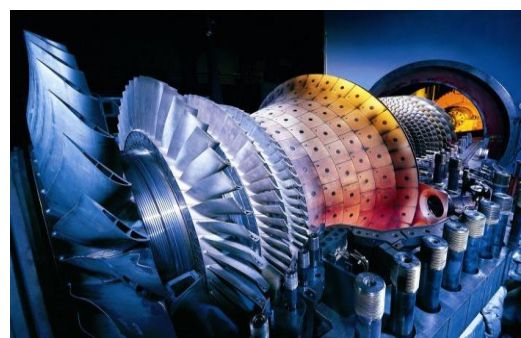


先进能源科技动态监测快报



本期重点

- BNEF：到 2040 年全球储能累计装机容量预计达 942 GW
- 欧盟总结电池联盟成立一周年进展
- IRENA：增强电网灵活性有助于促进能源转型
- DOE 计划未来 5 年为储能联合研究中心续投 1.2 亿美元
- 新型液态电解质助力氟离子电池首次实现室温下稳定运行

主管：中国科学院文献情报系统学科情报服务协调组

主办：中国科学院武汉文献情报中心



中国科学院武汉文献情报中心
Wuhan Library, Chinese Academy of Sciences
湖北省科学图书馆
Hubei Sciences Library



《先进能源科技动态监测快报》

中国科学院武汉文献情报中心

湖北省武汉市武昌区小洪山西 25 号 (430071)

网址:

<http://www.whlib.ac.cn>

联系人:

郭楷模

guokm@whlib.ac.cn

电话:

027-87199180



先进能源情报网

<http://energy.whlib.ac.cn>



先进能源科技战略情报研究中心

微信公众号



先进能源情报网微信公众号

中国科学院文献情报系统先进能源情报网简介

中国科学院文献情报系统先进能源情报网是在中国科学院文献情报系统学科情报服务协调组的整体组织和指导下,由中国科学院武汉文献情报中心牵头组建,联合中国科学院文献情报系统能源领域相关研究所,共同搭建的情报研究资源共享及协同服务的非营利性情报研究及服务团体。先进能源情报网将汇聚中科院文献情报系统内与领域相关的战略情报研究人员、学科情报人员、研究所科研管理人员、研究所文献情报人员,以及相关的管理和学科专家,通过“协同开展情报研究服务、组合共建情报产品体系、促进情报资源交流共享、提升整体情报保障能力”的工作方式,创新院所协同的情报研究和服务保障模式,促进情报资源的共享、情报需求和情报供给的对接、情报技术方法的合作开发,实现情报能力的扩散和提升,进而对中国科学院各个层面(院层面、所层面、项目团队层面及科研人员层面)的重要情报需求提供坚实保障。

先进能源情报网成员单位

成员单位	单位名称
组长单位	武汉文献情报中心
副组长单位 (排名不分先后)	合肥物质科学研究院 大连化学物理研究所 青岛生物能源与过程研究所 广州能源研究所
成员单位 (排名不分先后)	上海高等研究院 山西煤炭化学研究所 上海应用物理研究所 兰州近代物理研究所 广州地球化学研究所 过程工程研究所 电工研究所 工程热物理研究所 武汉岩土力学研究所 武汉物理与数学研究所 苏州纳米技术与纳米仿生研究所 福建物质结构研究所

目 录

决策参考

BNEF：到 2040 年全球储能累计装机容量预计达 942 GW	2
欧盟总结电池联盟成立一周年进展	3
IRENA：增强电网灵活性有助于促进能源转型	5

项目计划

DOE 计划未来 5 年为储能联合研究中心续投 1.2 亿美元	8
DOE 资助 750 万美元支持大型电力变压器研发	9

前沿与装备

新型液态电解质助力氟离子电池首次实现室温下稳定运行	11
新型抗溶剂制备钙钛矿薄膜实现超宽时间处理窗口	12
钌金属单原子电催化实现常温常压高效还原固氮	13
新型 NASICON 正极材料实现钠电池高效稳定运行	13

本期概要

彭博新能源财经（BNEF）发布《2018 全球储能市场展望》报告，对全球储能市场的未来发展态势进行了系统分析展望：在经历了本世纪前 10 年的大幅下降后，预计 2018-2030 年间公用事业规模的储能资本成本将再下降 52%。储能系统成本的持续下降将推动全球储能市场在未来 22 年（2018-2040）蓬勃发展，预计到 2040 年全球储能累计装机容量将达到 942 GW，届时全球累计储能装机容量将占到电力装机总量的 7%。在预测期内（2018-2040 年），中国、美国、印度、日本、德国、法国、澳大利亚、韩国、英国等九个国家将占到全球储能新增装机的三分之二。在短期内，韩国将主导市场，美国将在 21 世纪 20 年代初超越韩国，但在 21 世纪 20 年代末将被中国超越，然后持续到 2040 年。

欧盟委员会发布《欧洲电池联盟一周年进展》报告，总结了“欧洲电池联盟”成立一周年取得的进展：（1）在打造欧盟电池产业生态系统方面，在不到一年的时间里，欧洲 InnoEnergy 创新与技术研究院（EIT）成功动员和引导了近 260 家研究企业和机构参与到联盟中来；此外多个新工厂项目落地并进入试产阶段，如优美科公司（Umicore）投资了电池正极材料生产工厂 Nysa 项目、瑞典电池生产商 Northvolt 领导的电池示范生产线已经开建、巴斯夫公司正在计划扩大工厂增加产能等。（2）在制定战略行动计划方面，欧盟通过并实施了“电池战略行动计划”，涉及原材料供应保障、完整生态系统构建、产业领导力强化、高技能劳动力培训、可持续产业链打造、政策和监管强化等六个方面的活动。

