

## 2060 碳中和



徐冬 高级工程师

国家能源集团新能源技术研究院

徐冬,博士,国家能源集团新能源技术研究院碳中和研究中心主任,兼任 APEC 可持续能源中心专家委员会委员、联合国气候技术中心与网络咨询委员会(CTNEC)观察员、中欧气候变化与生物多样性旗舰计划中方专家组成员等。主要从事碳捕集、利用与封存(CCUS)全链条技术开发、示范推广和战略研究工作,包括 CCUS 全流程技术检测、新型碳捕集材料和工艺包开发、CCUS 标准体系建设、能源绿色低碳转型战略研究等。近年来,牵头组织开展集团公司十大重点科技攻关项目“二氧化碳捕集与资源化、能源化利用技术研究及示范”等多项国家级、省部级、集团公司级科技创新项目和课题;带领团队建成国内规模最大的锦界 15 万 t 碳捕集示范项目,正在开展泰州电厂 50 万 t 碳捕集示范项目。已申请发明专利 30 余项,在 *Journal of Cleaner Production*、*Ecotoxicology and Environmental Safety*、*Chemical Engineering Journal*、*Industrial & Engineering Chemistry Research*、*International Journal of Greenhouse Gas Control* 等期刊发表高水平学术论文 40 余篇。

## 碳中和目标下发电领域低碳转型路径

胡道成<sup>1</sup>,张帅<sup>2</sup>,韩涛<sup>2</sup>,郑旭帆<sup>2</sup>,顾永正<sup>3</sup>,徐冬<sup>2</sup>

(1.国家能源投资集团有限责任公司,北京 100011;2.国家能源集团 新能源技术研究院有限公司,北京 102209;

3.国电电力发展股份有限公司,北京 100101)

**摘要:**“碳达峰、碳中和”目标为我国发电领域低碳转型科技创新指明了方向和路径,在全球能源电力行业创新发展的背景下,发电领域向低碳化、清洁化、智能化、电气化、市场化、国际化发展成为必然趋势。分析了我国发电领域在煤炭清洁高效发电、可再生能源发电、核能、先进储能、氢能等方向的低碳转型科技创新现状、存在问题以及未来技术发展路径。为适应以新能源为主的新型电力系统,我国煤电机组正由传统主体电源逐步向基础电源转变,但国内大部分机组按照基本负荷设计,负荷调节范围、变负荷速率等关键指标与国外差距较大,且存在老机组效率低、碳排放高等问题,未来还需加大灵活智能发电、超高参数燃煤发电、新型高效燃煤发电、碳捕集利用和封存(CCUS)技术的攻关;我国水电技术已实现全面提升,形成了全产业链的整合能力,还需在高水头大容量和超低水头发电机组、安全高效运行和智慧电站关键技术方面发力;我国风电技术从风机设计制造、风电场开发运维、设备检测认证到标准体系建设等方面进行了全面研究部署并取得突破,还需向大型化、轻量化、低成本风力发电方向攻关,推动新一代信息技术应用,提高关键部件国产化率;光伏发电技术基本与世界同步,高效、低成本是技术主攻方向,光热发电技术在系统设计、集成运行等方面与国外差距明显,还需开发大容量、高参数、长时间储热、低成本的光热发电技术;地热发电和海洋能发电处于基础研究或技术研发和验证阶段,仍需加大技术研发和工程示范;我国已拥有完整的核燃料循环和核工业体系,核电技术

收稿日期:2022-03-21;责任编辑:白娅娜 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.CN22032102

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2017YFB0603305);中国科协青年人才托举工程资助项目(2021QNRC001);国家能源集团 2022 年“揭榜挂帅”政研课题资助项目;国家能源集团 2021 年度十大重点科技攻关资助项目(GJNY-21-51);厂控科技创新资助项目(10038803EB210021)

作者简介:胡道成(1976—),男,安徽滁州人,高级工程师,硕士。E-mail:daocheng.hu@chnenergy.com.cn

通讯作者:徐冬(1982—),男,辽宁盘锦人,高级工程师,博士。E-mail:dong.xu@chnenergy.com.cn

引用格式:胡道成,张帅,韩涛,等.碳中和目标下发电领域低碳转型路径[J].洁净煤技术,2022,28(7):23-33.

HU Daocheng, ZHANG Shuai, HAN Tao, et al. Research on the low carbon transformation path of power generation under the goal of carbon neutralization[J]. Clean Coal Technology, 2022, 28(7): 23-33.



移动阅读

走在世界前列,但在基础技术、工艺、材料、软件等方面卡脖子问题仍存在,还需在先进核能系统、核能综合利用方面加强研究,坚持走闭式核燃料循环技术路线,持续改进核能利用安全性;当前我国储能正向“规模化发展”迈进,但储能产业距离整体健康发展仍有差距,储能技术仍需向安全性、长寿命、低成本、规模化方向发展;氢能已形成完整产业链,但氢气主要来自灰氢,未来发展与大规模光伏发电或风力发电配套的电解水制绿氢技术将成为重点。

**关键词:**碳达峰;碳中和;发电领域;低碳转型;可再生能源;核能;储能;氢能

**中图分类号:**TK01;TM61 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-6772(2022)07-0023-11

## Research on the low carbon transformation path of power generation under the goal of carbon neutralization

HU Daocheng<sup>1</sup>, ZHANG Shuai<sup>2</sup>, HAN Tao<sup>2</sup>, ZHENG Xufan<sup>2</sup>, GU Yongzheng<sup>3</sup>, XU Dong<sup>2</sup>

(1. China Energy Investment Group Co., Ltd., Beijing 100011, China; 2. New Energy Technology Research Institute, CHN Energy, Beijing 102209, China; 3. Guodian Power Development Co., Ltd., Beijing 100101, China)

