



2024

第02期
总第031期

双碳情报动态

本|期|聚|焦

- 增强型地热系统发展现状与技术前沿
- 空间太阳能高效转换和无线能量传输技术分析
- 全球固态电池技术研发和产业进展分析
- 主要国家微型电网部署现状及展望

中国科学院发展规划局
中国科学院文献情报中心

本期聚焦

增强型地热系统发展现状与技术前沿1

开发地热资源是加快能源结构转型，顺利实现碳中和目标的重要途径之一。目前地热资源类型包括蒸汽型、水热型、地压型、干热岩型等。前三者总储量有限且再生速度缓慢，无法实现规模化的发电应用，因此开发干热岩型地热资源是目前地热资源应用研究的关键。

空间太阳能高效转换和无线能量传输技术分析5

空间太阳能发电系统是指在太空中将太阳能转化为电能，再通过微波或激光等方式将能量无线传输到地面的电力系统，有望作为应对能源危机、实现可持续发展的方案之一。本文分析全球空间太阳能高效转换和无线能量传输技术发展现状以及核心部件商业化进展，并展望未来发展趋势。

全球固态电池技术研发和应用进展分析11

固态电池作为一种新型高效能源存储技术，是下一代电池技术竞争的关键制高点。本文梳理了近期主要国家（地区）电池产业发展战略布局，并针对固态电池研发的三大技术路线，分析了其最新研发动向和产业进展。

主要国家微型电网部署现状及展望19

近年来，各国积极部署微型电网，纷纷制定政策和法规来促进微型电网的建设与应用，赋能加速电力行业能源转型。本文梳理了 2020 年以来美国、欧盟、澳大利亚、加拿大、中国等主要国家在微型电网方面的部署情况和典型案例，总结了微型电网发展的重点方向 and 关键技术，以供决策参考。

重要动态

国际能源署发布《可再生能源 2023》报告	26
欧盟通过了 5.5 亿欧元国家援助计划以支持意大利工业脱碳	26
英国科学家评估工业脱碳方案的潜力、挑战及未来研发需求	26
欧盟委员会通过《工业碳管理战略》	27
美国能源部投资 1 亿美元用于支持碳去除技术的中试示范	27
欧盟推出新版电池战略研究和创新议程	27
大规模造林反而会使森林减碳效益降低	28
英国政府拨款 2100 万英镑支持 7 大低碳氢项目	28

更多信息详见：

- ◆ “双碳情报” 微信公众号
- ◆ 碳达峰碳中和情报支持平台
<http://scieye.llas.ac.cn/carbon>



增强型地热系统发展现状与技术前沿

开发地热资源是加快能源结构转型，顺利实现碳中和目标的重要途径之一。世界银行 2024 年 1 月发布的《地热能：揭示社会经济效益》报告指出，地热能发电在部分国家和地区，如冰岛和我国西藏地区的能源结构中发挥着关键作用¹。目前地热资源类型包括蒸汽型、水热型、地压型、干热岩型等。前三者总储量有限且再生速度缓慢，无法实现规模化的发电应用，因此开发干热岩型地热资源是目前地热资源应用研究的关键。增强型地热系统（Enhanced Geothermal System, EGS）是利用工程技术手段开采干热岩地热资源或强化开采低渗性热储地热能而建造的人工地热系统，《麻省理工科技评论》评出的“2024 年十大突破性技术”中就包括 EGS²，其原理是在高温低渗的干热岩体中，采用以水力措施为主的人工技术对热储岩体进行改造，增强其渗透性和流体流量，然后通过驱动低温工质流，经改造形成的裂隙网络进行热能的提取和利用。

一、国外增强型地热系统发展现状

美国、德国、法国、日本和澳大利亚等国家均开展了 EGS 研究，并建立了一批研究试验基地，目前全球在建及投入运行的 EGS 工程已达 30 个，正在运行的有 5 个，总装机容量为 12.2 兆瓦。

美国是全球最早开始研究与利用 EGS 的国家，早在 1973 年，美国便在 Fenton Hill 建立了 EGS 示范研究场地。截至目前，美国在 EGS 方面已开展了 Raft River 项目、Newberry 项目等。其中 Raft River 项目在采热技术方面，Newberry 项目在压裂技术方面走在世界前列。2015 年，美国能源部（DOE）启动了“地热能前沿瞭望台”（FORGE）计划，旨在建立一个野外实验场地来开展干热岩的前沿研究以及钻探

¹ World Bank.Publication: Geothermal Energy: Unveiling the Socioeconomic Benefit.<https://openknowledge.worldbank.org/entities/publication/d63d3c50-2bd0-46d7-a94d-999c6b0f359e>

² MIT Technology Review. Enhanced geothermal systems: 10 Breakthrough Technologies 2024.
<https://www.technologyreview.com/2024/01/08/1085112/enhanced-geothermal-systems-renewable-energy-drilling-breakthrough-technologies/>

和技术测试，以形成可降低工业开发风险和促进干热岩产业化开发的严谨、可复制的方法。2022 年 9 月 DOE 宣布新的“能源攻关计划”（Energy Earthshots），将 EGS 技术列为未来 10 年的六大核心能源技术攻关之一，以期 2035 年实现地热用能成本降低 90% 的目标，成本降至 45 美元每兆瓦时¹。同年，DOE 还基于《两党基础设施法案》和 FORGE 计划框架，分别向 EGS 相关方向的若干项目投入 8400 万美元和 4400 万美元，并启动“石油和天然气示范工程下的地热能源”（GEODE）计划，拟投资 1.65 亿美元推动地热能发电项目²。2023 年 2 月，DOE 宣布将为 7 个试点项目提供高达 7400 万美元的资助以测试 EGS 的效率和可扩展性³。同年 9 月，DOE 又宣布对布鲁克海文国家实验室主导的水泥基复合材料耦合化学力学中心（C4M）和西北太平洋国家实验室主导的地下信号和渗透率研究中心（CUSSP）进行资助，分别开展用于 EGS 的可持续复合材料化学、机械性能研究以及开发预测和控制流体通过 EGS 裂隙网络的技术⁴。同年 11 月，DOE 又宣布为 FORGE 的 13 个 ESG 项目提供 4400 万美元资助，资助研究方向包括自适应诱发地震活动监测仪，测量热波及效率的现场规模实验，高温支撑剂和用关于裸眼作业的多套管跨接封隔器，可重复的解决方案以及技术数据传输等⁵。

欧洲国家、澳大利亚、日本、韩国等国在 EGS 研发与部署方面也开展了大量工作。如德国、法国在两国边境共建的 Soultz 项目，该项目自上世纪 80 年代末启动，通过多轮欧盟框架计划（Framework

¹ Office of Energy Efficiency & Renewable Energy, DOE. Enhanced Geothermal Systems. <https://www.energy.gov/eere/geothermal/enhanced-geothermal-systems>

² Office of Energy Efficiency & Renewable Energy, DOE. Funding Notice: Geothermal Energy from Oil and gas Demonstrated Engineering (GEODE). <https://www.energy.gov/eere/geothermal/funding-notice-geothermal-energy-oil-and-gas-demonstrated-engineering-geode>

³ DOE. Biden-Harris Administration Announces \$74 Million to Advance Enhanced Geothermal Systems. <https://www.energy.gov/articles/biden-harris-administration-announces-74-million-advance-enhanced-geothermal-systems>

⁴ DOE. DOE Announces \$264M Energy Earthshots. <https://genomicscience.energy.gov/doe-announces-264m-energy-earthshots/>

⁵ Office of Energy Efficiency & Renewable Energy, DOE. U.S. Department of Energy Announces 13 Projects to Receive up to \$44 Million for Innovations in Enhanced Geothermal Systems. <https://www.energy.gov/eere/articles/us-department-energy-announces-13-projects-receive-44-million-innovations-enhanced>

Programme for Research) 支持, 该项目已进入了第三阶段, 即开展 EGS 发电的并网长期循环测试与监测。项目建成了 1.5 兆瓦增强型地热系统示范电厂, 并开展了长期水力循环测试与监测, 进行了并网发电。澳大利亚的 Habanero 项目实现了 1 兆瓦的并网发电。日本作为地热资源储备最多的国家之一, 在福岛核事故后进一步强化了对于 ESG 研究和利用。韩国也于 2010 年在浦项开发 EGS。值得注意的是, 这些项目中, 有一些因诱发地震或其他地质问题而被迫暂停或终止, 如 Soultz 项目曾最大诱发了 2.7 级地震, 由于结垢问题, 曾一度停止。为了防止结垢, 后续通过加入深井高压循环泵, 保持一定的井口压力, 有效解决了这一问题, 使得该项目得以继续, 并成为目前世界上较为成功的 EGS 示范案例; 然而也有被迫终止的案例, 如 2017 年, 在最后一次水力刺激试验约 2 个月后, 韩国浦项发生 5.4 级地震, 推测可能与浦项 EGS 项目相关, 引发民众反应强烈, 因此该项目也被迫终止¹。

二、我国增强型地热系统发展现状

我国是目前全球地热资源新建产能最大的国家, 地热资源丰富, 增强型地热技术可有效降低建筑领域制冷/供热相关能源消耗和碳排放。

“十二五”之前, 我国主要开展了干热岩相关基础性试验和理论研究等方面工作。“十二五”期间, 中国地质调查局组织开展了我国陆区干热岩资源评价。“十三五”期间, 在全国干热岩资源调查评价基础上, 陆续开展了东南沿海、山东利津、青海共和、东北长白山、江苏苏北、山西大同等典型地区的干热岩勘查工作, 实施干热岩钻探 10 余处, 取得了多项突破。2015 年 5 月, 中国地质调查局组织在福建漳州实施了我国首个干热岩科学钻井, 这标志着我国国家级干热岩实践正式拉开序幕²。2020 年, 我国成功实施了首例干热岩储层安全规模化建造, 有效改造体积超千万立方米。2021 年 6 月河北省唐山

¹ 文冬光, 张二勇, 王贵玲等. 干热岩勘查开发进展及展望[J]. 水文地质工程地质, 2023, 50 (04): 1-13.