国际可再生能源机构（IRENA）发布《能源转型之电网灵活性》报告指出，全球能源系统加速向绿色低碳转型对电网发展提出了全新的要求：伴随可再生能源部署速度和规模不断增加，使其在电网中的占比不断增加。然而当前的电力系统无法同等消纳随之产生的可再生能源电力，同时可再生能源固有的波动性给电网稳定性带来了潜在的威胁，上述问题给电力系统运营商和监管当局带来了严峻挑战。而对现有的电力系统进行全方位的改进和升级以增强其灵活性则是应对上述挑战的关键。为此报告提出了从技术和运营两方面改善电网灵活性的建议。详见正文。

美国能源部（DOE）宣布将在未来五年内为储能联合研究中心（JCESR）第二期投入 1.2 亿美元，以推进电池科学和技术研究开发，涵盖了五大主题，包括：（1）液体溶剂化科学，主要研究静置状态溶剂化壳的平衡结构、液体溶剂化对电荷界面和充电状态等扰动的动态响应；（2）固体溶剂化科学，主要涉及柔性溶剂笼、硬质脆性溶剂笼；（3）流动性氧化还原科学，如变革性新型氧化还原剂设计；（4）动态界面的电荷转移，如相邻电极和电解质组成的自发界面的演变过程；（5）材料复杂性科学，通过计算机模拟缺陷晶体和长程无序玻璃。

美国加州理工学院 Simon C. Jones 教授课题组联合本田研究所、美国航空航天局喷气推进实验室共同开发了一种新型氟离子液态电解质：该电解质在低温下具有高离子导电率和宽工作电压，克服了常规氟离子电池温度限制，首次实现了在室温下稳定可逆的充放电循环，为开发超越锂离子电池的新电池体系开辟了新途径。

BNEF：到 2040 年全球储能累计装机容量预计达 942 GW

11 月 6 日，彭博新能源财经（BNEF）发布《2018 全球储能市场展望》报告¹指出，储能系统成本的持续下降将推动全球储能²市场在未来 22 年（2018-2040）间蓬勃发展，预计到 2040 年全球储能累计装机容量将达到 942 GW，其中离网储能装机占比 53%，期间累计吸引投资将达到 6200 亿美元。报告主要结论如下：

在经历了本世纪前 10 年的大幅下降后，预计 2018-2030 年间公用事业规模的储能资本成本将再降低 52%。毫无疑问，储能系统价格的下降将有助于储能在可再生能源并网领域的应用，帮助风电与光伏发电解决发电不稳定和间歇性问题。储能正在成为提高电网稳定性和电力资产利用率的重要解决方案。此外，其还将显著改变电动汽车的发展进程，促进电动汽车的广泛普及。

到 2040 年，全球累计储能装机容量将占到电力装机总量的 7%，并且直到 2030 年代中期大部分装机将由电网规模储能项目构成。但此后，集成式用户侧储能项目（BTM）的总规模将超过电网级储能项目的规模。尽管集成式用户侧储能项目颇具应用前景并且可以逐渐替代电网级储能项目提供电力系统服务，但考虑到大多数国家的市场规则修改和落实到位仍需时日，因此集成式用户侧储能项目的大规模普及应用仍需要一段时间。

在预测期内（2018-2040 年），中国、美国、印度、日本、德国、法国、澳大利亚、韩国、英国等九个国家将占到全球储能新增装机的三分之二。在短期内，韩国将主导市场，美国将在 21 世纪 20 年代初超越韩国，但在 21 世纪 20 年代末将被中国超越，然后持续到 2040 年。

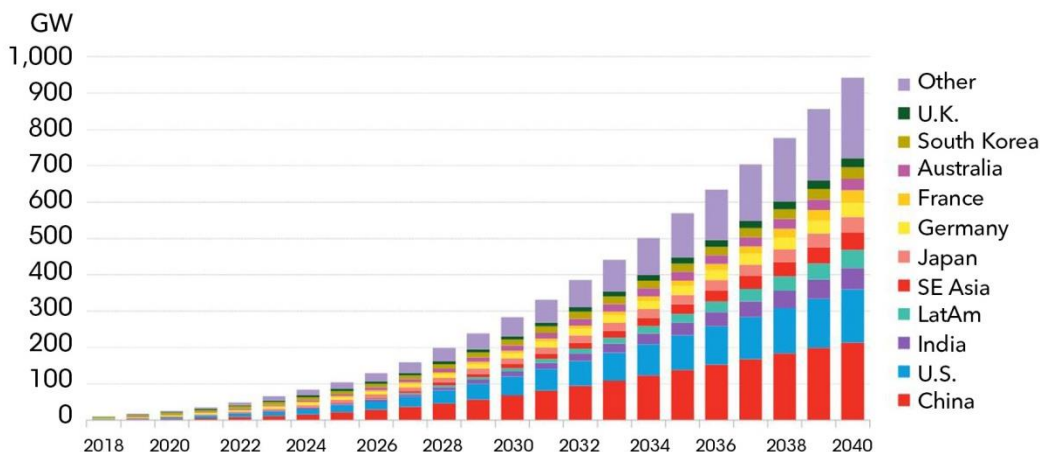


图 1 2018-2040 年全球储能累计装机容量变化态势（单位：GW）

¹ Energy Storage is a \$620 Billion Investment Opportunity to 2040.