**Abstract:** The goal of "carbon peak and carbon neutral" points out the direction and path for the low-carbon transformation and scientific and technological innovation in China's power generation field. Under the background of the innovative development of the global energy and power industry, the development of power generation towards low-carbon, clean, intelligent, electrification, marketization and internationalization will become an inevitable trend. The current situation, existing problems and future technological development path of low-carbon transformation scientific and technological innovation in the field of power generation in China were analyzed in the direction of clean and efficient coal power generation, renewable energy power generation, nuclear energy, advanced energy storage and hydrogen energy. In order to adapt to the new power system based on new energy, the traditional main power supply gradually changes to the basic power supply in China's coal-fired power units. However, most of the domestic units are designed according to the basic load, and the key indicators such as load regulation range and load change rate are far behind those of abroad. In addition, there are still the problems of low efficiency and high carbon emission of old units. In the future, it is necessary to strengthen the research on flexible and intelligent power generation, ultra-high parameter coal-fired power generation, new and efficient coal-fired power generation, and carbon capture, utilization and storage (CCUS) technologies. The hydropower technology in China has been improved in an all-round way and formed the integration capacity of whole industrial chain. However, it also needs to make efforts in high head, large capacity and ultra-low head generator units, safe and efficient operation and smart power stations. The wind power technology in China has made comprehensive research, deployment and breakthroughs in wind turbine design and manufacturing, wind farm development and operation and maintenance, equipment testing and certification, and standard system construction, and it also needs to tackle the key problems in the direction of large-scale, lightweight and low-cost wind power generation, promote the application of next-generation information and communication technology, and improve the localization rate of key components. The photovoltaic power generation technology in China is basically synchronized with the world. High efficiency and low cost are its main technical direction. The solar thermal power generation technology in China lags behind foreign countries with respect to systematic design and integrated operation, and it is necessary to develop solar thermal power generation technology with large capacity, high parameters, long-time heat storage and low cost. The geothermal power generation and marine power generation technologies in China are in the stage of basic research or technology research and verification, technical research and engineering demonstration still need to be strengthened in the future. In terms of nuclear filed, China already has a complete nuclear fuel cycle and nuclear industry system, and nuclear power technology is in the forefront of the world, however, problems still exist in basic technology, process, materials, software and other aspects. It is also necessary to strengthen the research in advanced nuclear energy systems and comprehensive utilization of nuclear energy, adhere to the technical route of closed nuclear fuel cycle, and continuously improve the safety of nuclear energy utilization. In terms of energy storage technology, At present, China's energy storage filed is moving towards large-scale development, but there is still a gap between the energy storage industry and the overall healthy development, and the energy storage technology still needs to be developed in the direction of safety, long life, low cost and large-scale. In terms of hydrogen energy technology, China has formed a complete industrial chain, but hydrogen mainly comes from gray hydrogen. In the future, the development of electrolytic water to produce green hydrogen technology supported by large-scale photovoltaic power generation or wind power generation will become the focus.

**Key words:** carbon peak; carbon neutralization; power generation; low carbon transformation; renewable energy; nuclear energy; energy storage; hydrogen energy

## 0 引言

当前,世界能源发展呈化石能源清洁化、清洁能源规模化、多种能源综合化的发展趋势。根据 BP《世界能源展望 2020》<sup>[1]</sup> 预测,2050 年全球化石能源消费占比将降至 20%,非水可再生能源占比上升至 60%,电力在终端能源消费中占比增至 50% 以上。

在世界能源电力发展的宏观形势下,包括我国在内的主要国家、地区的能源电力战略均在调整。美国能源转型方向以“能源独立”为前提,推动能源系统清洁化<sup>[2]</sup>,拜登政府上台后重返《巴黎协定》,推进实施《清洁能源革命和环境正义计划》,计划到 2035 年电力部门实现碳中和,2050 年前达到“净零排放”;欧洲倡导大力发展低碳经济,提出 2050 年实现碳中和的目标,先后有 15 个国家宣布退煤计划,预计到 2050 年,太阳能发电及风电将占欧盟终端能源需求的 50%<sup>[3-4]</sup>;日本公布了绿色成长战略,提出 2050 年实现碳中和,其中 50%~60% 发电量预计来自可再生能源<sup>[5]</sup>。2020 年 9 月 22 日,国家主席习近平在第 75 届联合国大会讲话中提出了“我国 CO<sub>2</sub> 排放力争在 2030 年前达到峰值,努力争取 2060 年前实现碳中和”的双碳目标<sup>[6]</sup>,为我国电力行业的发展指明了方向。

当前,我国电力行业已建成全球最大的清洁高效煤电供应体系,技术水平全球领先,为经济社会快速发展提供了安全环保经济可靠的电力,然而煤电占据主导地位、环境污染碳排放高、用电效率较低、新能源技术创新能力不足等仍是发电领域存在的突出问题。目前发电领域的绿色低碳科技创新显然无法支撑以新能源为主体的新型电力系统构建和“双碳”目标的实现,亟需加强发电领域绿色低碳转型技术布局和攻关,以实现发电领域的清洁低碳、安全高效。

笔者梳理了我国发电领域煤炭清洁高效发电、可再生能源发电、核能、先进储能、氢能等方向的绿色低碳转型现状和存在的问题,分析了各方向绿色低碳技术的未来发展趋势和低碳转型路径。

## 1 煤炭清洁高效发电

近年来我国在清洁高效燃煤发电技术方面取得了巨大进步,在“碳达峰、碳中和”背景下,未来需要在灵活智能发电、超高参数超超临界燃煤发电、新型高效燃煤发电系统、CCUS 方面进行低碳技术的重点布局<sup>[7]</sup>。

在灵活发电方面,国外起步更早,应用也更加成熟,而我国大部分燃煤机组按照基本负荷设计,最小技术出力与变负荷速率均与国外存在一定差距,且现有机组低负荷工况安全性、经济性和环保性差,未来还需开发锅炉与汽轮机快速响应、锅炉承压部件寿命监测、锅炉辅助设备灵活性改造等技术,实现变负荷速率达 5%/min,负荷变化在 20%~100%;在智能发电方面,我国智能发电起步较晚,尚处于起步阶段,虽具备进一步提升智能化应用水平的基础,但与美国等发达国家相比,在工业芯片性能与接口、智能传感、服务器性能、工业互联网、大数据平台等领域还有一定差距,未来还需开发具备“自诊断、自感知、自决策、自执行”特征显著的智能发电技术及控制系统,实现燃煤电厂无人值守;在煤与生物质耦合发电方面,国外在燃煤耦合生物质发电领域已实现 5%~100% 的生物质掺烧比例,我国生物质掺烧比例较低,普遍在 5% 左右,原因在于我国大规模燃煤与可再生能源耦合发电技术尚不成熟,同时燃料市场政策不健全,缺乏激励措施、技术认证与检测标准等,产业化规模与国外先进水平相比仍有一定差距,未来还需要开发大比例生物质掺烧技术及设备,推动循环流化床协同处理生物质与固废等物料技术示范,助力实现减排降耗目标<sup>[8]</sup>;在煤与太阳能耦合发电方面,国外早在 20 世纪 70 年代便提出了将太阳能热引入燃煤发电机组的多能互补发电构想,随后在光煤互补系统的设计集成方式、系统性能评价、运行控制模式、经济性分析等方面开展了大量研究,并建成多个工程示范项目,我国仍处于中试验证阶段,与国外差距较大,未来需要开发系统耦合方式、运行控制策略、耦合评价方法等,推动技术工程示范。