² 中国地质调查局. 我国第一口干热岩科学钻探孔正式开钻.
https://www.cgs.gov.cn/xwl/ddyw/201603/t20160309_301691.htm

市马头营凸起区干热岩开发关键技术与示范项目实现了干热岩试验性发电，这是我国首次实现干热岩试验性发电，初步建立了我国干热岩地质调查、资源评价、物探、钻探、压裂、监测、发电等勘查开发全流程技术体系¹。

三、增强型地热系统的技术前沿方向

目前，EGS 的前沿研究方向可大致分为干热岩的勘探、开发、热能利用三大方向²。

干热岩勘探技术方面，主要针对干热岩的成因机理、调查评价方法以及具体勘探技术的研究。传统的宏观评价已不适合于对于干热型地热资源精细化开发的需求，需要开发基于大数据与人工智能技术的定量化资源评价与分布预测模型，并通过可视化高精度三维地质模型对地热资源进行综合评价与预测。在勘探方面，开发重、磁、电、震等多元信息融合的深部地热探测技术方法，高温高压条件的测井技术与材料。

干热岩开发技术方面，包括了钻井、储层建造、储层监测维护、防震控震等。其中储层建造是核心，涉及了对于干热岩热能的提取与存储，包括了干热岩储层人工压裂技术、干热岩开采数值模拟技术、井筒热流体高效提取技术、深部地热与矿产资源协同开采技术等具体技术方向。二氧化碳、液氮等新型介质造储，井内闭式循环换热等新型提取热能工艺方法也是储层建造的关注重点。

干热岩热能利用技术方面，包括了热电转换技术、多能互补利用技术、深部地热储能技术等。热电转换方面，由于当前干热岩发电多采用单一发电模式，产能低、设备易腐蚀、容易产生结垢，因此需要开发高效发电热力循环系统、原位发电新技术、热电转换新材料等。多能互补利用方面，可根据需求温度从高到低的顺序，开展地热发电、供热、洗浴、水产养殖等多级利用工程。深部地热储能则涉及光/风等

¹ 光明网. 我国首次实现干热岩试验性发电. <https://m.gmw.cn/baijia/2021-06/29/34956678.html>

² 巩亮,韩东旭,陈峥等. 增强型地热系统关键技术研究现状及发展趋势[J]. 天然气工业, 2022, 42 (07): 135-159.

其他形式能源的热转化技术、热储调蓄技术等。

除了上述方向以外，为了克服当前 EGS 开发受地理地质条件限制较大的缺陷，让 EGS 能够在更广泛的土地环境上得到应用，美国 FORGE 计划、欧盟 DEEPEGS 项目等项目计划也在探索 EGS 系统的大规模、可复制的商业化道路，以使 EGS 逐渐摆脱对于储层原位地质环境的依赖。

四、增强型地热系统存在的问题

整体来看，EGS 尚处于起步阶段，还未实现规模化、商业化运行，主要原因是受成本和技术的限制¹。

成本方面，目前 EGS 的成本每兆瓦时约 500 美元，是核电、光伏、煤电等其它发电途径成本的十余倍。

技术方面，主要问题包括：

(1) 缺乏可控人工造缝调控技术，导致地下网状结构差，采热效率低，且不当的人工造缝技术容易引起人造地震等地质灾害问题；

(2) 与 EGS 密切相关的地下渗流、传热、介质变形、水岩反应等地质机理的认识还不够明确，缺乏地热储层数值模拟技术；

(3) 缺乏井筒热介质高效提取技术，热介质进入采出井时的温度较高，采出井底部和地面发电系统压力差大，导致介质发生闪蒸相变现象，极大影响井内热介质的高效提取；

(4) 当前地上发电模式在 EGS 的适用性问题，基于现有其它发电技术开发的 EGS 发电装备仍存在热电转换效率低的问题。

(徐英祺)

空间太阳能高效转换和无线能量传输技术分析

空间太阳能发电系统是指在太空中将太阳能转化为电能，再通过微波或激光等方式将能量无线传输到地面的电力系统，有望作为应对能源危机、实现可持续发展的方案之一。在 2024 年 1 月 11 日揭晓的两院院

¹ 亢方超,唐春安,李迎春等. 增强地热系统研究现状: 挑战与机遇 [J]. 工程科学学报, 2022, 44 (10): 1767-1777.

士评选 2023 年中国/世界十大科技进展新闻中，“世界首个全链路全系统空间太阳能电站地面验证系统落成启用”、“卫星首次成功向地球传送太阳能证明天基能源可信性”两项跟空间太阳能发电相关的科技进展入选¹。自从 1968 年美国 Peter Glaser 博士提出空间太阳能发电概念以来²，国际学术界开展了持续研究，但由于系统规模大、技术难度高，迄今尚未能建成一个完整的空间试验电站。构建完整的空间太阳能发电系统首先要提高太阳能聚光与光电转换效率，开展无线能量传输研究，这包括空间超大型可展开结构及控制技术、空间太阳能高效转换及超大发电阵列技术、空间超大功率电力传输与管理技术、无线能量传输技术等。本文分析全球空间太阳能高效转换和无线能量传输技术发展现状以及核心部件商业化进展，并展望未来发展趋势。

一、太阳能高效转换技术

空间太阳能电站采用的太阳能高效转换技术主要是高效太阳电池。为了实现空间太阳能电站高效、价廉、使用寿命长的目标，太阳电池需达到五个方面的要求，即效率高、质量轻、抗辐射能力强、价格便宜、有大批量单片生产和光伏阵列装配能力。目前，空间大面积太阳电池主要采用三种模式：

1、传统的平面阵列电池

太阳电池开发初期，都是用硅片作为光伏发电的基础，虽然该技术已经发展得较为成熟，但效率已达到瓶颈。因此，现在一些空间应用中已采用效率更高的砷化镓太阳电池，该电池具有高转化效率、耐辐照和高电压等特性，在人造卫星、太空站、太空探测器和登陆探测器等应用领域具有较大的优势，可有效延长人造卫星的工作寿命。砷化镓太阳电池在光电转换效率方面表现出色，目前商业应用已经突破了 40% 的效率，是商用中效率最高的太阳能技术之一，砷化镓组件在

¹ “两院院士评选 2023 年中国/世界十大科技进展新闻” 揭晓.
http://www.casad.cas.cn/mtbd2022/202401/t20240115_5000455.html

² 空间太阳能电站:科幻能否成现实? https://www.ncsti.gov.cn/kjdt/kjrd/202108/t20210816_38784.html

空间电源领域的应用比例已超过 95%¹。效率更高的两结、三结、四结砷化镓电池和具有高抗辐射能力的磷化铟电池材料目前正在研制示范中。2022 年，德国弗劳恩霍夫太阳能系统研究所由于改进了用于叠层电池结构的四层抗反射涂层，在 665 倍太阳光强照射的条件下，四结砷化镓电池的效率已从 46.1% 提高到 47.6%，为目前最高水平²。

2、聚光型太阳电池

空间聚光太阳电池阵列通过聚光透镜将大面积太阳光聚集到太阳电池片上，以提高单位面积电池片接收光强，从而减少电池片使用量、降低成本。聚光条件下的太阳电池具有高光强、高温度的特点，电池扩散层、基区载流子的迁移和复合、热特性会发生很大变化，使得聚光太阳电池的短路电流、开路电压、填充因子（FF）、光电转换效率和热-电耦合特性明显不同于常规太阳电池³。近年来，美、俄等国对菲涅耳透镜的材料光学性能、镜面棱型结构、焦斑位置与尺寸、焦斑能量分布等方面进行了研究。2020 年美国国家可再生能源实验室（NREL）开发出六结倒置变质结构的多结聚光太阳电池效率达到 $47.1 \pm 3.2\%$ ，进一步优化后预计六结聚光电池效率将超过 50%⁴。

3、多结薄膜太阳电池

多结薄膜太阳电池可大大降低质量和成本，并具有较高的抗辐射能力，有效规避传统晶硅电池易碎、产生隐形裂纹等，但缺点是光电转换效率并没有传统晶硅电池转换效率高。因此专注于转换效率的提升是研究重点。薄膜型太阳电池早已在地面得到应用，已经实现商业化的类型有：碲化镉（CdTe）薄膜太阳电池、铜铟镓硒（CIGS）薄膜太阳电池、非晶硅薄膜太阳电池等。碲化镉薄膜电池是发展最成熟的

¹ 恒州博智. 2023-2029 全球与中国砷化镓太阳能电池市场现状及未来发展趋势.