<https://about.bnef.com/blog/energy-storage-620-billion-investment-opportunity-2040/>

² 不包括抽水蓄能。

从地区来看，到 2040 年亚太地区兆瓦级储能项目的装机容量将占到全球兆瓦级储能项目总容量的 45%，欧洲、中东、非洲及除美国以外的美洲其他国家的兆瓦级储能项目装机容量总计将占到全球 29% 的份额。在非洲和部分亚洲地区，大型与小型户用光伏储能系统将变得越来越普及。目前偏远地区的微电网市场尚未形成，但各公用事业公司越来越多地意识到，在偏远地区建造光伏、柴油发电与电池一体化的微电网所需的成本要比扩建大电网或是安装化石燃料发电机组要低得多。

在预测期内，居民及工商业用户侧储能市场将成为推动全球储能需求增长的最大动力，该领域将在 2030-2040 年迎来发展高峰。由于用户侧储能应用能够帮助用户降低零售电费开支、降低需量电费³，且储能系统具有便于集成的优点，因此如果政府能够出台政策，支持储能系统集成与相关服务的发展，储能市场发展速度将进一步加快。

（郭楷模）

欧盟总结电池联盟成立一周年进展

近日，欧盟委员会发布《欧洲电池联盟一周年进展》报告⁴指出，自 2017 年 5 月欧洲电池联盟成立以来，联盟已在打造具有较强竞争力、可持续、创新的电池价值链方面取得了诸多进展。为了更好地解决关键问题和引导政策制定，进一步推进欧盟电池技术进步，强化欧盟在汽车和新能源技术领域的全球领先地位，提高其全球竞争力，实现可持续发展目标和循环经济，报告系统总结了目前已取得的进展，主要内容如下：

1、聚合产学研打造欧盟电池产业生态系统

在不到一年的时间里，欧洲 InnoEnergy 创新与技术研究院（EIT）成功动员和引导了近 260 家企业和研究机构参与到联盟中，这些单位覆盖了电池产业链创新的各个环节。并且，它们已经做出承诺投资于电池产业链项目，并将其确定为首要任务，涵盖领域包括电池制造、电池二次利用、生态标签、降低制造过程碳足迹、电池回收利用交易所、汽车到电网以及强化校企合作以制定相关的教育和培训项目。已落地并进入试产阶段的项目包括：

（1）电池材料

优美科公司（Umicore）宣布于 2018 年 6 月在波兰 Nysa 投资建设电池正极材料生产厂项目。该工厂将采用最新技术进行建设并于 2020 年底交付。此外，Umicore 还将在比利时建设一个新的工艺开发中心用于开发和规模化高效生产技术。巴斯夫

³ 需量电费：根据电价表或供电协议的有关条款，按需量列入账单的总金额，适用于大工业客户。需量电费可以按变压器容量计费，也可按最大需量计费。凡变压器利用率达到 70% 及以上者，不论容量大小，按变压器容量计算电费；不足 70% 时，按最大需量计算电费。

⁴ EU Battery Alliance: Major progress in establishing battery manufacturing in Europe in only one year.
http://europa.eu/rapid/press-release_IP-18-6114_en.htm

公司计划扩大其在欧洲的产能。索尔维集团（Solvay）正在致力于开发高效电池所需要的先进电解质、电极粘接剂和隔膜。该公司正考虑在欧洲建设一座工厂。

（2）电池制造

瑞典电池生产商 Northvolt 正在领导建设一条电池示范生产线（欧洲投资银行提供了 5250 万欧元贷款），预计将于 2019 年下半年投入生产。Northvolt 公司还获批在瑞典谢莱夫特奥建设一个更大规模的电池生产工厂，目标到 2023 年将产量扩大到 32 GWh。宝马集团、Northvolt 公司和 Umicore 公司联合组建了一个技术联盟，以加强合作推进完整和可持续的电动汽车电池价值链建设工作。电池制造商 SAFT 于 2018 年 2 月宣布将与 Solvay 公司、Umicore 公司、Manz 公司以及其他企业联合开发和生产电池，包括先进锂离子电池和固态锂离子电池技术等。西门子公司正致力于提供解决电池全产业链制造挑战的方案，并于近期已经开始中试欧洲第一条全自动化和数字化的生产线。除了德国企业和研究机构外，像意大利 FAAM 集团和捷克 MES 公司等欧盟其他成员国的制造商也纷纷在建设储能电池厂。

2、制定战略行动计划开展六大行动

2018 年 5 月欧盟通过“电池战略行动计划⁵”，从保障原材料供应、构建完整生态系统、强化产业领导力、培训高技能劳动力、打造可持续产业链、强化政策和监管等六个方面开展行动，在欧盟建立有竞争力、创新和可持续的电池产业。正在执行的行动计划包括：

（1）政策和监管

目前，欧盟正在加速制定一项全新监管框架，以规定在电池投放到欧洲市场时必须遵守的规范和可持续标准。有关初步研究正在准备中，并且第一次利益相关方公开研讨会将于 12 月 20 日在布鲁塞尔举办。对于电池生态系统，欧盟联合研究中心也公开了一项关于电池相关标准的调查结果。关于欧盟电池管理规范的报告将在今年年底公布。该规范将阐述废旧电池的收集、循环利用相关准则。

（2）原材料

11 月 14 日在布鲁塞尔召开电池原材料高级会议，欧盟委员会同各成员国就电池原材料相关议题开展对话，包括欧洲电池原材料的勘探、开发和循环利用等问题。同时，委员会还正在号召工业界在欧盟境内建立电池原材料精炼能力。

（3）跨区域合作

10 月 8 日召开了一场关于电池跨区域合作的研讨会。斯洛文尼亚提议与 7 个地区开展先进电池材料合作。该合作项目除了得到欧盟委员会特别小组的支持外，还可以从外部咨询服务中受益，以加快并扩大商业化活动。另一个由意大利伦巴第地区牵头的电池回收再利用合作项目在建立循环回收中试网络上进展良好。目前更多