在超高参数超超临界燃煤发电方面,我国研究主要集中在高参数超超临界技术(A-USC)和超临界循环流化床技术(USC-CFB)2 个方向。在 A-USC 技术方面,2015 年东方电气设计的 1 050 MW 超超临界机组投运,实现了该技术的巨大突破,机组主蒸气温度达到 605 ℃、再热蒸气温度达到 623 ℃、主蒸气压力达到 29.4 MPa,但 A-USC 技术的进步仍受制于高温材料的研发,目前正处于试验研发阶段,与欧、美、日基本处于并跑阶段,工业应用尚不成熟<sup>[9]</sup>,未来还需要加大高温部件的产业化和工程化应用关键技术攻关,建设具有自主知识产权的 650~700 ℃ 等级超超临界燃煤发电机组,实现机组净效率不低于 50%。在 USC-CFB 技术方面,我国 2013 年在国家能源集团四川白马电厂投产运行了超临界

600 MW 循环流化床机组,标志着我国在该项技术领域处于国际先进水平,近年来正开展超超临界循环流化床锅炉研发攻关,相关设备、系统安全性等问题也在研究中,机组参数主蒸气温度、再热蒸气温度、主蒸气压力分别达到 605、603 °C 和 26.25 MPa,目前贵州威赫和陕西彬长正在建设 2 台超超临界 660 MW 循环流化床机组,将作为 USC-CFB 低碳发电示范项目之一<sup>[10]</sup>。

在新型高效燃煤发电系统方面,国内超临界 CO<sub>2</sub>(sCO<sub>2</sub>) 发电技术整体研究水平与国外同步,部分成果达到国际领先水平,开展了大量传热流动机理研究工作,建成了世界上容量最大、参数最高的 5 MWe sCO<sub>2</sub> 燃煤发电试验系统,但在换热器和压缩机设计、制造方面起步较晚、研发基础薄弱,与国外存在一定差距,未来需通过技术研发实现机组负荷变化速率 6%/min 以上,负荷变化在 0~100%,并实现多种形式应用。整体煤气化联合循环(IGCC)发电技术方面,国内正处于工程示范阶段,华能天津 IGCC 示范项目是我国首座 IGCC 示范项目,电站规模与运行可靠性基本与世界同步,目前 IGCC 发电技术前期投资成本仍较高,国内外正针对煤气化、空气分离、燃气轮机、系统集成和净化技术开展技术攻关<sup>[10]</sup>。整体煤气化燃料电池(IGFC)发电技术方面,国内在燃料电池关键材料、部件性能及装配技术方面取得了显著进步,2020 年 10 月国家能源集团北京低碳清洁能源研究院独立研发了国内首套 20 kW 固体燃料电池发电系统,并在宁夏煤业试验基地试验成功,但我国总体还处于基础研究和关键技术研发阶段,与国外相比仍有较大差距。未来 IGCC 和 IGFC 发电技术还需在提升效率、降低能耗方面加大技术攻关,实现系统净效率不低于 50%。

CCUS 方面,我国具备一定的研发基础,已投运或建设中的 CCUS 示范项目共 49 个<sup>[11]</sup>,但当前 CCUS 项目多以石油、煤化工、电力行业小规模

集和驱油封存示范为主。CO<sub>2</sub> 捕集方面,2021 年 6 月,国能锦界电厂建成并投运了国内最大的 15 万 t/a 碳捕集—驱油—化工利用全流程示范工程<sup>[12]</sup>,应用了新型复合胺吸收剂、增强型塑料填料、降膜汽提式再沸器、超重力再生反应器、级间冷却、分流解吸、机械式蒸汽再压缩(MVR)等新技术、新工艺和新设备,能耗达到世界先进水平;2022 年 1 月,中石化建成我国首个百万吨级 CCUS 项目(齐鲁石化-胜利油田 CCUS 项目)。CO<sub>2</sub> 利用和封存方面,2020 年 8 月,浙江大学联合河南强耐新材股份有限公司研发的 CO<sub>2</sub> 深度矿化养护制建材技术建成全球首个万吨级矿化利用工业示范线,并通过 72 h 运行;2020 年 10 月,中国科学院大连化学物理研究所负责的“液态阳光”项目建成了全球首个千吨级液态太阳燃料合成示范工程,并通过 72 h 运行;2011 年国家能源集团在鄂尔多斯建成世界首个 10 万 t/a 煤制油高浓度 CO<sub>2</sub> 陆相咸水层封存的 CCS 示范工程,形成了全流程 CCS 成套技术和系统的监测评价体系<sup>[13]</sup>。当前我国 CCUS 各环节技术发展还不平衡,仍存在碳捕集成本高、能耗高、吸收剂腐蚀逃逸等问题;CO<sub>2</sub> 矿化利用正处于工业示范阶段,后期需提高技术经济性和 CO<sub>2</sub> 吸收转化率,开发多种工业固废矿化利用技术路线<sup>[14-15]</sup>;CO<sub>2</sub> 化工利用和生物利用还处于小试研发阶段,且需要拓展 CO<sub>2</sub> 消纳途径,实现 CO<sub>2</sub> 作为资源的循环利用;CO<sub>2</sub> 封存技术还需加大驱油、封存、监测及运输等系列安全可靠配套技术,掌握陆上/海上咸水层、枯竭油气田封存 CO<sub>2</sub> 关键技术<sup>[16-17]</sup>。

总体来说,我国煤电机组目前仍面临灵活性和智能化较差、难以满足可再生能源的大规模消纳,且旧机组效率低、碳排放高等问题,同时为进一步提高发电机组效率,还面临新循环、新工质、新材料及工艺开发方面的挑战。未来还需找准方向,加大技术攻关。煤炭清洁高效发电领域的技术发展路线见表 1。

表 1 煤炭清洁高效发电领域技术发展路线

Table 1 Technical development roadmap in the field of clean and efficient coal power generation

项目	2020—2025 年	2026—2030 年	2031—2060 年
煤炭灵活智能发电	① 实现煤电机组深度调峰(纯凝机组 20%~100%)和快速变负荷(速率 5%/min);② 机组具备自适应和自调节能力,能够适配智能电网;③ 煤电耦合生物质发电技术大规模推广应用	① 完成灵活燃煤发电机组的工程验证,形成具备自诊断、自感知、自决策、自执行特征显著的智能发电系统;② 实现负荷变化速率 6%/min 以上,负荷变化在 0~100%;③ 在 300 MW 等级煤电机组上完成煤与光热耦合发电系统工业验证	① 完成灵活智能发电系统的大规模推广应用;② 煤与光热耦合发电技术规模化推广应用
煤炭高效清洁发电	① 实现 700 °C、sCO <sub>2</sub> 和 IGCC、IGFC 发电关键技术的突破;② 完成 CFB 机组低成本超低排放的工程验证	① 完成 700 °C、sCO <sub>2</sub> 和 IGCC、IGFC 发电系统的工程验证,供电效率不低于 50%;② CFB 机组低成本超低排放技术实现规模化推广应用	完成 700 °C、sCO <sub>2</sub> 和 IGCC、IGFC 发电系统的推广应用,供电效率不低于 60%

