Y B, Ding L, et al. Research on China’s energy development strategy under carbon neutrality [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2021, 36(9): 1001–1009.

[9] 蔡睿, 朱汉雄, 李婉君, 等. “双碳”目标下能源科技的多能融合发展路径研究 [J]. 中国科学院院刊, 2022, 37(4): 502–510.
Cai R, Zhu H X, Li W J, et al. Development path of energy science and technology under “dual carbon” goals: Perspective of multi-energy system integration [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2022, 37(4): 502–510.

[10] 朱汉雄, 王一, 茹加, 等. “双碳”目标下推动能源技术区域综合示范的路径思考 [J]. 中国科学院院刊, 2022, 37(4): 559–566.
Zhu H X, Wang Y, Ru J, et al. Thoughts on regional path of promoting comprehensive demonstration of low-carbon energy technology under “dual carbon” goals [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2022, 37(4): 559–566.

[11] 刘楠, 康俊杰, 赵春阳. 多能互补能源基地开发模式及综合效益提升方法 [J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(4): 1339–1352.
Liu N, Kang J J, Zhao C Y. Development model of multi-energy complementary energy base and comprehensive benefit enhancement method [J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(4): 1339–1352.

[12] 谭忠富, 谭清坤, 赵蕊. 多能互补系统关键技术综述 [J]. 分布式能源, 2017, 2(5): 1–10.
Tan Z F, Tan Q K, Zhao R. Review of key technologies for multi energy complementary systems [J]. Distributed Energy, 2017, 2(5): 1–10.

[13] 王虎. 基于多能互补的综合能源发展模式研究及应用 [J]. 电力与能源, 2022, 43(5): 438–440, 456.
Wang H. Research and application of comprehensive energy development mode based on multi-energy complementarity [J]. Power & Energy, 2022, 43(5): 438–440, 456.

[14] 倪炜, 朱吉茂, 姜大霖, 等. “双碳”目标下煤炭与新能源的优化组合方式、挑战与建议 [J]. 中国煤炭, 2022, 48(12): 22–27.
Ni W, Zhu J M, Jiang D L, et al. Research on the optimized combination modes, challenges and suggestions of coal and new energy under the goals of carbon peak and carbon neutrality [J]. China Coal, 2022, 48(12): 22–27.

[15] 董洁, 乔建强. “双碳”目标下先进煤炭清洁利用发电技术研究综述 [J]. 中国电力, 2022, 55(8): 202–212.
Dong J, Qiao J Q. A review on advanced clean coal power generation technology under “carbon peaking and carbon neutrality” goal [J]. Electric Power, 2022, 55(8): 202–212.

[16] 李更丰, 黄玉雄, 别朝红, 等. 综合能源系统运行可靠性评估综述及展望 [J]. 电力自动化设备, 2019, 39(8): 12–21.
Li G F, Huang Y X, Bie Z H, et al. Review and prospect of operational reliability evaluation of integrated energy system [J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(8): 12–21.

[17] 郭振祥. 浅谈我国电力能源需求响应发展现状与展望 [J]. 中国设备工程, 2022 (2): 245–246.
Guo Z X. Discussion on the development status and prospect of China’s power energy demand response [J]. China Plant Engineering, 2022 (2): 245–246.

[18] 赵凤展, 李奇, 张启承, 等. 多能互补能源系统多维度综合评价方法 [J]. 农业工程学报, 2021, 37(17): 204–210.
Zhao F Z, Li Q, Zhang Q C, et al. Multi-dimensional comprehensive evaluation of multi-energy complementary energy system [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(17): 204–210.

[19] 屈小云, 吴鸣, 李奇, 等. 多能互补综合能源系统综合评价研究

进展综述 [J]. 中国电力, 2021, 54(11): 153–163.
Qu X Y, Wu M, Li Q, et al. Review on comprehensive evaluation of multi-energy complementary integrated energy systems [J]. Electric Power, 2021, 54(11): 153–163.

[20] 艾芊, 郝然. 多能互补、集成优化能源系统关键技术及挑战 [J]. 电力系统自动化, 2018, 42(4): 2–10, 46.
Ai Q, Hao R. Key technologies and challenges for multi-energy complementarity and optimization of integrated energy system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(4): 2–10, 46.