⁵ Strategic Action Plan on Batteries. https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:0e8b694e-59b5-11e8-ab41-01aa75ed71a1.0003.02/DOC_3&format=PDF

的地区表示有兴趣加入这些合作项目。这些合作项目受到了欧洲区域发展基金的支持。

（4）研发

2019 年 1 月 24 日，“地平线 2020”框架计划将投入 1.14 亿欧元用于电池相关研究，这些经费将有效支持欧洲电池联盟的发展。到 2020 年，预计将再投入 7000 万欧元用于电池相关研究项目。欧盟委员会还有意在“地平线欧洲”框架计划下提出电池合作伙伴关系项目。同时，欧盟正致力于建立一个全新的欧洲技术与创新平台，推进电池研究优先领域、制定长期愿景、阐述战略研究议程与发展路线。

（5）劳动力技能

在“伊拉莫斯+（Erasmus+）项目⁶”框架下，包括电池行业在内的 6 个行业技能联盟于 2018 年 10 月底成立，联盟将确定本行业现存技能缺口和未来技能需求，制定行业技能发展战略，研究欧洲行业核心技能概况和核心职业技能培训课程，起草国家和地区行动计划。

（陈栋）

IRENA：增强电网灵活性有助于促进能源转型

11 月 13 日，国际可再生能源机构（IRENA）发布《能源转型之电网灵活性》报告⁷指出，全球能源系统正在加速迈向绿色低碳的未来，伴随这一转变可再生能源部署速度和规模不断增加，尤其是风能和太阳能光伏发电，使其在电网中的占比不断增加。然而当前的电力系统无法同等消纳随之产生的可再生能源电力，同时可再生能源固有的波动性给电网稳定性带来了潜在的威胁，上述问题给电力系统运营商和监管当局带来了严峻挑战。在此背景下，对现有的电力系统进行全方位的改进和升级以增强其灵活性，以应对日益增加的波动性可再生能源高比例并网带来的电网稳定性冲击问题显得尤为重要。为此，报告提出了提高电网灵活性的建议，并提出评估电网灵活性的新工具 FlexTool，该工具目前已用于哥伦比亚、巴拿马、乌拉圭和泰国。报告要点如下：

1、能源转型中的灵活性需求

•以化石燃料为主体的能源系统正逐步转变成以可再生能源为主体的能源系统，意味着将消纳更多可再生能源电力，这就要求电网具备更强灵活性。IRENA 的全球能源转型路线图⁸表明，到 2050 年，可再生能源将占全球一次能源供应总量的 60%。能源系统向可再生能源为主导转变带来了一系列挑战，因为高占比的波动性可再生

⁶ Erasmus+是欧盟在 1987 年设立的人才交流项目，旨在推动欧洲与发展中国家高等教育机构间的合作，促进人才、知识以及技能等方面的交流。

⁷ Power system flexibility for the energy transition.

<https://www.irena.org/publications/2018/Nov/Power-system-flexibility-for-the-energy-transition>

⁸ 详情参见本刊 2018 年度第 8 期内容。

能源（VRE）增加了对供需平衡的要求。在传统的不包括 VRE 或 VRE 比例较低的电力系统中，通常由电力供应方提供灵活性，通过基于高效循环系统的火力发电（例如开式循环燃气轮机）、灵活的可再生能源（如水力发电）和抽水蓄能以及储能电池等平衡需求波动并提供备用容量。在过去五年中，太阳能和风能变化的影响已经开始在许多电力系统中体现：多个国家成功实施了若干复杂程度、时间尺度、有效性和成本各有特点的解决方案，这些方案促进了高比例 VRE 在大型电力系统（如丹麦）、吉瓦级电力系统（如爱尔兰）和小岛系统（如澳大利亚的金岛）中的整合。解决方案主要包括分布式风能和光伏发电、集中式风能和光伏发电、电力系统灵活性改造、改善电网基础设施、部署先进的储能系统、开发需求侧管理计划以及提高火力发电厂热效率。

•为了进一步推进和实现能源转型目标，需要充分发挥能源系统的灵活性，而需求侧响应管理和终端用能耦合将在发挥系统灵活性中发挥关键作用。通过使用电阻制热和热泵来供暖，可以显著提高需求灵活性。此外，区域供热系统中存储着大量热能，可作为电力系统的能量存储方式，提高需求灵活性，降低成本和排放，提高电力系统可靠性。公路货运、航运和航空等部门无法使用电缆输送的电力，只能靠燃料供能。一些工厂的加工过程也需使用燃料而非电力，如氨、聚合物生产需要氢以及某些高温工艺需要燃料。在 VRE 占比较高的系统，通过可再生电力生产氢等无碳燃料能为能源部门脱碳发挥重要作用。供暖方面，氢气生产可以为电力系统提供灵活性（取决于电解槽的类型），最重要的是，将氢气混合到天然气网络中可以实现可再生电力的季节性储存。

•许多国家需要将太阳能和风能利用率提高到 60% 以上，以实现未来能源可持续发展。如丹麦和爱尔兰是风能并网的领跑者，风电份额分别为 44% 和 27%，最大瞬时渗透率分别超过需求的 150% 和 60%。两国的电力系统都经历了一个转型过程，其中的经验教训包括：1）提前设计灵活性比电力系统出现灵活性问题后再寻求解决方案更为经济；2）通过释放现有电力系统的灵活性而不是投资新的昂贵设施，可以整合大量的 VRE；3）在选择解决方案时，必须考虑项目开发时间，特别是许可和施工时间；4）灵活性的规划需要采用复杂的工具和方法，这些工具和方法随着政策、经济和技术/科学的发展而变化。