续表

项目	2020—2025年	2026—2030年	2031—2060年
CCUS	① 建成具有自主知识产权的百万吨级CCUS技术示范;② 研发CO <sub>2</sub> 化工利用、矿化利用、生物利用等途径;③ 做好CO <sub>2</sub> 驱油、封存、监测技术研发	① 具备CCUS全流程项目设计、建设和运营的产业化技术能力;② 形成与CO <sub>2</sub> 驱油协同的封存、监测及运输等系列安全可靠技术,掌握陆上/海上咸水层、枯竭油气田封存CO <sub>2</sub> 关键技术	CCUS全流程技术实现规模化推广应用,推进新型技术产业化和CCUS项目集群的产业化

## 2 可再生能源发电

水电领域,西方发达国家在20世纪80年代基本完成水能资源开发任务,水电开发程度总体较高,瑞士、法国、意大利水电开发程度已超过80%,德国、日本、美国水电开发程度也在67%以上,水力发电技术也较成熟。我国水电技术已实现了全产业链的全面提升,水电工程勘察设计和施工技术、大型水轮发电机组制造、远距离输电技术等处于世界领先水平,水电设备产业形成了设计、制造、安装、运行维护等全产业链整合能力,在水轮机、水轮发电机设计和制造方面整体达到国际先进水平,部分机型达到国际领先水平,但对于冲击式水轮机技术,国内还缺

乏经验,在设计、流动机理、结构、材料、控制等方面与国外技术相比还有较大差距。未来水电开发需减轻对社会及生态环境的影响。在常规水电技术方面,需加大在高水头大容量冲击式机组和超低水头水力发电技术的技术攻关;水电站安全运行技术方面,还需开展长江上中游特大水利枢纽调控与安全运行技术、高坝通航建筑物运行维护和安全监测技术、水库地震关键技术研究等;智能水电技术与设备方面,需开发信息共享技术、设备数字化技术、智能一体化平台、数据应用智能化技术等,实现水电领域清洁高效发展;另外,还需突破针对微小水电、鱼类友好型水电系统的设计制造和运行相关技术。水电领域的技术发展路线见表2。

表2 水电领域技术发展路线

Table 2 Technical development roadmap of hydropower field

时间	主要技术
2020—2025年	① 突破600 m级大容量混流式水轮组技术及筒型阀,额定水头750~1 000 m大容量高水头冲击式机组和大容量变速抽水蓄能机组技术;② 高寒高海拔地区超高坝建设、深埋长隧洞安全建设等关键技术示范工程逐步推广;③ 加强研发流域地质灾害监测预警与防灾减灾技术,开展工程技术验证
2026—2030年	① 高水头大容量冲击式机组实现工程示范;② 研究低水头、大流量中小水电设备制造关键技术;③ 围绕微小水电的稳定与长期运行技术以及机组自动控制技术进行研究,达到国际领先水平;④ 突破生态友好型小水电设计、鱼类友好型水轮机设计等技术
2031—2060年	① 掌握水电站智能设计、智能制造、智能发电和智能流域综合技术,进行新技术的推广应用及产业化;② 环境友好型水能利用技术、大坝维护技术得到应用

风电领域,我国风能技术从陆上到海上、集中式到分布式,关键部件到整机设计制造,风电场开发运维,标准、检测和认证体系等方面进行了全面研究部署和突破,建立了大功率机组及部件全产业链设计制造技术体系,在低风速及复杂地形下风电机组开发方面优于国外水平,但在基础和共性关键技术方面与国外存在差距,主要体现在以下5方面:① 风电场的规划需更具科学性,如何在低风速区域实现风能利用是未来研究的关键方向;② 风电机组核心部件要逐步实现国产化,加强自动控制、新材料、模型设计等方面的科研力度投入;③ 提升单机容量,推进配套技术如结构力学仿真、工艺制造等研发,降

低运维成本;④ 更新风电并网技术,目前我国风电并网代表性技术为串补技术,处于世界前列,但仍需解决同步谐振及其他电力传输问题<sup>[18-20]</sup>;⑤ 废弃风电机组回收再利用技术尚不成熟。未来需要推广风电大规模高比例先进并网技术,推动风机机组大型化技术、漂浮式海上风电技术、超导风力和高空风力发电技术、废弃风电机组材料的无害化处理与循环利用技术等研发,以及人工智能、云计算、大数据等新一代信息技术在风电领域的应用,并提高风机关键部件的国产化率,开发拥有自主知识产权的风电核心设计软件<sup>[21]</sup>。风电领域的技术发展路线见表3。

表3 风电领域技术发展路线

Table 3 Technical development roadmap of wind power field

时间	主要技术
2020—2025年	① 掌握自主知识产权的15~20 MW级超大型海上风电叶片主轴承、发电机、系统集成工艺的研发和制造技术;② 掌握复杂条件下的风资源特性与风电场优化布局技术,以及漂浮式海上风电设计制造关键技术;③ 掌握废弃风电机组材料的无害化处理与循环利用技术,支撑风电可持续发展;④ 突破经济性高的大规模远海风电直流送出技术
2026—2030年	① 漂浮式海上风电技术实现工程示范;② 掌握风电场集群的多效利用、风电场群发电功率优化调度运行控制技术;③ 废弃风电机组材料的无害化处理与循环利用技术验证和装备研制;④ 高空风电技术逐步实现商业化
2031—2060年	① 突破30 MW级超大型风电机组关键技术,掌握不同海域规模化风电开发成套技术与装备,形成完整的风能利用自主创新体系和产业体系;② 海上风电形成初具规模化;③ 废弃风电机组材料的无害化处理与循环利用技术实现规模化工业推广应用;④ 浮动混合能源平台模块化技术得到突破,开始商业化推广

太阳能发电领域,我国光伏发电产业规模和制造能力处于世界先进水平,光伏电池及组件、逆变器等产品技术水平与世界同步,晶体硅电池的产业化技术保持国际先进水平,薄膜太阳能电池技术保持全球领先,具有成本低廉、无环境污染等特点的无铅酸电池广泛应用于我国光伏发电领域,可用于大规模无人太阳能光伏电站,同时逆变器的先进非线性控制技术如模糊控制、复合控制等技术也已得到广泛应用,这对于提升光伏电站的稳定性和可靠性具有重大意义<sup>[22-24]</sup>,未来还需开发高效率低成本,与

互联网、大数据、人工智能等深度融合的光伏产业,推广先进的大规模高比例光伏并网技术,探索和示范光伏与其他领域的多元化协同应用。在光热发电方面,采用的技术路线主要为槽式、塔式和线性菲涅尔式,我国经过10余年技术研发已掌握了光热发电的核心技术,研发了系列具有自主知识产权的专用设备,商业化应用也较成熟,但在电站系统设计、集成运行等方面与国外差距明显,未来还需开展大容量、高参数、长时间储热、低成本的光热发电技术攻关和示范应用。太阳能发电领域的技术发展路线见表4。