[21] 王仁顺, 赵宇, 马福元, 等. 受端电网高比例可再生能源消纳的运行瓶颈分析与储能需求评估 [J]. 电网技术, 2022, 46(10): 3777–3787.
Wang R S, Zhao Y, Ma F Y, et al. Operational bottleneck analysis and energy storage demand evaluation for high proportional renewable energy consumption in receiving-end grid [J]. Power System Technology, 2022, 46(10): 3777–3787.

[22] 陈冬林, 邹安琪, 王蕾, 等. “东数西算”赋能数据中心可再生能源消纳研究 [J]. 情报杂志, 2023, 42(7): 77–85.
Chen D L, Zou A Q, Wang L, et al. Research on the renewable energy accommodation in east data and west calculation empowering data centers [J]. Journal of Intelligence, 2023, 42(7): 77–85.

[23] 李尚民, 王杰杰, 彭玉金, 等. “双碳”目标下多能互补系统的发展 [J]. 山东电力高等专科学校学报, 2023, 26(3): 42–44.
Li S M, Wang J J, Peng Y J, et al. The development of multi-energy complementation system under the goals of carbon peaking and carbon neutrality [J]. Journal of Shandong Electric Power College, 2023, 26(3): 42–44.

[24] 马丽梅, 史丹, 裴庆冰. 中国能源低碳转型(2015—2050): 可再生能源发展与可行路径 [J]. 中国人口・资源与环境, 2018, 28(2): 8–18.
Ma L M, Shi D, Pei Q B. Low-carbon transformation of China’s energy in 2015—2050: Renewable energy development and feasible path [J]. China Population, Resources and Environment, 2018, 28(2): 8–18.

[25] 李争, 张蕊, 孙鹤旭, 等. 可再生能源多能互补制–储–运氢关键技术综述 [J]. 电工技术学报, 2021, 36(3): 446–462.
Li Z, Zhang R, Sun H X, et al. Review on key technologies of hydrogen generation, storage and transportation based on multi-energy complementary renewable energy [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(3): 446–462.

[26] 徐连兵. 我国氢能源利用前景与发展战略研究 [J]. 洁净煤技术, 2022, 28(9): 1–10.
Xu L B. Research on the prospect and development strategy of hydrogen energy in China [J]. Clean Coal Technology, 2022, 28(9): 1–10.

[27] 曹建宝. 多能互补与CCUS耦合利用碳减排模式分析 [J]. 当代石油石化, 2022, 30(5): 33–36, 51.
Cao J B. Analysis of carbon emission reduction model of coupling utilization of multi-energy complementation and CCUS [J]. Petroleum & Petrochemical Today, 2022, 30(5): 33–36, 51.

[28] 申建建, 王月, 程春田, 等. 水风光多能互补发电调度问题研究现状及展望 [J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(11): 3871–3885.
Shen J J, Wang Y, Cheng C T, et al. Research status and prospect of generation scheduling for hydropower-wind-solar energy complementary system [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(11): 3871–3885.

[29] Costoya X, DeCastro M, Carvalho D, et al. Assessing the complementarity of future hybrid wind and solar photovoltaic energy resources for North America [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2023, 173: 113101.

[30] 程瑜, 邵振州, 张金波, 等. 火电与风光储耦合规划设计 [J]. 洁净煤技术, 2022, 28(11): 82–89.
Cheng Y, Shao Z Z, Zhang J B, et al. Planning and design of thermal power and wind solar storage coupling [J]. Clean Coal Technology, 2022, 28(11): 82–89.

[31] 康俊杰, 赵春阳, 周国鹏, 等. 风光水火储多能互补示范项目发展现状及实施路径研究 [J]. 发电技术, 2023, 44(3): 407–416.
Kang J J, Zhao C Y, Zhou G P, et al. Research on development status and implementation path of wind-solar-water-thermal-energy storage multi-energy complementary demonstration project [J]. Power Generation Technology, 2023, 44(3): 407–416.

[32] 吴建中. 欧洲综合能源系统发展的驱动与现状 [J]. 电力系统自动化, 2016 (5): 1–7.
Wu J Z. Drivers and state-of-the-art of integrated energy systems in Europe [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016 (5): 1–7.

[33] 刘志伟, 林蕾, 曹凯, 等. 综合能源服务研究现状与发展趋势 [J]. 科技创新与应用, 2019 (24): 90–91.
Liu Z W, Lin L, Cao K, et al. Research status and development trend of comprehensive energy services [J]. Technology Innovation and Application, 2019 (24): 90–91.