2、电力系统灵活性

传统电力系统灵活性主要针对非波动性电力来源。传统电力系统不包含 VRE，其主要变化来源是电力需求，这取决于气候和社会经济。电力系统运营商通过电力市场辅助服务，应对发电机随机停运、负荷波动、线路故障等导致的电力系统失衡以及由于需求预测错误导致的实时不平衡。为系统提供基本负荷的发电机组，如煤电、生物质发电和核电，多使用蒸汽轮机发电，循环能力有限。峰值发电机专为灵

活运营设计，通常是燃气轮机和内燃机。现代联合循环燃气轮机和水力发电机组被称为中间发电机，可用于提供基本负荷或峰值负荷。

随着波动性可再生能源的份额上升，电力系统运营复杂性也在增加。在 VRE 份额较低时，净负荷和需求之间差异很小。随着 VRE 的增加，两者之间出现越来越明显的差异。灵活性不足的电力系统可能会削减 VRE，在极端情况下会出现负荷损失。在凌晨以及光伏发电高峰期，则可能出现电力过剩，并导致电价下降。除了电力过剩的经济影响之外，VRE 瞬时份额过高还会造成电网惯性不足的可靠性风险，通常通过削减 VRE，减少其输出作为缓解措施，但这会产生经济损失和环境、电力、燃料的负面影响。高比例的 VRE 还会导致电网净负荷增长速度变快，为系统带来更大考验。在应对系统不确定性方面，电力系统监管要求运营商时刻保证一定数量的储备电力，随着 VRE 占比提高，对 VRE 发电的预测误差成为不确定性的主要来源。另外，太阳能和风能的不确定性还从时间尺度上（几秒钟到几个月）影响系统运行。例如，几秒钟的变化会影响系统的频率调节能力，15 到 30 分钟的变化会影响运行储备的负荷跟踪和规模，季节性变化会影响水电中期存储规划和电网长期容量规划。

灵活的电力系统应在所有时间尺度上经济、高效、可靠。主要包括如下特征：1）满足峰值负荷和峰值净负荷，避免负荷损失；2）始终保持供需平衡，确保提供足够的出力调节能力、快速启动能力以及在低净负荷下运行的能力；3）具有足够的存储容量以平衡高 VRE 发电时段和高需求但低 VRE 发电的时段；4）整合发电以调整需求应对供应短缺或电力过剩的时段；5）通过始终保持足够的储备供应，以减轻电力系统失稳；6）在精心设计的市场下运营，其灵活性不受市场不足的影响。

3、电网灵活性来源

•技术灵活性。技术灵活性与系统物理结构密切相关，主要包括：（1）**供应侧灵活性。**这与发电技术密切相关，如水力发电机和开式循环燃气轮机是最灵活的常规发电机之一。（2）**储能。**抽水蓄能电站、飞轮和压缩空气储能（CAES）在发电突然损失的情况下可以作为第一道防线，并且减少系统对火力发电的依赖。在几秒到几分钟的时间范围内，主要通过电池和抽水蓄能电站提供储备。在较长时间内，通过抽水蓄能电站、CAES、长时储能电池和蓄热等技术提供灵活性。此外，电池还可以提供广泛的服务，例如安装在电动汽车中取代化石燃料，在微型电网中实现高比例 VRE。在 VRE 集成水平很高的情况下，还可利用可再生能源生产的氢气为工业、建筑、运输等部门提供燃料，下游的天然气基础设施、氢供应链等行业可作为 VRE 季节性存储的缓冲器。（3）**需求侧灵活性。**需求响应可以与储能共同提高系统灵活性，通过价格信号或长期直接负荷控制协议调整用户电力需求。通过使用时间定价机制，在电力过剩期间调整需求以支持 VRE 发电。电力公司通过直接负荷控制减少 VRE 不确定性对电网的影响，一些电力市场鼓励负荷聚合商参与其中，提升

系统灵活性。（4）**电网灵活性**，通过强大传输网络平衡较大区域的供需；通过跨境互连确保国家或地区电力交换的灵活性（如果市场允许）；通过先进控制技术以加强系统通信，实现发电机的自动控制、需求响应的自动激活或先进电流控制（如柔性交流输电系统<FACTS>）。图 1 显示了提高系统灵活性的技术。

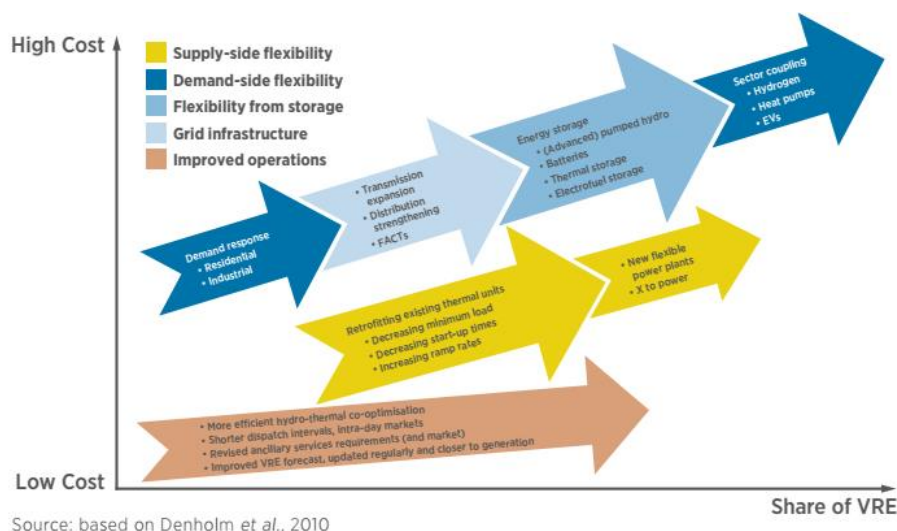


图 1 增强系统灵活性的技术选择

•**运营灵活性**。除了电网中各项技术的限制之外，运营灵活性还与监管和市场环境有关。如大型国有电力系统被分解为各省份独立运营，通过集中调度或电力市场管理电力交换，某些情况下由于缺乏有效协调导致电力交换受到限制，抑制了系统灵活性。通过中央调度和建立根据价格信号安排电力交易的市场是解决该问题的较好方法，区域定价和节点定价也有助于解决传输拥堵问题，避免重新调度。电网运营决策应确保系统需求、技术限制和盈利之间的平衡。