表4 太阳能发电领域技术发展路线

Table 4 Technical development roadmap in the field of solar power generation

时间	主要技术
2020—2025年	① 掌握智能光伏电站设计和建造成套技术,实现发电效率 $\geq 80\%$ ;② 突破异质结(HIT)太阳能电池产业化关键技术,建成100 MW级HIT太阳能电池示范生产线;③ 掌握分布式太阳能热电联供系统的集成和控制技术;④ 掌握50 MW级塔式光热电站整体设计及关键部件制造技术;⑤ 突破光热-光伏-风电集成设计和控制技术,促进风光互补利用技术产业化
2026—2030年	① HIT电池国产化率 $\geq 85\%$ 并达到批产化水平;成本降低70%左右;② 掌握高参数太阳能热发电技术,全面推动产业化应用;③ 突破太阳能热化学反应器技术,研制出连续性工作样机;④ 建成50 MW太阳能热电联供系统,形成自主知识产权和标准体系
2031—2060年	① 开发新型高性能光伏电池,大幅提升光电转换效率并降低成本,至少一种电池光电转换效率达到世界最高;② 实现光电转化和储能一体化,达到规模化应用

地热发电方面,分为水热型和干热岩型。其中,水热型地热发电资源丰富,我国目前已有地热蒸气扩容发电技术、有机工质朗肯循环地热发电技术和地热全流发电技术3种方式的工程应用,西藏的羊八井电站已稳定运行26.18 MW蒸气扩容发电和全流发电机组超过30 a;2020年在山西大同发现了160℃地热田,并于2021年投产建成300和280 kW两台双工质地热发电机组<sup>[25]</sup>,未来地热发电还需加

大关键技术攻关和体系建设,实现地热蒸汽轮机发电机组关键技术和设备自主化,建设规模化利用水热型地热示范工程。干热岩型地热发电方面,目前技术研发仍停留在实验室阶段,未来还需攻克资源靶区定位、超高温钻井及测井等技术以及干热岩储层激发技术、地热高效梯级综合利用技术等<sup>[26-27]</sup>,实现地热能的综合梯级利用。地热发电领域的技术发展路线见表5。

表5 地热发电领域技术发展路线

Table 5 Technical development roadmap of geothermal power generation

时间	主要技术
2020—2025年	① 掌握干热岩开发关键技术,建成100 kW级干热岩发电示范;② 建成兆瓦级地热综合梯级利用示范;③ 突破干热岩开发设备设计及制造关键技术,实现浅层地热规模化开发利用;④ 推进地热能联合发电技术发展
2026—2030年	① 实现干热岩开发利用设计与制造技术的协同发展,完善干热岩开发利用工艺,提升装备自主研发率,建成兆瓦级干热岩发电示范工程;② 建设规模化利用水热型地热示范工程,形成完善的设计规范和技术标准;③ 推进中低温地热能发电技术研发示范
2031—2060年	形成完善的地热能利用技术标准体系,实现干热岩发电工程推广、中低温地热能发电技术应用、水热型地热应用

海洋能发电方面,目前我国研究水平与国外相当,处于并跑阶段,部分技术世界领先,但工程示范规模总体偏小、技术成熟度也不高。浙江大学在浙江舟山建立了60 kW微网潮流能发电试验机组,并实现了120 kW机组并网投运,是目前国内实际发电时间最长、发电量最大的机组,有望在东海海域推广应用;中国科学院广州能源研究所在珠海市

万山海域投产建成100 kW波浪能发电机组,并成功发电15 000 kWh,可用于南海等海域推广应用<sup>[28]</sup>。未来还需完善潮流能、波浪能装置设计体系,突破关键基础元器件和功能部件设计制造技术,推动波浪能、潮流能技术产业化,建立完整的海洋能产业链。

海洋能发电领域的技术发展路线见表6。

表6 海洋能发电领域技术发展路线

Table 6 Technical development roadmap in the field of ocean energy power generation

时间	主要技术
2020—2025年	① 完善潮流能、波浪能装置设计体系,开发高效率的潮流能装置翼型与叶轮;提高温(盐)差能发电效率,研发温(盐)差能发电实型装置;② 在南海建立波浪能、温差能示范电站,实现波浪能、温差能利用技术在南海的初步应用
2026—2030年	① 突破关键基础元器件和功能部件设计制造技术,实现海洋能装置设计制造技术协同发展;② 突破波浪能高效捕获与能量转换技术,实现潮流能电场运行标准化,完善温(盐)差能海况样机开发;③ 建设中型规模潮汐能发电站,探索大型电站建设流程;波浪能、潮流能发电技术向大规模装机试验阶段转变,小型电站商业化试运行
2031—2060年	① 建立兆瓦级波浪能、潮流能发电装置群;② 实现潮流能、波浪能发电技术在近海海域的产业化;③ 建立完整的海洋能产业链,实现海洋能发电技术的全面应用

### 3 核 能

国外如美国西屋公司 AP1000 技术、俄罗斯国家原子能公司 AES-2006 和 VVER1200 技术、法国阿海珐公司的 EPR 技术、韩国原子能公司的 APR1400 技术等在全球核电领域占据领先地位。我国是世界上少数几个拥有完整核燃料循环和核工业体系的国家之一,目前第3代压水堆技术已居世界第一阵营,自主研发的“华龙一号”于2020年10月示范运行达到临界状态,正式开始带功率运行,“国和一号”于2020年9月正式开建;在核电工程技术应用方面,我国也位居世界前列,三门核电厂2018年9月建成全球首台商业运营的 AP1000 机组,田湾核电厂引进俄罗斯 VVER-1200 技术的7号机组已于2021年9月开始建设;在第4代反应堆

研发方面,我国同样走在世界前列,我国加入的“第4代核能系统国际论坛(GIF)”提出的6种技术路线目前正处于示范工程验证和研发阶段;但在当今备受关注的新型模块化核反应堆(SMR)方面,我国处于起步阶段,部署中的小堆型号有中核“玲珑一号”(ACP100)、中广核 ACPR50S 和“燕龙”池式低温供热堆技术等,而美国、俄罗斯等国正加快推进其研发设计,最早有望在2023年建成投产<sup>[29]</sup>。总体来讲,我国在核能基础技术、工艺、材料、软件等方面卡脖子问题仍然存在,部分核心技术受制于人。未来还需开展先进核能系统技术的研发,突破超高温气冷堆技术以及核能制氢、绿色冶金技术;坚持走闭式核燃料循环技术路线,实现核能可持续发展;另外,通过技术攻关,持续改进核能利用的安全性<sup>[30]</sup>。核能领域的技术发展路线见表7。