<https://www.qyresearch.com.cn/reports/gallium-arsenide-germanium-solar-cell-p2110662.html>

² Fraunhofer ISE. Fraunhofer ISE Develops the World's Most Efficient Solar Cell with 47.6 Percent Efficiency.

<https://www.ise.fraunhofer.de/en/press-media/press-releases/2022/fraunhofer-ise-develops-the-worlds-most-efficient-solar-cell-with-47-comma-6-percent-efficiency.html>

³ 邵立民, 杨淑利. 空间太阳电池聚光系统设计及性能分析研究[J]. 西北工业大学学报, 2023, 36(3): 471-479.

⁴ John F G, Ryan M F, Kevin L S, et al. Six-junction III-V Solar Cells with 47.1% Conversion Efficiency under 143 Suns Concentration[J]. Nature Energy, 2020, 5: 326-335.

太阳电池之一，根据美国国家可再生能源实验室测量与统计，实验室级别碲化镉薄膜电池最高效率为 22.4%，由美国 First Solar 公司创造¹。铜铟镓锡薄膜太阳电池是主流薄膜电池技术之一，由于该材料具有高吸收数能够更大限度的吸收太阳光，因此所需薄膜厚度比其他半导体材料薄得多。目前铜铟镓锡电池实验室最高转换效率为 23.6%，同样来自美国 First Solar 公司²。与晶硅电池不同，非晶硅电池在弱光下仍然具有较高的光电转换效率，现在更先进的多结非晶硅薄膜电池正在研制中。美国宇航局将在 Clark 星上进行可塑非晶硅电池板的演示试验，其地面测试效率约为 12.0%。欧洲太阳帆塔电池阵列采用可扩展的薄膜电池技术，将每个薄膜电池卷绕在中心轴上并通过碳纤维杆的作用下自动展开形成薄膜电池阵列，通过超导电缆实现模块之间电流的传递，汇集到发射系统中，单个薄膜电池模块达到 150×150 米³。

二、无线能量传输技术

无线能量传输作为空间太阳能发电的核心技术，是指能量以电磁波的形式从发射端传输到接收端。空间太阳能电站计划的提出激发了无线能量传输技术的发展。其中，高功率微波发射、高效率微波整流是无线能量传输系统的核心。

1、高功率微波源

高功率微波源是无线能量传输中能耗、热耗的主要载体，是传能系统的效率瓶颈，也是发射系统附加值最高的组成部分，高功率、高效率、高功率密度比是其关键指标。按照核心器件形态，可分为固态功率放大器、行波管放大器、速调管放大器、磁控管放大器等。

（1）固态功率放大器

随着第三代半导体氮化镓（GaN）快速发展，固态功放成为了微

¹ NREL. Interactive Best Research-Cell Efficiency Chart. <https://www.nrel.gov/pv/interactive-cell-efficiency.html>

² Jan K, Klara K, Olivier D G, et al. High-concentration Silver Alloying and Steep Back-contact Gallium Grading Enabling Copper Indium Gallium Selenide Solar Cell with 23.6% Efficiency[J]. Nature Energy, 2024, DOI: 10.1038/s41560-024-01472-3.

³ Wen F Q, Deng Z C, Wei Y, et al. Dynamic Modelling and Symplectic Solution of Coupled Orbit & Attitude for Solar Sail Towers[J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2023, 38(7): 762-768.

波功率部件的研究热点。无线传能系统中固态功放的研究重点主要集中在提高效率和功率。整机维度在功率方面，国外 L 频段 400 瓦，C 频段 100 瓦连续波固放已在轨应用；国内 L 频段 220 瓦连续波功放已在轨应用¹；在效率方面，L 波段整机效率高于 60%，C 频段高于 50%²；在频率方面，Q 频段及以上频段产品逐步上星应用³。

（2）行波管放大器

行波管放大器是星载高频段、大功率放大器的主选器件，主要应用于宽带通信卫星中，但由于高昂的价格以及老化效应，作为无线能量传输的大功率放大器鲜有报道，未来可作为集中式功率源的备选器件。目前，星载行波管已覆盖 L～W 频段，正在向太赫兹频段突破。在功率方面：L/S 频段为 250 瓦～500 瓦，Ku/Ka 频段为 200 W⁴；在效率方面：高压电源效率达到 94%，Ka 频段行波管达到 62%⁵；在频率方面：W 以上等高频段产品逐步上星应用⁶；集成方面：微波功率模块，双行波管放大器开始工程化研制应用。

（3）速调管放大器

速调管放大器是一种基于速度-密度调制原理将电子束能量转换为微波能量的真空电子器件，具有高效率、大功率等优点，是目前平均功率最高的微波功率器件。目前，国外星载速调管放大器典型产品平均功率大于 10 千瓦，效率高于 40%。国内在星载速调管放大器领域的研究起步较晚，目前正在开展千瓦级空间速调管放大器的相关研制工作，后续可作为集中式高功率微波源主选方案⁷。

2、高效率微波整流

高效率微波整流涵盖二极管、三极管和电真空器件整流等核心器

¹ Yang F, Li J, Yu H X, et al. L-band High Power Solid-state Power Amplifier for Aerospace Usage[J]. Electronics Letters, 2022, 58(7): 265-267.

² Kido M, Kawasaki S, Shibuya A, et al. 100W C-band GaN Solid State Power Amplifier with 50% PAE for Satellite Use[C]. 2016 Asia-Pacific Microwave Conference(APMC), 2017; 1-4.

³ 杨飞, 赵恒飞, 刘江涛, 等. 星载固态功率放大器:迈向极高频[J]. 红外与毫米波学报, 2021, 40(1): 25-32.

⁴ 宋磊, 瞿波, 夏岚, 等. Ku 波段 200 W 辐冷空间行波管研制[J]. 真空电子技术, 2021, 4: 82-87.

⁵ 孙萌, 杨俊, 刘颖博, 等. Ka 波段高效率、轻重量空间行波管: CN112837981A[P]. 2021-05-25.

⁶ 夏雷, 刘宇鹏, 孔斌, 等. W 频段星载行波管放大器线性化技术研究[R]. 成都: 电子科技大学, 2022.

⁷ Nix L J R, Zhang L, Cross A W. Design of a 48 GHz gyrokystron amplifier[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2021, 68(11): 5792-5798.

件，是微波-直流转换效率的决定因素，且种类繁多，功率覆盖毫瓦至千瓦量级，频率覆盖 1 GHz~100 GHz 频段。

（1）二极管整流

二极管整流技术可以追溯到 20 世纪 70 年代，基于金属-半导体结的肖特基二极管进入微波频段，作为主要的非线性器件，应用于整流、混频、倍频等电路。但由于其应用的局限性，并未大规模生产，其存在的问题主要是功率容量低，高效动态范围小，对直流负载要求高等，围绕这些问题，开发了多条技术途径¹，包括：为提高效率，采用谐波阻抗匹配技术；为拓展频率，采用双频设计；为提高动态范围，采用压缩阻抗网络；为适应输出阻抗变化，加入开关电源；为提高功率，采用多个二极管串并联形式。目前，经过优化的肖特基二极管其整流效率已达到 80%~90%。

（2）晶体管整流

晶体管栅极和源极之间是一个肖特基结，与二极管类似，具有整流功能。相比二极管，晶体管拥有更高的功率密度，GaN 晶体管在 S 波段的功率容量可以达到百瓦量级，采用类似谐波阻抗控制及波形赋形理论，可大幅提升整流效率，是目前的研究前沿。目前，采用特定的相位调节电路，同时，对整流模式下的晶体管模型优化及 IV 曲线拓展，效率可提高至 83.6%²。

三、空间太阳能发电技术未来发展方向

1、开发更轻量化、更高效的太阳能电池板

建造空间太阳能发电站首先需要解决的是太阳能电池板的重量问题。2017 年，美国加州理工学院的研究人员提出了一个模块化发电站的设计，该发电站由数千块超轻型太阳能电池瓦组成。它是迄今为止最轻的集成多功能原型机，能够收集阳光，将其转换成射频电能，

¹ 李军, 杨飞, 殷康, 等. 无线能量传输的核心功率器部件挑战与进展[J]. 空间电子技术, 2023, 20(5): 1-11.

² You F, Dong S W, Wang Y, et al. Design Method of Self-driving RF-DC Rectifier Based on Waveform-guided Solutions to Passive Matching Network[J]. IEEE Transaction on Power Electronics, 2019, 34(7): 6498-6509.