（岳芳 郭楷模）

项目计划

DOE 计划未来 5 年为储能联合研究中心续投 1.2 亿美元

近日，美国能源部（DOE）宣布将在未来五年内为储能联合研究中心（JCESR）第二期投入 1.2 亿美元，以推进电池科学和技术研究开发⁹。未来五年，阿贡国家实验室领导的 JCESR 将基于对材料原子和分子级别理论认知，采用“自下而上”模式开发用于不同电池的新型材料。其目标是设计和开发超出当前锂离子电池容量的多价化学电池，并研究用于电网规模储能的液流电池新概念。JCESR 将在五个方向进行重点研究以实现这些目标，包括：

液体溶剂化科学，重点研究内容包括：（1）静置状态溶剂化壳的平衡结构；（2）

⁹ Department of Energy Announces \$120 Million for Battery Innovation Hub.
<https://www.energy.gov/articles/department-energy-announces-120-million-battery-innovation-hub>

液体溶剂化对电荷界面和充电状态等扰动的动态响应。该研究主要基于 JCESR 之前五年在电解质基因组中引入并开发的有机分子模拟，以及界面处溶剂化和去溶剂化现象的原位表征。

固体溶剂化科学，开发所有固体电解质的溶剂笼机理，重点内容包括：（1）柔性溶剂笼，如膜和聚合物；（2）硬质脆性溶剂笼，如玻璃和水晶。该研究将大量借鉴 JCESR 之前五年通过材料项目开发的晶体模拟技术，并将进行原位 X 射线分析、核磁共振和传输研究。固体的固定溶剂笼概念能够与液体中的流动溶剂化壳相比较，从这个角度来看，液体电解质是固体电解质中柔性溶剂笼的终极。

流动性氧化还原科学，自下而上构建新型氧化还原剂，将新型构造的原子和分子结合起来，实现更高工作电压、更高移动性、更长寿命、更高安全性和更低成本。重点内容包括：（1）变革性新型氧化还原剂设计；（2）引入智能、响应和再生特性。该研究通过开发氧化还原活性聚合物或氧化还原剂，为 JCESR 之前五年提出的液流电池新概念奠定分子基础。

动态界面的电荷转移，结合计算机模拟和界面结构原位表征技术，预测和合成具有电极保护、选择性离子电导率和高稳定性的新界面。重点研究内容包括：（1）了解相邻电极和电解质组成的自发界面的演变过程；（2）研究界面定向生长以达到特定性能标准。

材料复杂性科学，通过计算机模拟缺陷晶体和长程无序玻璃，并在表征中研究如何控制材料缺陷浓度及无序程度。重点研究内容包括：（1）设计缺陷和无序材料以实现目标性能；（2）指导合成以实现目标缺陷浓度和无序程度。

编者按：JCESR 是 DOE 最重要的储能技术研究中心之一，于 2012 年 12 月成立，汇集了多个学科和十几个领先实验室及高校的顶级专家，以解决储能领域的一系列重大科学挑战。在成立的前五年中，JCESR 取得了一系列的研究成果，包括：示范了一种用于液流电池的新型隔膜；在用双电荷镁代替单电荷锂的电池科学基础方面取得了实质性进展；开发了计算工具，利用该工具筛选出了超过 24000 种潜在的电解质和电极化合物，用于新的电池概念和化学品。此外，该中心还产出了 380 多篇经过同行评审的论文，申请了 100 多项发明专利，成立了三家初创公司。

（岳芳 郭楷模）

DOE 资助 750 万美元支持大型电力变压器研发

11 月 14 日，美国能源部（DOE）宣布为电网领域相关的 4 个项目投入 750 万美元资金¹⁰，旨在利用先进的传感、信息通信技术研究开发更加灵活、更加安全、更加智能的大型电力变压器（LPT），增强电网抵御各类网络 and 物理攻击的能力，

¹⁰ Innovative Research to Develop the Next Generation of Large Power Transformers.
<https://www.energy.gov/articles/department-energy-invests-75-million-strengthen-resilience-nation-s-power-grid>