[34] 宫飞翔, 李德智, 田世明, 等. 综合能源系统关键技术综述与展望 [J]. 可再生能源, 2019, 37(8): 1229–1235.
Gong F X, Li D Z, Tian S M, et al. Review and prospect of core technologies of integrated energy system [J]. Renewable Energy Resources, 2019, 37(8): 1229–1235.

[35] 左克祥, 王安, 张晋阳, 等. 我国多能互补项目政策分析及技术评价指标 [J]. 中外能源, 2022, 27(5): 24–28.
Zuo K X, Wang A, Zhang J Y, et al. Policy analysis and technical evaluation indexes of multi-energy complementary projects in China [J]. Sino-Global Energy, 2022, 27(5): 24–28.

[36] 代璐, 田立勃, 王海亮, 等. 计及用户综合用能行为和政策导向的广域综合能源系统联合规划方法 [J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(9): 57–71.
Dai L, Tian L B, Wang H L, et al. Integrated planning of supply and demand side considering the behavior analysis of energy users and the policy-oriented impact [J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(9): 57–71.

[37] 周信华, 郑祯晨. 基于源网荷储的综合能源多能互补协同优化规划 [J]. 电工技术, 2023 (10): 95–97, 137.
Zhou X H, Zheng Z C. Multi energy complementary collaborative optimization planning for integrated energy based on source network load storage [J]. Electric Engineering, 2023 (10): 95–97, 137.

[38] 章凯, 陈博. “多能互补”技术发展与应用 [J]. 科技和产业, 2018, 18(11): 92–99.
Zhang K, Chen B. The development and application of “multiple complementary” [J]. Science Technology and Industry, 2018, 18(11): 92–99.

[39] 何丰, 刘涛, 郭淑萍, 等. 可再生能源制氢技术现状及发展前景 [J].

电力系统装备, 2023 (4): 39–41.
He F, Liu T, Guo S P, et al. Present situation and development prospect of renewable energy hydrogen production technology [J]. Electric Power System Equipment, 2023 (4):39–41.

[40] 张来斌, 胡瑾秋, 张曦月, 等. 氢能制 – 储 – 运安全与应急保障技术现状与发展趋势 [J]. 石油科学通报, 2021, 6(2): 167–180.
Zhang L B, Hu J Q, Zhang X Y, et al. Research status and development trends of safety and emergency guarantee technology for production, storage and transportation of hydrogen [J]. Petroleum Science Bulletin, 2021, 6(2): 167–180.

[41] 程海花, 寇宇, 周琳, 等. 面向清洁能源消纳的流域型风光水多能互补基地协同优化调度模式与机制 [J]. 电力自动化设备, 2019, 39(10): 61–70.
Cheng H H, Kou Y, Zhou L, et al. Collaborative optimal dispatching mode and mechanism of watershed-type wind–solar–water multi-energy complementary bases for clean energy absorption [J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(10): 61–70.

[42] 武昭原, 周明, 王剑晓, 等. 双碳目标下提升电力系统灵活性的市场机制综述 [J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(21): 7746–7764.
Wu Z Y, Zhou M, Wang J X, et al. Review on market mechanism to enhance the flexibility of power system under the dual-carbon target [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(21): 7746–7764.

[43] 熊文, 刘育权, 苏万煌, 等. 考虑多能互补的区域综合能源系统多种储能优化配置 [J]. 电力自动化设备, 2019, 39(1): 118–126.
Xiong W, Liu Y Q, Su W H, et al. Optimal configuration of multi-energy storage in regional integrated energy system considering multi-energy complementation [J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(1): 118–126.

[44] 吴陈冰洁, 何建东, 贾艳雨. 中国石化南海北部新能源与油气耦合开发利用前景分析 [J]. 中外能源, 2023, 28(4): 15–22.
WuChen B J, He J D, Jia Y Y. Prospects analysis of coupling development of new energy and oil-gas of SINOPEC in northern South China Sea [J]. Sino-Global Energy, 2023, 28(4): 15–22.

[45] 田玉栋, 齐悦, 张仟, 等. 油田地热新能源钻井技术经济性评价研究 [J]. 石油和化工设备, 2023, 26(1): 5–7.
Tian Y D, Qi Y, Zhang Q, et al. Technical and economic evaluation of application of drilling geothermal new energy in oil field [J]. Petro & Chemical Equipment, 2023, 26(1): 5–7.