然后以受控光束无线传输这种能量。

2、提升空间太阳能电站总效率

效率是空间太阳能电站应用最核心的问题，总效率必须要达到 10% 以上，才具备实用价值。提升三个环节的效率是未来研究的关键：一是太阳能转化成电能再转化为微波；二是微波从 36000 公里的高度传输到地面，这中间有一些空间传输的损失；三是地面电站接收微波后，转化成直流电。

3、制定空间太阳能电站通用标准

除了技术和经济性以外，空间太阳能电站的发展还涉及到许多政策、法律和标准问题。如空间太阳能电站采用的频率如何确定，允许的微波功率密度是多少，如何考虑无线能量传输的安全性以及不对其他设施造成干扰，空间太阳能电站的轨道参数以及互联方式等诸多标准尚需明确。此外，空间太阳能电站报废时间如何确定，报废后处理等，均需制订国际标准。

（汤匀）

全球固态电池技术研发和应用进展分析

固态电池作为一种新型高效能源存储技术，是下一代电池技术竞争的关键制高点。2024 年 1 月以来，固态电池技术在提升续航能力和延长使用寿命方面取得突破性进展。日本大型电池企业麦克斯尔研发的圆柱形全固态电池容量超过传统陶瓷封装型电池的 25 倍¹。大众旗下电池子公司 PowerCo 发布公告，证实 Quantum Scape 固态电池在完成 1000 次充放电循环后仍能维持 95% 的原始容量²。同时，全球首家千兆级固态锂陶瓷电池工厂在中国台湾落成³，是全固态电池产业化的重要里程碑。本文梳理了近期主要国家（地区）电池产业发展战

¹ 日经中文网. Maxell 推出圆柱状固态电池. <https://cn.nikkei.com/industry/science/technology/54314-2024-01-02-05-00-00.html>

² PowerCo. PowerCo Confirms Results: QuantumScape's Solid-state Cell Passes First Endurance Test. <https://www.volkswagen-group.com/en/press-releases/powerco-confirms-results-quantumscape-solid-state-cell-passes-first-endurance-test-18031>

³ ProLogium. ProLogium Opens the World's First Giga-level Solid-State Lithium Ceramic Battery Factory. <https://prologium.com/prologium-opens-the-worlds-first-giga-level-solid-state-lithium-ceramic-battery-factory/>

略布局，并针对固态电池研发的三大技术路线，分析了其最新研发动向和产业进展。

一、主要国家（地区）固态电池研发相关规划

自 2021 年以来，主要国家（地区）相继推出电池产业相关战略，研发高能量密度固态电池并实现商业应用是各主要国家的战略目标之一。美国在 2021 年发布《锂电池 2021—2030 年国家蓝图》¹，提出到 2030 年实现包括固态电池在内的先进电池技术的规模化生产，固态电池目标能量密度达到 500 瓦时每千克。日本在 2022 年 8 月更新的《蓄电池产业战略》²中，提出了到 2030 年左右实现全固态锂电池的商业化，能量密度达到 500 瓦时每千克，占领新一代电池市场。韩国将电池技术视为经济发展的核心驱动力之一，2021—2022 年相继发布《2030 二次电池产业发展战略》和《二次电池产业创新战略》³，设定了 2026 年实现车用固态电池技术商业化的目标。欧盟在 2023 年 9 月发布的《欧洲电池研发创新路线图》和第三版《电池 2030+路线图》中⁴，继续将第四代固态电池材料研发（交通应用）列为 2030 年优先事项，并实现电堆成本控制在 75 欧元每千瓦时之内。我国在 2021 年出台的《新能源汽车产业发展规划（2021—2035）》中提出加快固态动力电池技术研发及产业化，并在 2023 年发布的《关于推动能源电子产业发展的指导意见》中再次强调加强固态电池等新型储能电池产业化技术攻关，推进先进储能技术及产品规模化应用。

各国政府加大研发投入加速固态电池技术及其产业化进程。欧盟通过欧洲共同利益项目下一代锂电池技术研发，在 2022—2023 年间

¹ DOE. National Blueprint For Lithium Batteries 2021–2030 . https://www.energy.gov/sites/default/files/2021-06/FCAB%20National%20Blueprint%20Lithium%20Batteries%200621_0.pdf

² METI. Battery Industry Strategy.

https://www.meti.go.jp/policy/mono_info_service/joho/conference/battery_strategy/battery_saisyu_torimatome.pdf

³ Ministry of Trade, Industry and Energy of Korea. Secondary Battery Industry Innovation Strategy.

<https://www.korea.kr/news/pressReleaseView.do?newsId=156534055&pageIndex=2&repCodeType=?&repCode=A00015&startDate=2021-11-03&endDate=2022-11-03&srchWord=&period=year>

⁴ Batteries Europe. Joint Press Release Batteries Europe and Battery 2030+ Reveal Innovative R&I Roadmap Paving the Way for Battery Technology's Future. <https://batterieseurope.eu/press/joint-press-release-batteries-europe-and-battery-2030-reveal-innovative-ri-roadmap-paving-the-way-for-battery-technologys-future/>

额外投资了 600~800 万欧元（648~865 万美元）用于解决固态电解质相关的科学难题¹。日本政府通过绿色创新基金支持全固态电池的开发，2022 年 5 月，向日产汽车和本田汽车等提供约 1510 亿日元(约 10 亿美元)资金资助，确保新型电池包括卤代电池、锌负极电池等技术优势，并完善全固态电池量产制造体系²。我国在“十四五”期间也通过国家重点研发计划“储能与智能电网技术”专项，部署了兆瓦时级本质安全固态锂离子储能电池的研发。

二、近期固态电池技术研发进展

目前在全球范围内，固态电池主要处于研发和小规模生产测试阶段。相比于传统锂离子电池，固态电池可简化封装、冷却系统，电芯内部为串联结构，在有限空间内进一步缩减电池重量，体积能量密度较液态锂离子电池（石墨负极）可提升 70%以上（图 1）。根据不同电解质类型，固态电池可分为聚合物固态电池、氧化物固态电池和硫化物固态电池三种类型。其中，聚合物电解质固态电池技术发展速度快，技术相对成熟，已率先实现了商业化应用的小规模量产。然而，该技术受到较低电导率和有限性能上限的制约，限制了其大规模应用。氧化物电解质固态电池表现出较为全面的性能优势，技术快速发展。硫化物电解质固态电池因其较高的电导率和出色的性能表现，被认为最适合用于电动汽车，商业化前景广阔。然而，后两种技术路线均面临界面稳定性差的研究难题。当前，全球主要科研机构针对电解质材料和新型正负极开展了大量研究，并取得了一些突破性进展。

¹ EU. Strongly Improved, Highly Performant and Safe all Solid State Batteries for Electric Vehicles (RIA) . https://cordis.europa.eu/programme/id/H2020_LC-BAT-1-2019

² NEDO. グリーンイノベーション基金事業、「次世代蓄電池？次世代モーターの開発」に着手. https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_101535.html

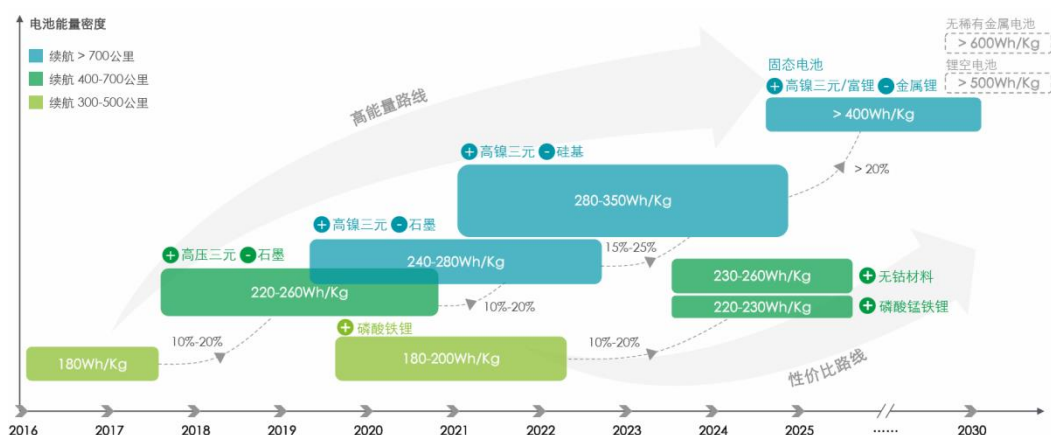


图 1 动力电池技术发展路线图1

(1) 研发兼顾高离子电导率和稳定性的固体电解质材料。2023 年 7 月，日本东京工业大学 Ryoji Kanno 团队利用高熵材料设计了一种高离子电导率的硫化物固态电解质，创下 32 毫西门子每厘米的全球最高锂离子电导率记录。此外，该团队还通过优化制造工艺，实现了全固态锂电池每平方厘米超过 20 毫安时的面容量，是当前全球最高水平²。8 月，韩国 SK On 公司与檀国大学联合成功研发出新款氧化物固态电解质。与现有产品相比，新材料的锂离子电导率提升了 70%，具有全球最高水平³。10 月，复旦大学、昆山杜克大学和美国麻省理工学院合作，精准合成了系列具有交替序列结构的单锂离子导电含氟共聚物全固态电池。该聚合物全固态锂金属电池达到了液态聚乙二醇电解质的锂离子电导率水平，并实现了超过 1500 小时的室温锂剥离/沉积循环和可逆的固态锂金属电池室温充放电循环⁴。11 月，韩国首尔国立大学研究人员提出了超离子三卤化物电解质固态电池的一般设计标准。当引入 $\text{Li}_3\text{Y}_{0.2}\text{Zr}_{0.6}\text{Cl}_6$ 时，离子电导率可达到 1.19 毫西门子每厘米⁵。2024 年 2 月，中国科学院物理研究所和中山大学联

¹ Deloitte. 德勤锂电白皮书系列之二：电池“风云”。
<https://www2.deloitte.com/cn/zh/pages/strategy/articles/high-growth-opportunities-in-the-lithium-battery-industry-2022.html>

² Science. A Lithium Superionic Conductor for Millimeter-thick Battery Electrode.
<https://www.science.org/doi/10.1126/science.add7138>

³ SK On. SK On Develops New Solid Electrolyte with Top-level Lithium-ion Conductivity. http://eng.sk-on.com/company/press_view.asp?idx=123&page=1&schtxt=&CompanyCode=011

⁴ Nature Materials. Sequencing Polymers to Enable Solid-state Lithium Batteries.
<https://www.nature.com/articles/s41563-023-01693-z>

⁵ Science. Design of a Trigonal Halide Superionic Conductor by Regulating Cation Order-disorder.