表7 核能领域技术发展路线

Table 7 Technical development roadmap in the field of nuclear energy field

时间	主要技术
2020—2025年	① 自主第3代核电形成型谱化产品,带动核电产业链发展;② 模块化小型压水堆示范工程开工;③ 第4代核电技术进入积极研发阶段;④ 依托先进前沿技术的快速发展,加快核能数字化智能化发展速度;⑤ 核能产业链供应链更加均衡、全面发展,自主品牌CF3燃料组件批量化应用,突破CF4、STEP、SAF系列燃料组件关键技术
2026—2030年	① 以耐事故燃料为代表的核安全技术取得突破,全面实现消除大规模放射性释放,提升核电竞争力;② 实现压水堆闭式燃料循环和核电产业链协调发展;③ 钠冷快堆等部分第4代反应堆成熟,突破核燃料增殖与高水平放射性废物嬗变关键技术;④ 积极探索模块化小堆(含小型压水堆、高温气冷堆、铅冷快堆)多用途利用;⑤ 建设、运行聚变工程试验堆,开展稳态、高效、安全聚变堆科学研究
2031—2060年	① 实现快堆闭式燃料循环,压水堆与快堆匹配发展;② 全面掌握国际先进的核聚变关键技术和建堆工程技术,力争建成核聚变示范工程;③ 发展聚变电站,探索聚变商用电站工程的安全性、经济性

## 4 先进储能

全球已投运储能项目中,抽水蓄能累计装机占比最大,其次为电化学储能;在各类电化学储能中,锂离子电池的累计装机规模最大。目前投入商业化运行的规模储能技术主要有抽水蓄能、锂离子电池、铅酸电池、钠硫电池技术,液流电池、压缩空气和飞轮储能处于小规模示范阶段。抽水蓄能的发展受制于地理环境,无法满足多种应用场景需求。铅酸电池性价比不高,无法代表先进的储能技术,锂离子电池安全事故频发,钠硫电池全球范围内只有日本NGK生产,缺少产业链和规模化效应,且同样存在安全性问题。当前我国储能正在向规模化发展方向迈进,但储能产业距离整体健康发展仍有

距离。抽水蓄能仍具有规模优势,但进展缓慢,近年来发展起来的地下抽水蓄能可以有效利用矿井等洞穴,改造成地下水库,但碍于成本高昂目前仍未实现规模化应用<sup>[31]</sup>。电化学储能技术占比不断提高,其中锂离子电池占据市场主导,超级电容正处于技术研发阶段,提高其能量密度和降低材料成本将是研发重点方向,低温室温钠硫电池的理论能量密度很高,成本也较低廉,该技术也是目前研究的热点。未来需要针对现有储能技术在安全性、适应性、规模化以及成本等方面存在的问题,加大不同时长储能技术(短时高频储能技术、中长时间尺度储能技术和超长时间尺度储能技术)的科技攻关和工程应用。

储能领域的技术发展路线见表8。

表8 先进储能领域技术发展路线

Table 8 Technical development roadmap of advanced energy storage field

时间	主要技术
2020—2025年	① 突破高温储热的材料筛选与装置设计技术、压缩空气储能的核心部件设计制造技术,突破化学储电的各种新材料制备、储能系统集成和能量管理等核心关键技术;② 示范推广10 MW/100 MWh超临界压缩空气储能系统、1 MW/1 000 MJ飞轮储能阵列机组、100 MW级全钒液流电池储能系统、10 MW级钠硫电池和炭铅电池储能系统、100 MW级锂离子电池储能系统等一批趋于成熟的储能技术;③ 实现兆瓦级飞轮系统在调频辅助服务等领域的示范;④ 完善液流电池工艺技术和基于大规模应用的液流电池管理技术
2026—2030年	① 全面掌握战略方向重点布局的先进储能技术,实现不同规模的示范验证,同时形成相对完整的储能技术标准体系,建立比较完善的储能技术产业链,实现绝大部分储能技术在其适用领域的全面推广,整体技术赶超国际先进水平;② 10 MW/100 MWh超临界压缩空气储能系统的产业应用,开展兆瓦级飞轮储能系统的商业化应用;③ 研究10 MW级超级电容器储能装置系统集成关键技术,突破大容量超级电容器应用于电力系统稳定控制和电能质量改善等的设计与集成技术、突破2.5 MW/5 MJ以上高温超导储能磁体设计技术
2031—2060年	① 积极探索新材料、新方法,实现具有优势的先进储能技术储备,并在高储能密度、低保温成本的热化学储热技术,新概念电化学储能技术(液体电池、镁基电池等),基于超导磁和电化学的多功能全新混合储能技术等实现重大突破,全面掌握材料、装置与系统等各环节的核心技术;② 推进兆瓦级超级电容的示范,向商业化应用发展,开发大型高温超导储能装置及挂网示范运行、商业化;③ 全面建成储能技术体系,整体达到国际领先水平,引领国际储能技术与产业发展



## 5 氢能

氢能广泛应用于电力、钢铁、有色金属、煤化工、石油化工等领域,是重要的原料和燃料。氢能方面,我国制氢规模位居世界首位,已形成氢能“制—储—运—加—用”完整产业链,但产业布局趋同、技术成本高、应用场景单一,制约了产业健康发展,氢能技术与国际先进水平也有差距。我国90%以上氢气来自于煤制氢,属于灰氢,制氢过程会造成大量碳排放,采用可再生能源绿色电力制氢是支撑我国可再生能源和氢燃料电池产业协同健康发展的关

键,近年来我国在新一代质子交换膜(PEM)水电解制氢技术的研发水平不断提升,但在产能规模、设备制造与控制水平上与国外相比仍有差距,尤其是电解槽装置制造所需的质子交换膜仍依赖进口;运氢和储氢配套核心材料部件也依赖进口,温和条件液化规模化规模储备、高密度存储、长距离大规模运输、低成本快速加注等关键技术仍需突破;氢能利用方面如燃料电池技术大多还处于技术验证阶段<sup>[32-33]</sup>。未来,应以发展绿氢为方向,加强应用场景和高效低成本技术的融合创新。

氢能领域的技术发展路线见表9。

表9 氢能领域技术发展路线

Table 9 Technical development roadmap of hydrogen energy field

时间	主要技术
2020—2025年	① 以发展绿氢为方向,拓展氢能应用场景和促进高效低成本技术融合创新;② 推进水电解制氢技术研发示范以及煤制氢气+CCS、工业副产氢关键技术和装备升级创新;③ 可再生能源水电解制氢技术试点运营、高压气氢储运技术为主、液氢储运技术试点推广
2026—2030年	① 可再生能源水电解制氢技术半集中化制氢为主;提升工业副产氢利用效率;② 液氢运输作为“主动脉”,高压气态储运作为“毛细血管”;③ 加氢站及其他基础设施多元化、网络化发展
2031—2060年	① 可再生能源水电解制氢集中化制氢为主,工业副产氢、化石能源制氢+CCUS技术为辅;② 液氢储运+高压气态储运+管道储运等技术多元化协同发展