增强整个电网的弹性和韧性，实现电网的可靠、安全、经济、高效运营。本次资助的 4 个研发项目具体内容参见表 1。

表 1 DOE 大型电力变压器研发项目具体内容

项目名称	具体内容	资助金额/ 万美元
用于弹性和可控电网的 5MVA 模块化可控变压器 (MCT) 示范	•设计、制造和测试 5MVA、24kV/12kV 模块化可控变压器 (MCT) 并进行示范 •完成三相中性点钳位转换器的详细设计，包括启动、关闭、正常运行以及系统和转换器故障情况下的运行等。该设备还将进行广泛测试，为设计人员和客户提供设计验证，并为未来现场测试提供 MCT 部署的适应度 •将与公用事业合作伙伴合作开发特定用例和方案，以评估 MCT 的性能，并与传统 LPT 进行成本效益比较	179.8135
模块化混合固态变压器 (H-SST)	•设计和测试 500kVA 混合固态变压器 (H-SST)，作为下一代灵活的 LPT 全尺寸模块。选取的 H-SST 功率等级和电压等级适用于构建输出电压为 4kV、35kV、69kV 或 115kV、138kV 的 LPT •示范效率超过 98% 的 H-SST，以及电压调节、功率流控制和高级保护等功能。 •开发和验证 H-SST 模型用于在各种电压和功率水平下模拟 LPT •采用先进的传感器技术从 H-SST 收集数据以监控 H-SST 的运行状况，保证长期可靠	173.0824
下一代模块化灵活低成本 SiC 基高频链变压器	•设计、制造和测试 SiC 高频链大功率变压器 (HFL-LPT) 三相模块，用于 100 MVA、115 kV 的 HFL-LPT 设计，其能量转换效率达到 99%，与传统的低频大功率变压器 (LPT) 相比，体积和重量都大大减小，与固态变压器拓扑结构相比，器件数量减少了 50% •使用模块化 HFL-LPT 和模块间有限通信的模块化功率控制方法探索和示范电压、功率和频率变化机制，还将研究电压和有功/无功补偿、保护和过载机制	149.9976
世界首台灵活大型电力变压器的设计、部署和测试	设计、构建和测试 60 MVA 的灵活 LPT 原型，以验证该概念的可行性及其在运行中的性能。该原型器件将在一个 230 千伏的变电站进行现场示范，主要包括：1) 增加在线可调漏电电阻；2) 在高压变电站进行现场示范以证明其制造可行、符合行业要求和标准，确定实时运行性能；3) 开发增强型变压器管理以保护阻抗可调的灵活变压器；4) 验证新的绝缘液体以进一步优化灵活变压器的尺寸和占地面积；5) 开发用于先进溶解气体分析的新型多变量气体传感器 (DGA)。变压器将暴露在真实环境中以与传统变压器进行性能比较。	237.5923

(岳芳 郭楷模)

新型液态电解质助力氟离子电池首次实现室温下稳定运行

金属氟化物具有高容量的特性(理论能量密度高达 5000 Wh/L, 近 10 倍于锂), 能够满足高能量密度的应用需求; 此外, 相比于锂资源, 含氟化合物的储量十分丰富, 价格便宜, 使得氟离子电池无论是从能量密度, 还是成本和可持续性上都要比锂离子电池更具优势, 因此氟离子电池近年来吸引了广泛的关注。然而, 采用固态电解质的氟离子电池需要在高达 150℃ 以上高温才能运行, 限制了该电池的实际应用。美国加州理工学院 Simon C. Jones 教授课题组联合本田研究所、美国航空航天局喷气推进实验室共同开发了一种低温下具有高离子导电率和宽工作电压的液态电解质应用于氟离子电池, 克服了常规氟离子电池温度限制, 首次实现了在室温下稳定可逆的充放电循环, 为开发超越锂离子电池的新电池体系提供了一条重要途径。研究人员将四烷基氟化铵盐溶于氟代醚溶剂当中, 制备了氟离子传导电解质, 核磁共振(NMR) 长期监测证实该溶液在室温下稳定存在超过 3000 小时, 表现出优秀稳定性。线性扫描伏安测试结果显示, 该电解质的工作电压区间高达 4.1V; 导电率测试发现其在室温下实现了 3 mS/cm 的氟离子传导率, 可媲美锂离子在有机电解液中的电导率。为了克服正极溶解问题, 研究人员设计了铜-三氟化镧(Cu @ LaF₃, Cu 为核, LaF₃ 为壳) 复合正极, 惰性的 LaF₃ 外壳层能够有效保护中心的 Cu 核免于溶解, 还能限制电极体积膨胀并保持核的结构完整性, 并可以选择性地将电解质离子渗透到核中, 此外还能保护电解质免于分解。随后研究人员以溶有四烷基胺氟盐的氟代醚溶液为电解质、Cu @ LaF₃ 为正极、铈/三氟化铈(Ce/CeF₃) 为负极组装成完整的电池器件并进行性能测试, 发现电池在 25℃ 温度、10 μA 的放电电流下实现了可逆的稳定循环, 这是氟离子电池首次实现在室温下的稳定可逆循环, 使得氟离子电池展现出成为下一代高比能储能电池的强劲潜力。该项研究设计合成了新型的溶有四烷基氟化铵盐氟代醚溶剂电解质, 展现出优异的低温离子电导率、宽工作电压窗口和化学稳定性, 结合 Cu @ LaF₃ 正极, 有效克服了氟离子电池高温限制, 首次实现了室温下可逆循环, 为设计和开发可替代离子电池的高能量密度电池开辟了新路径。相关研究工作发表在《Science》¹¹。

(郭楷模)

¹¹ Davis V K, Bates K M, Jones S C, et al. Room-temperature cycling of metal fluoride electrodes: Liquid electrolytes for high-energy fluoride ion cells. *Science*, 2018, DOI: 10.1126/science.aat7070