合开发了一种新型锂超离子氯化物固态电池，在室温下实现了 2.2 毫西门子每厘米的高离子电导率以及低电导率活化能垒（Zr 和 Hf 类比分别为 0.31 和 0.33eV），有助于固态电池良好的循环和倍率性能¹。

（2）开发高比容量和耐久性的正负极电极材料。富锂锰基氧化物作为高容量正极材料易受到氧损失引起的电压衰减影响。2023 年 5 月，日本横滨国立大学通过高能机械研磨法合成的含氟锂锰氧化物（ $\text{Li}_2\text{MnO}_2\text{F}$ 和 $\text{Li}_2\text{MnO}_{1.5}\text{F}_{1.5}$ ）显示出较高的可逆容量和能量密度，分别为 350 毫安时每克和 1000 毫瓦时每克，尤其是 $\text{Li}_2\text{MnO}_{1.5}\text{F}_{1.5}$ 材料在经过 180 次以上的循环仍维持稳定性能²。6 月，中国科学院物理研究所研究团队制备了一种硬碳稳定的锂硅合金阳极，这使得电池在高负载和高电流密度下实现了长期循环。测试显示，在 5.86 毫安每平方厘米的电流密度和 5.86 毫安时每平方厘米的负载下，电池能够稳定循环 5000 次，电池级能量密度达到每千克 263 瓦时，与商用锂离子电池能量密度相当³。10 月，日本大阪产业技术研究所科研人员首次在全固态电池中应用具有纳米多孔硅纤维网络结构的复合负极，实现了 1474 毫安时每克的可逆容量。该电池经过 40 次循环后容量保持率仍高达 85%，具有较高的工业应用潜力⁴。2024 年 1 月，哈佛大学研究团队揭示了固态电池中锂金属和负极材料（硅、银、镁等）在界面反应中表现出收缩敏感性新现象，并设计出一种活性三维支架，以快速电镀和剥离大量厚锂金属层。该设计不仅规避了硅膨胀，而且还为固态电池中锂金属的快速稳定循环提供了超快反应途径⁵。

<https://www.science.org/doi/10.1126/science.adg6591>

¹ *ACS Energy Lett.* Superior Ionic Conductivity Invoked by Enhanced Correlation Migration in Lithium Halides Solid Electrolytes. <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acsenenergylett.3c02496>

² *ACS Energy Lett.* Durable Manganese-Based Li-Excess Electrode Material without Voltage Decay: Metastable and Nanosized $\text{Li}_2\text{MnO}_{1.5}\text{F}_{1.5}$. <https://pubs.acs.org/doi/full/10.1021/acsenenergylett.3c00372#>

³ *Nature Energy.* Hard-carbon-stabilized Li-Si Anodes for High-performance All-solid-state Li-ion Batteries. <https://www.nature.com/articles/s41560-023-01279-8>

⁴ *Scientific Reports.* Nanoporous Silicon Fiber Networks in a Composite Anode for All-solid-state Batteries with Superior Cycling Performance. <https://www.nature.com/articles/s41598-023-44070-1>

⁵ *Nature Materials.* Fast Cycling of Lithium Metal in Solid-state Batteries by Constriction-susceptible Anode Materials. <https://www.nature.com/articles/s41563-023-01722-x>

三、固态电池产业应用最新进展

在硫化物电解质固态电池应用方面，日本企业近期取得突破性进展，如丰田、松下和日产等。2023 年 7 月，丰田汽车成功制造出充电 10 分钟可续航 1200 公里的固态电池¹。9 月，日本旭硝子株式会社在其横滨技术中心完成了一项突破性技术的中试，该技术能够实现车用硫化物全固态电池电解质的批量生产。同期，松下控股集团首次向外界展示了其针对便携式电子设备开发的全固态电池产品。该电池的充电速度超过现有电池 20 倍，且充放电循环次数可达 1 万至 10 万次²。10 月，日产汽车发布了配备全固态电池的多用途汽车概念车“日产 Hyper Tourer”。此外，美国 Solid Power 在 2023 年第三季度财报中披露，该企业向宝马公司交付了首批 A-1 EV 电池，标志着其固态电池产品正式进入汽车验证测试阶段。

在聚合物电解质固态电池应用上，欧美企业研发成果表现较突出，包括法国博洛雷集团、美国 Factorial Energy 等。2023 年 10 月 24 日，Factorial Energy 在美国马萨诸塞州梅休恩投资 5000 万美元建设年产能为 200 兆瓦时的固态电池装配线，该生产线也是美国最大固态电池生产线。生产的固态电池采用“Factorial 电解质系统技术”，能够使电池续航里程提升 20%到 50%，同时拥有与现有锂离子电池制造基础设施兼容的嵌入式特性，便于在现有生产线中进行集成。

在氧化物电解质固态电池的应用研发方面，日本旭硝子株式会社在 2023 年 3 月发布了世界上首个主要零件全部由“结晶玻璃”制成的氧化物全固态钠离子二次电池³。美国 Quantum Scape 在 2023 年第三季度财报中披露，首款商用氧化物电解质固态电池产品 QSE-5 已

¹ 日本经济中文网. 日产将展出电动 MPV，搭载全固态电池. <https://cn.nikkei.com/industry/icar/53785-2023-10-18-14-53-38.html>

² 日本经济中文网. 3 分钟快充，松下全固态电池首次亮相. <https://cn.nikkei.com/columnviewpoint/column/54128-2023-12-19-05-00-21.html>

³ 日本電気硝子株式会社. 世界初、結晶化ガラス固体電解質を用いたオール結晶化ガラス全固体ナトリウムイオン二次電池を開発. <https://www.neg.co.jp/news/20230302-6452.html>

完成 1000+次循环后容量保持率在 95%以上的测试。2024 年 1 月，中国台湾电池制造商辉能科技推出专为电动汽车设计的 106 安时高硅阳极固态电池，实现 2 吉瓦时的规划年产能，并计划 2024 年进入量产阶段¹。

表 1 主要国家代表性企业固态电池产业化进展

国家	代表性企业	产品	技术路线	单体能量密度	产品进展
美国	Solid Power	全固态电池	硫化物	390 Wh/kg	2022 年完成试生产线安装，预计 2023—2025 年实现年产能 100 兆瓦时的中试线，完成 C/D 样阶段测试。计划于 2025—2027 年迅速建设 10 吉瓦时年产能，并开始车规级电池生产。到 2028 年，每年能为 80 万辆电动汽车的固态电池生产固态电解质。
	Quantum Scape	全固态电池	氧化物	372 Wh/kg	2023 年 10 月已进入 A 样测试阶段。
	Factorial Energy	全固态电池	聚合物	350 Wh/kg	2023 年 200 兆瓦时固态电池工厂正式开工建设，电池产品进入 A 样送样阶段。
	24M Technologies	半固态电池	-	-	计划 2025 年在日本、印度、中国量产半固态电池。
法国	博洛雷集团	全固态电池	聚合物	-	2011 年能量密度仅为 100 瓦时每千克的固态电池已实现小规模量产，但更高能量密度的车用固态电池仍在研发中。
日本	丰田	全固态电池	硫化物	400 Wh/kg	2023 年制造出充电 10 分钟可续航 1200 公里的固态电池，计划 2027—2028 年实现该技术的商业化以及推出搭载固态电池的电动车型。
	松下	全固态电池	硫化物	-	2023 年 12 月首次公开产品，预计 2029 年前量产。
	日产	全固态电池	硫化物	-	2023 年 2 月宣布产品研发成功，预计 2025 年试产，2028 年实现固态电池大规模量产，同年生产一款由固态电池驱动的全新电动汽车。
韩国	三星 SDI	全固态电池	硫化物	900 Wh/L	2023 年试点生产线已完工，正在开展材料验证。预计 2025 年开发出大型电池生产技术，2027 年实现量产。
	SK On	全固态电池	氧化物、硫化物	930 Wh/L	预计 2026 年完成两款电池的早期原型，2028 年量产。

¹ Prologium.ProLogium Opens the World's First Giga-level Solid-State Lithium Ceramic Battery Factory.
<https://prologium.com/prologium-opens-the-worlds-first-giga-level-solid-state-lithium-ceramic-battery-factory/>