## 6 技术发展潜力分析

我国“富煤贫油少气”的资源禀赋决定了煤炭在未来一段时间内仍将占据我国能源结构的主体地位。在我国能源安全新战略及“双碳”目标背景下,从实际国情出发,仍需大力推进煤炭清洁高效利用,发挥煤炭的兜底保障作用。2030年前,我国能源消费总量及碳排放达峰,煤炭处于消费峰值平台期,支撑非化石能源提供能源消费增量;2031—2060年,我国能源结构快速转型,煤炭消费逐年降低,非化石能源逐步成为主体能源,碳排放快速下降。

在我国能源绿色低碳转型的趋势下,煤电发挥其在电力系统的支撑性和调节性作用的同时与清洁能源相互融合、共同发展,以支撑新能源为主体的新型电力系统发展,保障我国能源电力安全。全球能源互联网发展合作组织对我国能源转型及近中长期电力发展进行研究,预测并分析了各技术的发展潜力(未来装机容量)<sup>[34]</sup>,具体见表10。可知近期和中期,煤电仍是保障我国电力供需总体平衡的主力电源,2025年和2030年分别占装机总容量的37.3%和27.6%,2030年前新增电力需求由清洁能源提供;远期煤电装机快速下降,清洁能源电力加速发展,形成多元清洁能源的电力供应体系。

表10 2025—2060年我国电源装机构成<sup>[34]</sup>

Table 10 China's installed power generation capacity from 2025 to 2060<sup>[34]</sup>

项目	我国电源装机构成/亿kW			
	2025年	2030年	2050年	2060年
煤电	11.00	10.50	3.00	0
气电	1.52	1.85	3.30	3.20
水电	4.60	5.54	7.40	7.60
风电	5.36	8.00	22.00	25.00
太阳能发电	5.59	10.25	34.50	38.00
核电	0.72	1.08	2.00	2.50
燃氢机组	0	0	1.00	1.80
其他	0.65	0.82	1.70	2.00
储能	0.40	1.30	6.00	7.50

## 7 结语

实现“碳达峰、碳中和”目标,科技创新是关键。虽然近年来发电领域的科技创新水平得到实质性提升,一些关键技术快速发展,但不足以支撑我国如期实现碳中和目标,各发电领域现有技术供给不足,在基础技术、工艺、材料、软件等方面仍存在“卡脖子”问题,部分核心技术受制于人。在构建“清洁低碳、安全高效”能源体系和“碳达峰、碳中和”目标的要

求下,发电领域还需深入实施创新驱动发展战略,针对发电领域当前的低碳转型科技创新现状和存在的问题,按照“低碳技术为基础、零碳技术为重点、负碳技术为保障”的原则部署各发电领域,支撑“碳达峰、碳中和”目标的科技创新路径,瞄准世界先进水平,加大低碳转型技术的科技攻关,加快产业结构绿色低碳转型,全面推进能源绿色低碳发展和生产方式的革命性变化,加快形成节约资源和保护环境的产业结构、生产方式,为构建以新能源为主的新型电力系统和全社会实现“碳达峰、碳中和”目标发挥引领示范作用。

## 参考文献 (References):

- [1] BP. World energy outlook (2020 edition) [R]. London:BP,2020.
- [2] House Select Committee on the Climate Crisis. Solving the climate crisis [EB/OL]. (2020-06-29) [2022-03-21]. <https://climatecrisis.house.gov/sites/climatecrisis.house.gov/files/Climate%20Crisis%20Action%20Plan.pdf>.
- [3] European Commission. A European Green Deal; Striving to be the first climate-neutral continent [EB/OL]. (2019-09-20) [2022-03-15]. [https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal\\_en](https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en).
- [4] 董利苹,曾静静,曲建升,等. 欧盟碳中和政策体系评述及启示 [J]. 中国科学院,2021,36(12):1463-1470.  
DONG Liping, ZENG Jingjing, QU Jiansheng, et al. Review and enlightenment of EU carbon neutrality policy system [J]. Chinese Academy of Sciences,2021,36(12):1463-1470.
- [5] 刘平,刘亮. 日本迈向碳中和的产业绿色发展战略:基于对《2050年实现碳中和的绿色成长战略》的考察 [J]. 现代日本经济,2021,40(4):14-27.  
LIU Ping, LIU Liang. Japan's industrial green development strategy towards carbon neutrality: Based on the investigation of "green growth strategy for carbon neutrality in 2050" [J]. Modern Japanese economy,2021,40(4):14-27.
- [6] 新华网. 习近平在第七十五届联合国大会一般性辩论上的讲话(全文) [EB/OL]. (2020-09-22) [2022-03-15]. [http://www.xinhuanet.com/politics/leaders/2020-09/22/c\\_1126527652.htm](http://www.xinhuanet.com/politics/leaders/2020-09/22/c_1126527652.htm).
- [7] 袁家海,田梦媛,王杨.“30·60”双碳目标下“十四五”煤电发展目标与政策建议 [J]. 世界环境,2021(4):29-32.  
YUAN Jiahai, TIAN Mengyuan, WANG Yang. Coal power development goals and policy suggestions in the 14th five year plan under the "30·60" double carbon goal [J]. World Environment,2021(4):29-32.
- [8] 张世鑫,史磊,许燕飞,等. 煤和生物质,固废直燃耦合发电技术应用 [J]. 电站系统工程,2021,37(4):74-83.  
ZHANG Shixin, SHI Lei, XU Yanfei, et al. Application of coal, biomass and solid waste direct combustion coupled power generation technology [J]. Power Station System Engineering,2021,37(4):74-83.
- [9] 何维,朱骅,刘宇钢,等. 超超临界发电技术展望 [J]. 能源与环保,2019,41(6):77-81.  
HE Wei, ZHU Hua, LIU Yugang, et al. Prospect of ultra supercritical power generation technology China [J]. Energy and Environmental Protection,2019,41(6):77-81.
- [10] 王峰江,刘鹏,李荣春,等.“双碳”目标下先进发电技术研究进展及展望 [J]. 热力发电,2022,51(1):52-59.  
WANG Xiaojiang, LIU Peng, LI Rongchun, et al. Research progress and prospect of advanced power generation technology under the goal of "double carbon" [J]. Thermal Power Generation,2022,51(1):52-59.
- [11] 张贤,李阳,马乔,等. 我国碳捕集利用与封存技术发展研究 [J]. 中国工程科学,2021,23(6):70-80.  
ZHANG Xian, LI Yang, MA Qiao, et al. Research on the development of carbon capture, utilization and storage technology in China [J]. Strategic Study of CAE,2021,23(6):70-80.
- [12] ZHAO Rui, ZHANG Yi, ZHANG Shuai, et al. The full chain demonstration project in China: Status of the CCS development in coal-fired power generation in Guoneng Jinjie [J]. International Journal of Greenhouse Gas Control,2021,110:103432.
- [13] 王保登,赵兴雷,崔倩,等. 中国神华煤制油深部咸水层CO<sub>2</sub>地质封存示范项目监测技术分析 [J]. 环境工程,2018,36(2):33-36.  
WANG Baodeng, ZHAO Xinglei, CUI Qian, et al. Monitoring technology analysis of China Shenhua coal to liquid deep salt water layer CO<sub>2</sub> geological storage demonstration project [J]. Environmental Engineering,2018,36(2):33-36.
- [14] 郑旭帆,杜艺,苗恩东,等. 城市固体废物焚烧飞灰碳酸化研究进展 [J]. 洁净煤技术,2022,28(1):187-197.  
ZHENG Xufan, DU Yi, MIAO Endong, et al. Research progress on carbonation of municipal solid waste incineration fly ash [J]. Clean Coal Technology,2022,28(1):187-197.
- [15] 孙一夫,李凤军,何文,等. 二氧化碳矿化养护加气混凝土试验研究 [J]. 洁净煤技术,2021,27(2):237-245.  
SUN Yifu, LI Fengjun, HE Wen, et al. Investigation on CO<sub>2</sub> mineralization curing of aerated concretes [J]. Clean Coal Technology,2021,27(2):237-245.
- [16] 叶云云,廖海燕,王鹏,等. 我国燃煤发电CCS/CCUS技术发展方向及发展路线图研究 [J]. 中国工程科学,2018,20(3):80-89.  
YE Yunyun, LIAO Haiyan, WANG Peng, et al. Research on the development direction and roadmap of CCS/CCUS technology for coal-fired power generation in China [J]. Strategic Study of CAE,2018,20(3):80-89.
- [17] 骆仲泱,方梦祥,李明远,等. 二氧化碳捕集封存和利用技术 [M]. 北京:中国电力出版社,2012.
- [18] 祝贤,徐建源,张明理,等. 风力发电技术发展现状及关键问题 [J]. 华东电力,2009,37(2):314-316.  
ZHU He, XU Jianyuan, ZHANG Mingli, et al. Development status and key problems of wind power generation technology [J]. East China Electric Power,2009,37(2):314-316.
- [19] 徐冬青. 风力发电技术发展现状以及行业发展分析 [J]. 中小企业管理与科技,2017(12):44-45.  
XU Dongqing. Development status and industry development anal-