	LG 新能源	全固态 电池	聚合 物、 硫化物	650 Wh/L	2023 年完成半固态电池生产线建设，预计 2026 年前实现“安全改进型”聚合物基半固态电池商业化，2028 年推出 750 Wh/L 的聚合物固态电池和完成硫化物全固态电池开发，2030 年推出超过 900 Wh/L 的硫化物全固态电池。
中国	广汽埃安	全固态 电池	-	350 Wh/kg	2023 年 12 月 12 日因湃电池工厂正式竣工投产，计划于 2026 年实现全固态电池的量产搭载。
	长安汽车	（半） 全固态 电池	-	350~500 Wh/kg	2025 年开始逐步量产应用。
	赣锋锂业	（半） 全固态 电池	氧化物	360 Wh/kg	2023 年其半固态电池在纯电动 SUV—赛力斯 SF5 上正式交付装车。
	辉能科技	全固态 电池	氧化物	350~390 Wh/kg	2024 年 1 月建成全球首个千兆级固态锂陶瓷电池工厂，计划一年内实现 106 安时高硅阳极固态电池的量产。

四、趋势与展望

国际能源署预测¹，预计在 2025—2030 年间，高能量密度固态电池技术将实现商业化。根据中国智库 EVTank 的预测分析，预计到 2030 年，全球固态电池出货量将达到 614.1 吉瓦时，在整体锂电池中的渗透率将达到 10%，市场规模将达到 2500 亿元²。在如此强劲的市场驱动下，固态电池技术的创新和转化应用将会进一步加速，材料和工艺创新是商业应用的关键。

未来，研发重点将聚焦在确保安全的基础上提高动力电池能量密度和使用寿命，在材料、界面、传输和系统四个层面开展技术攻关。关键方向包括提升电解质材料性能和制造工艺；在负极材料的开发上，短期内聚焦于硅基材料的研究，长期则转向金属锂材料的迭代开发；正极材料的研发则专注于提升能量密度，逐步过渡到高电压材料的应用。同时，对材料生长过程和表面结构进行精细调控及提高锂离子及

¹ IEA. Transport. <https://www.iea.org/reports/innovation-gaps/transport>

² EVTank. 中国固态电池行业发展白皮书（2024 年）. <http://www.evtank.cn/DownloadDetail.aspx?ID=542>

电子传输效率，实现能量密度 500 瓦时每千克以上的全固态电池规模化生产目标。

（滕飞 孙玉玲）

主要国家微型电网部署现状及展望

微型电网由分布式电源、用电负荷、能量管理系统等组成。作为新一代电力系统的重要组成部分，微型电网充分利用风力、太阳能等产生的清洁电力，减少了石油和煤炭等化石燃料发电带来的污染排放，灵活性好、经济环保、能效较高。当前全球约有 21000 个微型电网为 4800 万人服务，到 2030 年被服务人口将扩大到 5 亿，届时需要部署 217000 个微型电网，其中大部分是太阳能微型电网，可以避免 15 亿吨二氧化碳排放¹，各地用于构建微型电网的储能装机容量将达到 37 吉瓦，创造约 401 亿美元的营收²。

近年来，各国积极部署微型电网，纷纷制定政策和法规来促进微型电网的建设与应用，赋能加速电力行业能源转型。本文梳理了 2020 年以来美国、欧盟、澳大利亚、加拿大、中国等主要国家在微型电网方面的部署情况和典型案例，总结了微型电网发展的重点方向和关键技术，以供决策参考。

一、主要国家微型电网部署情况

1、美国

美国部署微型电网的重点主要集中在提高供电可靠性和实现电网智能化方面。2020 年 12 月，美国能源部（DOE）开始制定“微型电网规划战略”（*Microgrid Program Strategy*）³，旨在到 2035 年，将微型电网打造成未来电力输送系统的重要组成部分，构建韧性、零碳、可负担的电力网络，将微型电网从设计到调试阶段的时间和成本分别降低 20%、15%。2021 年 5 月，DOE 宣布研发出监测安装在美国各

¹ The World Bank. Solar Mini Grids Could Power Half a Billion People by 2030 – if Action is Taken Now. <https://www.worldbank.org/en/news/press-release/2022/09/27/solar-mini-grids-could-power-half-a-billion-people-by-2030-if-action-is-taken-now>

² 2030 年全球微电网市场规模或将超过 400 亿美元[J]. 电力勘测设计, 2020.

³ DOE. Microgrid Program Strategy. <https://www.energy.gov/oe/microgrid-program-strategy>

地微型电网的新型交互式工具¹，有助于电网安装经验交流和相关数据文件下载。2023 年 10 月，DOE 发布 105 亿美元的“电网韧性与创新伙伴关系计划”（GRIP）²，将在美国 44 个州部署 400 个独立微型电网，增强电网系统韧性。目前，加利福尼亚州、密歇根州、佛罗里达州等地均部署有微型电网³，多由太阳能光伏和储能系统组成。

2、欧盟

欧盟微型电网建设主要集中于制定更先进的解决方案和示范项目部署。2022 年 4 月，欧洲能源转型智能网络技术与创新平台（ETIP SNET）公布《2022—2025 年综合能源系统研发实施计划》重点资助项目⁴，包括支持孤岛模式运行的微型电网。2022 年 5 月，ETIP SNET 发布 2021—2025 年将要实施的关键研究创新优先事项及其预算⁵，包括开发和示范海洋能商业化部署的最佳应用，例如建立海岛或孤岛微型电网，借助最佳应用试点开发先进的解决方案。2023 年 3 月，ETIP SNET 发布的《2022—2031 年综合能源系统研发路线图》计划利用已开发的解决方案高效集成微型电网⁶。

3、澳大利亚

澳大利亚微型电网建设致力于解决供电不稳问题，2020 年来较多关注原住民社区等脆弱群体用电问题。2020 年 9 月，澳大利亚政府投入 6700 万澳元支持区域和偏远社区构建微型电网⁷，建立可负担、可靠的电力网络。2020 年 10 月，可再生能源署（ARENA）启动“区域微型电网计划”（*Regional Microgrids Program*）⁸，旨在支持澳大

¹ DOE. Department of Energy Releases New Tool Tracking Microgrid Installations in the United States. <https://www.energy.gov/eere/iedo/articles/department-energy-releases-new-tool-tracking-microgrid-installations-united>

² DOE. Grid Resilience and Innovation Partnerships (GRIP) Program. <https://www.energy.gov/gdo/grid-resilience-and-innovation-partnerships-grip-program>

³ Clean Coalition. Microgrids across the United States. <https://clean-coalition.org/community-microgrids/microgrids-across-the-united-states/>

⁴ ETIP SNET. R&I implementation plan 2022-2025. <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/53e747cd-9f57-11ec-83e1-01aa75ed71a1/language-en/format-PDF/source-252703697>

⁵ Ocean Energy Europe. Strategic Research and Innovation Agenda for Ocean Energy. <https://www.oceanenergy-europe.eu/wp-content/uploads/2020/05/ETIP-Ocean-SRIA.pdf>

⁶ ETIP SNET. R&I Roadmap 2022-2031. <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/6092adfd-c2e8-11ed-a05c-01aa75ed71a1/language-en>

⁷ Ministers for the Department of Industry, Science and Resources. Investment in New Energy Technologies. <https://www.minister.industry.gov.au/ministers/taylor/media-releases/investment-new-energy-technologies>

⁸ IEA. Regional Australia Microgrid Pilots Program. <https://www.iea.org/policies/13806-regional-australia->

利亚各地可再生能源微型电网的开发和部署，包括研究项目可行性、提出技术解决方案、展示电网韧性和可靠性等。2021 年 5 月，澳大利亚政府发布年度预算¹，将拨款 3000 万澳元用于凯瑟琳（Katherine）—达尔文（Darwin）的互联系统大型电池项目和北领地的微型电网部署。2022 年 10 月，工业、科学和资源部（DISR）启动“澳大利亚供电计划”（*Powering Australia plan*）²，其中，将拨款 8380 万美元用于开发和部署原住民社区微型电网项目，保证能源供应安全性和可负担性。2023 年 8 月，ARENA 通过“区域微型电网计划”拨款 1.25 亿澳元用于微型电网技术开发和应用³，5000 万澳元用于支持微型电网试点项目，7500 万澳元支持原住民社区微型电网项目。

4、加拿大

加拿大地域广阔，其微型电网项目主要为远离大型电网的偏远社区供电，解决长距离输电困难问题。2022 年以来，加拿大政府累计为 Lac Mégantic 微型电网项目追加超过 350 万美元^{4,5}，帮助当地基础设施并入 Lac Mégantic 微型电网，促进微型电网知识传播和技能培训。2022 年 6 月，加拿大政府资助萨斯喀彻温省的 Kinoosao 微型电网项目⁶，试点研究太阳能微型电网可行性，预计项目建成后每年可节省约 127100 升柴油。2023 年 9 月，自然资源部（Natural Resources Canada）宣布投资艾伯塔省清洁能源项目⁷，其中，将研究蒙大拿州地区所有配

microgrid-pilots-program?s=1

¹ Ministers for the Department of Industry, Science and Resources. Boosting Jobs and Maximising Growth to Secure Australia's Recovery. <https://www.minister.industry.gov.au/ministers/pitt/media-releases/boosting-jobs-and-maximising-growth-secure-australias-recovery>

² Ministers for the Department of Industry, Science and Resources. Improving energy security, reliability and affordability. <https://www.minister.industry.gov.au/ministers/husic/media-releases/improving-energy-security-reliability-and-affordability>

³ ARENA. Regional Microgrids Program. <https://arena.gov.au/funding/rmp/>

⁴ Government of Canada. Government of Canada Announces \$2.5 Million for Lac-Mégantic Microgrid Capacity Building. Government of Canada Announces \$2.5 Million for Lac-Mégantic Microgrid Capacity Building

⁵ Government of Canada. Lac-Mégantic to Receive over \$1M to Redevelop Public Areas and Boost Green Transition Efforts. <https://www.canada.ca/en/economic-development-quebec-regions/news/2022/02/lac-megantic-to-receive-over-1m-to-redevelop-public-areas-and-boost-green-transition-efforts.html>

⁶ Government of Canada. Kinoosao Energy Retrofit Project/Kinoosao Microgrid Project. <https://natural-resources.canada.ca/science-and-data/funding-partnerships/funding-opportunities/current-investments/kinoosao-energy-retrofit-projectkinoosao-microgrid-project/24332>

⁷ Government of Canada. Federal Government Invests in 12 New Wind, Solar and Smart-Grid Projects With Alberta Indigenous and Industry Partners. <https://www.canada.ca/en/natural-resources-canada/news/2023/09/federal-government-invests-in-12-new-wind-solar-and-smart-grid-projects-with-alberta-indigenous-and-industry-partners.html>

电基础设施并入微型电网的可能性。加拿大微型电网目前多用柴油发电，未来发展可能将转向光伏、风力发电。

5、中国

我国微型电网起步较晚，2020 年起，陆续发布多个推进微型电网部署的文件，加快电网布局建设。其中，《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和二〇三五年远景目标纲要》要求加快智能微型电网建设，提升向边远地区输配电的能力¹，《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》明确微型电网和分布式电源的市场主体地位²，《“十四五”现代能源体系规划》提出积极发展智能微型电网，实现与大电网的兼容互补³，《电力现货市场基本规则（试行）》表示要推进微型电网等新兴市场主体参与交易⁴。然而，当前国内缺乏统一的微型电网体系规范文件和技术标准，成为微型电网进一步发展的主要障碍。

二、微型电网建设典型案例

微型电网建设项目主要分布在偏远地区、城市公共机构和工商业区以及住宅区域^{5,6}：

（1）山区微型电网。湖南常德九岭村的光储一体微型电网由分布式光伏和储能电池组成，同时，配套的新型台区智能融合终端系统可以进行偏远山区分布式资源状态实时监控，实现山区电力灵活保供。光储微型电网的供电可靠性、电能质量相比于传统电网将提高至 99%。

（2）海岛微型电网。英国埃格岛离网型微型电网的发电系统由分布式光伏、小型风力发电和水力发电设施组成，同时普通储能电池

¹ 中央人民政府. 2020. 中共中央关于制定国民经济和社会发展第十四个五年规划和二〇三五年远景目标的建议. https://www.gov.cn/zhengce/2020-11/03/content_5556991.htm

² 中央人民政府. 2021. 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. https://www.gov.cn/zhengce/2021-10/24/content_5644613.htm

³ 中央人民政府. 2022. 国家发展改革委 国家能源局关于印发《“十四五”现代能源体系规划》的通知. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-03/23/content_5680759.htm

⁴ 中央人民政府. 2023. 国家发展改革委 国家能源局关于印发《电力现货市场基本规则（试行）》的通知. https://www.gov.cn/gongbao/2023/issue_10846/202311/content_6917342.html

⁵ 王成山,焦冰琦,郭力,等. 微电网规划设计方法综述[J]. 电力建设, 2015(1): 8.

⁶ 陈晓华,王志平,吴杰康等. 微电网技术研究综述[J]. 黑龙江电力, 2023, 45(6): 471-480+506.

阵列，是风、光、水、储有效整合的典型示范。埃格岛系统总装机容量约为 184 千瓦，即使在天气条件恶劣的情况下，仍能满足岛上近百名居民一天的电力需求。此外，埃格岛微型电网还备有两台 70 千瓦的柴油发电机，用于应对不时之需。

(3) 城市微型电网。深圳光明新区的欣旺达光储微型电网包含 460 千瓦的光伏发电系统和 662.4 千瓦时的锂电池储能系统，用于照明、供暖、供电。欣旺达光储微型电网由公共连接点断路器控制，与园区电网相接，实现并网运行，光电富足时，由微型电网输送多余电力到工业用电电网；光电短缺时，由民用电网输送备用电力到微型电网。

(4) 住宅微型电网。纽约联合公寓城并网型微型电网由 3 个主要部分组成：燃气轮机、蒸汽轮机以及控制系统。整个电力系统总装机容量可以达到 40 兆瓦，能够满足区域内 6 万名居民、24 兆瓦的用电负荷峰值需求，剩余的 16 兆瓦发电力会被出售给大规模电网营利。

三、微型电网行业创新的前沿领域

微型电网具有巨大的发展潜力，但也在建造成本、项目选址、投资交付等方面面临着各种挑战¹。扩大微型电网规模，需要构建 10 个模块，这些模块也代表着微型电网行业创新的 10 个前沿领域。

(1) 太阳能微型电网。第三代微型电网主要包括太阳能混合发电系统，目前需要降低太阳能微型电网能源平准化成本，尝试第三代电网与主电网互联，统一规范数据收集最终整合到微型电网程序。

(2) 地理空间分析。大部分国家正在利用地理空间方法确定国内电气化规划范围，进而部署区域微型电网，同时数字化各电站属性。这一方法可以大幅削减微型电网选址相关的投资前成本，也可以帮助识别潜在的生产型客户促进电网营收。

(3) 企业生存。随着微型电网开始创造盈利，实现生产商与用户双赢，用户需求增长的不确定性成为阻碍开发商和投资者持续融资

¹ The World Bank. Mini Grids for Half a Billion People | Market Outlook and Handbook for Decision Makers.
https://www.esmap.org/mini_grids_for_half_a_billion_people_the_report

的关键风险，电网运营商需要根据需求的变化不断开发新的商业模式，借助数字化工具共享市场信息。

(4) 社区参与。社区参与不足已经成为多数能源项目不能长期发展的主要制约，鼓励社区参与可以刺激区域用户对微型电网服务的需求，扩大联网范围，最终提高用电需求，同时用户参与到电网系统的运维过程也可以降低成本。

(5) 通过地方和国际企业以及公用事业公司提供电网服务。随着微型电网数量和规模的增加，电网系统积累巨大利润潜力，这就需要财政支持和责任分担，例如争取政府补贴和建立公私伙伴关系。其中，地方企业专注了解当地规章制度和协调服务客户，国际企业适合跨国/地区复制电网项目，公用事业公司则由国家或城市财政投资。

(6) 融资。微型电网融资规模已经从 2000 年的百万美元增加到当前的数十亿美元，大型项目更能够吸引政府、金融机构、跨国企业参与。长远来看，随着私营资金的加入，公共资金投入比例应该逐渐减少，并针对不同开发商制定由股权、债务、补贴和风险分担机制等不同组合组成的融资方案。

(7) 人才和技能。人力资本与金融资本保持同步的情况下，才能持续扩大微型电网部署。开展针对主要利益相关者的培训能更好地建立操作技术娴熟、知识储备充足的电网系统，快速扩大电网规模。

(8) 多样电网交付模式。微型电网交付模式多样，需要协调政府、企业制定灵活的、避免重复监督和角色冲突的体制框架，原则上可用于应对各种电网交付模式。

(9) 优化配置。随着风、光、水、氢等可再生能源的发展，开发多种储能方式至关重要，同时需求的多样化也催促着微型电网行业积极响应电力调度要求，平衡供需关系，优化配置、优化运行。

(10) 行业监管。目前大部分国家/地区缺乏微型电网专用监管框架，最佳框架应该以最低的成本回收费率促进运营商提供最好的服务，同时监管框架应该灵活可预测，可以随着市场变化而改变。

四、微型电网关键技术及创新方向

微型电网关键技术包括规划设计、运行管理、保护控制、储能技术等，充分发挥微型电网潜力，需要围绕上述方面进行创新^{1,2}：

(1) 规划设计。项目的规划设计需要进一步协调可再生能源、储能系统、电力负载等，维持电力稳定供应，还需构建可靠的通信基础设施，保证多个电网之间的协调与协作以及平衡运行。同时，未来微型电网为了满足用户对电源、储能系统、电力负载的“即插即用”要求，可能需要重新设计整个系统，最终实现自主运行。

(2) 运行管理。发挥微型电网最大效益，需要识别不同电源和负载，差别制定运行管理机制，便于灵活应用于不同场景。为了保证电能质量和输电效率，需要保持短期功率平衡，研发实时监测和数据采集装置，保证系统稳定供电。此外，孤岛模式运行的微型电网需要配置专用控制装置，避免发动机在启动阶段突发故障。

(3) 保护控制。微型电网保护不能仅靠固定继电器，还需进一步研究制定在所有模式和转换过程中安全运行的保护策略。同时当微型电网组成元件具有不同特性时，独立供电的电网需要配套有效控制系统参数的保护控制技术。实现微型电网智能化还需要集成智能电表与网络控制。

(4) 储能技术。在微型电网中安装储能系统可以较好解决电网电力不稳定和不连续问题。未来储能技术研发仍需聚焦于延长电池寿命和存储时间、降低电能自损耗和成本、提高响应速度和稳定性等方面，同时更要注重新型电化学储能材料研发，满足高能密度、快充快放等要求，还要保证与微型电网系统的协同调度。

(秦冰雪)

¹ Uddin M, Mo H D, Dong D Y, et al. Microgrids: A review, Outstanding Issues and Future Trends[J]. Energy Strategy Reviews, 2023, 49: 101127.