- ysis of wind power generation technology [J]. Management & Technology of SME, 2017(12):44-45.
- [20] 王艳春. 风力发电系统技术的发展综述[J]. 信息记录材料, 2017, 18(5):27-28.  
WANG Yanchun. Development of wind power system technology [J]. Information Recording Materials, 2017, 18(5):27-28.
- [21] 电力规划设计总院. 中国低碳化发电技术创新发展年度报告[M]. 北京: 人民日报出版社, 2021.
- [22] 张佳祺, 秦岭, 王亚芳, 等. 独立光伏逆变器研究进展[J]. 电源技术, 2016, 40(7):1532-1535.  
ZHANG Jiaqi, QIN Ling, WANG Yafang, et al. Research progress of independent photovoltaic inverter [J]. Chinese Journal of Power Sources, 2016, 40(7):1532-1535.
- [23] 贺敏岚, 李伟, 苏鑫, 等. 光伏发电技术的研究进展[J]. 化工新型材料, 2015, 43(3):4-5.  
HE Minlan, LI Wei, SU Xin, et al. Research progress of photovoltaic power generation technology [J]. New Chemical Materials, 2015, 43(3):4-5.
- [24] 方祖捷, 陈高庭, 叶青, 等. 太阳能发电技术的研究进展[J]. 中国激光, 2009, 36(1):5-14.  
FANG Zujie, CHEN Gaoting, YE Qing, et al. Research progress of solar power generation technology [J]. Chinese Journal of Lasers, 2009, 36(1):5-14.
- [25] 张加蓉, 高嵩, 朱桥, 等. “双碳”目标背景下我国地热发电现状及技术[J]. 电气技术与经济, 2021(6):40-44.  
ZHANG Jiarong, GAO Song, ZHU Qiao, et al. Current situation and technology of geothermal power generation in China under the background of "double carbon" goal [J]. Electrical Equipment and Economy, 2021(6):40-44.
- [26] 王贵玲, 刘彦广, 朱喜, 等. 中国地热资源现状及发展趋势[J]. 地学前缘, 2020, 27(1):1-9.  
WANG Guiling, LIU Yanguang, ZHU Xi, et al. Present situation and development trend of geothermal resources in China [J]. Earth Science Frontiers, 2020, 27(1):1-9.
- [27] 付亚荣, 李明磊, 王树义, 等. 干热岩勘探发现现状及前景[J]. 石油钻采工艺, 2018, 40(4):526-540.  
FU Yaron, LI Minglei, WANG Shuyi, et al. Present situation and prospect of exploration and development of dry hot rock [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2018, 40(4):526-540.
- [28] 刘星. 海洋能发电前景可期[J]. 电气技术, 2017(5):5.  
LIU Xing. The prospect of marine power generation is promising [J]. Electrical Engineering, 2017(5):5.
- [29] 张馨玉, 郭慧芳, 袁永龙. 全球小型模块化反应堆发展综述[C]//中国核科学技术进展报告(第七卷):中国核学会2021年学术年会论文集第8册(核情报分卷). 烟台:[s.n.], 2021:240-247.
- [30] 朱志权, 陈倩. 我国核电产业发展面临的机遇、风险及其对策[J]. 东华理工大学学报(社会科学版), 2017, 36(4):318-321.  
ZHU Zhiqian, CHEN Qian. Opportunities, risks and countermeasures for the development of China's nuclear power industry [J]. Journal of East China University of Technology (Social Science), 2017, 36(4):318-321.
- [31] 吴皓文, 王军, 龚迎莉, 等. 储能技术发展现状及应用前景分析[J]. 电力学报, 2021, 36(5):434-443.  
WU Hao wen, WANG Jun, GONG Yingli, et al. Current situation and application prospect of energy storage technology [J]. Journal of Electric Power, 2021, 36(5):434-443.
- [32] 姚若军, 高啸天. 氢能产业链及氢能发电利用技术现状及展望[J]. 南方能源建设, 2021, 8(4):9-15.  
YAO Ruojun, GAO Xiaotian. Current situation and prospect of hydrogen energy industry chain and hydrogen power generation utilization technology [J]. Southern Energy Construction, 2021, 8(4):9-15.
- [33] 徐硕, 余碧莹. 中国氢能技术发展现状与未来展望[J]. 北京理工大学学报(社会科学版), 2021, 23(6):1-12.  
XU Shuo, YU Biying. Development status and future prospect of hydrogen energy technology in China [J]. Journal of Beijing Institute of Technology (Social Sciences Edition), 2021, 23(6):1-12.
- [34] 全球能源互联网发展合作组织. 中国2030年能源电力发展规划研究及2060年展望[R]. 北京:[s.n.], 2021.