² 和正强. 微电网关键技术及其相关问题的窥探[J]. 中国新通信, 2022, 24(23): 36-38.

● 1 月 11 日，国际能源署（IEA）发布《可再生能源 2023》报告¹。报告主要结论包括：①在中国太阳能光伏市场的推动下，2023 年可再生能源新增装机容量出现阶跃变化。②预计到 2028 年，全球电力结构将发生转变。在 130 多个国家的政策支持下，未来五年将新增近 3700 吉瓦的可再生能源装机容量。③美国、欧盟、印度和巴西仍然是陆上风电和太阳能光伏发电装机容量增长的亮点。④陆上风能和太阳能光伏发电的成本低于新建和现有化石燃料发电厂。⑤可变可再生能源的更快部署加剧了集成电网和基础设施建设的难度。⑥当前氢能项目的规划与实际执行之间存在不一致性。⑦生物燃料的部署正在加速并且更加多样化。

● 1 月 30 日，欧盟委员会批准了一项 5.5 亿欧元的意大利国家援助计划²。该援助计划将支持在工业过程中使用可再生氢替代甲烷及其他化石燃料，以促进向净零经济过渡，并向意大利工业部门生产过程中依赖化石燃料作为能源或原料的公司开放。与目前相比，符合条件的项目必须将生产过程中的温室气体排放量至少减少 40%，或将能源消耗至少减少 20%。为确保实现 40% 的温室气体减排量，从项目运营阶段开始，氢气使用量必须至少占总能源投入的 40%，到 2032 年至少占总能量投入的 75%，到 2036 年必须占总能源投入的 100%。

● 1 月 31 日，来自英国利兹大学和伦敦大学的科研团队首次全面评估了工业脱碳方案，并确定了主要脱碳方案与其减排潜力，以及关键低成熟度脱碳方案面临的挑战与未来研发需求³。部分关键低成熟度工业脱碳技术面临主要挑战和未来研发需求包括：①钢铁部门铁矿石电解+电弧炉：主要挑战是规模化生产，未来研发需求是惰性阳

¹ IEA. Renewable Energy 2023. <https://www.iea.org/reports/renewables-2023/>

² European Commission. Commission Approves €550 Million Italian State Aid Scheme to Support Investments for the Use of Hydrogen in Industrial Processes to Foster the Transition to a Net-zero Economy. https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_24_507

³ Joule. Assessing the Potential of Decarbonization Options for Industrial Sectors. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2542435124000266#sec4>

极开发；氢基等离子体还原：主要挑战是对不同的铁矿投料具有敏感性，未来研发需求是更好的阴极电极设计。②化工部门电蒸汽裂解炉，其面临的挑战为高电力消耗，未来研发需求是能效提高。③水泥部门硅酸镁制镁氧化物过程中的等离子体火炬，其面临的挑战为火炬容量小、碱度低，未来研发需求是进一步测试和开发增强材料（纤维增强聚合物复合材料）。

● 2月6日，欧盟委员会通过《工业碳管理战略》¹。其愿景是建立欧洲工业碳管理解决方案的单一市场，包括一个有利的商业和投资政策框架和基础设施规划。工业碳管理聚焦三项技术：①二氧化碳捕集与封存；②二氧化碳捕集与利用；③从大气中去除二氧化碳。该战略旨在促进这些技术开发，并建立支持这些技术的监管和投资框架，以实现到2030年每年至少封存5000万吨的二氧化碳，到2040年后，工业碳管理应成为欧盟经济体系的一个组成部分。

● 2月12日，美国能源部宣布将提供1亿美元支持碳去除技术中试示范项目²。项目旨在通过先进技术的中试规模示范以及详细的监测、报告和核查，以支持美国能源部的“负碳攻关”计划。此次资助主要侧重以下三个领域：①小型生物质碳去除与封存试点项目；②小型矿化试点项目；③多途径二氧化碳去除试验设施开发。

● 2月15日，欧盟推出新版电池战略研究和创新议程³。欧洲电池技术与创新平台“电池欧洲”（Batteries Europe）和欧洲电池伙伴协会（BEPA）共同发布新版电池战略研究和创新议程，提出欧洲电池研发的关键优先事项，涵盖原材料、先进材料、设计、制造、交通应用、固定储能应用、拆卸与回收等七大方向，该议程还提出了提高欧洲电池价值链竞争力的六项必要措施。

¹ European Commission. Towards an Ambitious Industrial Carbon Management for the EU. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=COM%3A2024%3A62%3AFIN&qid=1707312980822>

² DOE. DOE Announces Up to \$100 Million for Pilot-Scale Testing of Advanced Carbon Dioxide Removal Technologies. <https://www.energy.gov/fecm/articles/doe-announces-100-million-pilot-scale-testing-advanced-carbon-dioxide-removal>

³ BATT4EU. Batteries Europe and BEPA Launch Strategic Research and Innovation Agenda, Setting out Key Priorities for European Battery R&I. <https://bepassociation.eu/batt4eu-publishes-europes-new-strategy-on-battery-innovation/>

● 2 月 22 日，英国谢菲尔德大学等机构发布的研究指出，大规模造林反而会使森林减碳效益降低近三分之一¹。研究人员利用先进的气候模型——UKESM1 和 CESM2，模拟未来情景下植树造林对气候变化和二氧化碳去除的影响。结果表明，由于植树造林改变了大气成分、降低了地表反照率，两种变化的叠加间接抵消部分森林减碳效益。因此，植树造林措施应与其他减碳战略（如减少化石燃料排放）一起实施，才能实现吸收大气中二氧化碳的最终目标。

● 2 月 27 日，英国能源安全和净零排放部宣布提供 2100 万英镑支持 7 个低碳氢项目的开发和部署，可使英国氢产能增加 875 兆瓦²。项目具体内容如下：①Pembroke 200 兆瓦电解槽设施二期，通过低碳氢生产帮助南威尔士工业集群脱碳，预计 2030 年前实现运营，每年可减少 16 万吨二氧化碳当量的排放。②Grenian Hydrogen Speke 电解制氢项目，旨在通过前端工程和设计研究，包括核心电解槽技术（整流器、干燥器等）和所有相关的电缆、控制和管道网络，实现氢气生产和供应，预计 2028 年底前实现商业运营，每年可减少约 6.1 万吨二氧化碳当量的排放。③Sullom Voe 终端氢能项目，通过设得兰群岛丰富的可再生资源 and 先进的电解技术生产氢气，预计初始装机规模为 50 兆瓦，后续将扩大到 300 兆瓦。④Tees 绿色甲醇项目，通过安装 200 兆瓦的电解槽生产氢，结合捕集的二氧化碳合成甲醇，用作大型货船等清洁燃料，计划 2030 年开始运营。⑤阿伯丁氢能中心一期，分三个阶段开发，建成一个可扩展的氢生产、存储和分配的城市氢中心。⑥Tees 氢谷汽车生态系统，通过建造加氢站，促进氢燃料汽车部署。⑦Suffolk 氢能项目，计划为 Sizewell C 核电站的服务车辆提供绿氢，并构建氢生产和加氢站网络。

¹ *Science*. Chemistry-albedo Feedbacks Offset up to a Third of Forestation's CO₂ Removal Benefits.
<https://www.science.org/doi/10.1126/science.adg6196>

² Department for Energy Security and Net Zero. Boost for UK Hydrogen as Government Backs World-Leading Industry. <https://www.gov.uk/government/news/boost-for-uk-hydrogen-as-government-backs-world-leading-industry>

双碳情报动态

主办：中国科学院发展规划局

中国科学院文献情报中心

出版：“双碳行动情报支撑与战略研究”任务组

编委会主任：翟立新

编委会副主任：刘细文 陶宗宝 曲建升

编委会成员：蔡睿 蔡翔舟 柴麒敏 陈方 陈伟 冯志纲

(姓氏拼音排序) 甘泉 郭剑锋 江会锋 李扬 刘晓东 刘艳丽

陆颖 马廷灿 牛振恒 任珩 孙玉玲 唐川

王金平 王小伟 王学昭 王征 岳芳 曾静静

张贤 张嫻 张香平 赵亚娟 赵晏强 郑军卫

朱庆山

主 编：曲建升

副 主 编：甘泉 刘晓东 王小伟

陈伟 曾静静 孙玉玲 陈方

本期责编：孙玉玲

电子邮箱：sunyl@mail.las.ac.cn

联系人：刘燕飞

电子邮箱：liuyf@llas.ac.cn