新型抗溶剂制备钙钛矿薄膜实现超宽时间处理窗口

利用抗溶剂的一步旋涂法制备钙钛矿薄膜工艺简单有效，有利于制备致密高结晶的钙钛矿薄膜。众多实验表明，氯苯、甲苯及乙醚是这种方法最优的抗溶剂，效率超过 20% 的钙钛矿电池通常使用该方法进行制备。然而，目前在一步旋涂法中使用的抗溶剂存在工艺时间窗口较窄的问题（允许滴加抗溶剂的时间范围较短不便于操作，通常为 10-15s 时间间隔），导致了电池的重现性存在一定问题，因此亟需研究具有宽工作时间窗口的抗溶剂。韩国成均馆大学 Hyun Suk Jung 教授研究团队将苯甲醚作为抗溶剂引入到一步旋涂法，开发了具有超宽时间处理窗口的抗溶剂法制备钙钛矿薄膜工艺，成功制备了 100 cm² 的高结晶高致密度的钙钛矿薄膜。研究人员以二甲基甲酰胺（DMF）/二甲基亚砜（DMSO）混合液作为溶剂配制了钙钛矿前驱体溶液通过一步旋涂法制备钙钛矿薄膜，其中分别以氯苯、甲苯、乙醚、苯甲醚作为抗溶剂。实验结果显示，采用苯甲醚制备的钙钛矿薄膜厚度约为 450nm，结晶颗粒排列致密，与常规三种抗溶剂制备的薄膜形貌和厚度基本一致。但进一步研究不同实验参数，如工作窗口、滴加抗溶剂体积等，发现常规的抗溶剂对实验参数很敏感，其抗溶剂的工作时间窗口为 10-15s 之间，时间窗口较窄不便于操作，且滴加的溶剂体积也存在限制，导致了钙钛矿薄膜的重现性受到了严重影响。相反，新的苯甲醚抗溶剂其工作时间窗口范围大幅拓宽，达到了 25s，为实验人员或机器预留了充足的时间间隔；此外，薄膜的成膜结晶质量也基本不受抗溶剂滴加的体积影响。上述实验结果表明了新的苯甲醚抗溶剂显著改善了薄膜的重现性。傅里叶变换分析可知，宽工艺时间窗口中起关键作用的原因是苯甲醚与 DMF/DMSO 之间存在氢键作用所致。随后研究人员利用新抗溶剂制备了一系列不同面积（0.14 cm²、1.08 cm²、100 cm²、196 cm²）钙钛矿薄膜并制备了相应的电池器件，性能表征显示 0.14 cm² 的小面积器件效率达到 19.76%，1.08 cm² 大面积器件效率也可以达到 17.39%；将器件放入湿度小于 20% 的干燥空气中保存，发现在 1000 小时后仍然拥有 93.7% 的初始效率，表现出优异的稳定性。此外，分别利用 100 cm²、196 cm² 大面积钙钛矿薄膜不同部分制成统一标准的小面积电池器件，电池效率也呈现出较好的均一化，平均值在 14.3%，表明了薄膜具备较好的均匀性，意味着利用新苯甲醚抗溶剂方法制备钙钛矿薄膜方法非常成功。该项研究利用全新的苯甲醚抗溶剂应用于一步旋涂法制备钙钛矿工艺，大幅拓宽了抗溶剂的滴加时间窗口，降低了工艺操作难度，提升薄膜的重现性和均匀性，为钙钛矿电池的商业化应用积累了关键的技术基础。相关研究成果发表在《Advanced Materials》¹²。

（郭楷模）

¹² Pengjun Zhao, Byeong Jo Kim, Xiaodong Ren, et al. Antisolvent with an Ultrawide Processing Window for the One-Step Fabrication of Efficient and Large-Area Perovskite Solar Cells. *Advanced Materials*, 2018, DOI: 10.1002/adma.201803735

钉金属单原子电催化实现常温常压高效还原固氮

氨 (NH_3) 具备了易于液化、便于安全储存和运输特性, 而且液态氨的体积能量密度约是液态氢的 2 倍, 因此氨被认为是未来有潜力的液体燃料和储氢分子。然而, 目前规模化制 NH_3 主要采用“哈伯法”, 反应需要在高温高压 ($300\text{--}500^\circ\text{C}$, $150\text{--}200$ 个大气压) 下才能进行, 条件苛刻, 且产率较低。因此, 亟需开发低能耗高效率的 NH_3 合成工艺。由韩国科学技术院 (KAIST) 的 Yousung Jung 教授课题组牵头的国际联合研究团队通过化学分子工程在氮 (N) 掺杂多孔碳上生长了单分散钉 (Ru) 金属纳米颗粒作为单原子催化剂, 实现了常温常压下 N_2 到 NH_3 高效电化学还原。研究团队首先利用水热法制备了 N 掺杂多孔碳 (NC), 随后通过化学还原在 NC 上生长了单分散的 Ru 原子形成复合催化剂 Ru@NC。多孔碳作为载体可以大幅增加 Ru 金属的负载点, 即增加催化活性位点。随后在常温常压的三电极电解池中测试 Ru@NC 催化性能, 实验结果显示该催化剂在 -0.21V (相对可逆氢电极) 过电位下其催化 N_2 还原成 NH_3 的产率为 $3.665\text{ mg}^{-1}_{\text{NH}_3}\text{ h}^{-1}\text{mg}^{-1}_{\text{Ru}}$, 法拉第效率为 9%。相关的研究已经证实, N_2 还原过程中存在竞争性的析氢副反应, 导致法拉第效率较低。为此, 研究人员进一步在 Ru@NC 催化剂中加入 ZrO_2 添加剂形成, 发现加入 ZrO_2 后析氢副反应得到了显著的抑制, 即使在 -0.11V 的低电位下, 催化剂产 NH_3 的法拉第效率都达到 21%, 优于相同反应条件下的其他金属基催化剂。密度泛函理论 (DFT) 计算发现, ZrO_2 表面的氧空位能够锚定 Ru 原子, 具有氧空位的 Ru 位点则是主要的活性中心, 其能够稳定中间体 $^*\text{NNH}$ (NH_3 的中间产物), 减弱 $^*\text{H}$ 吸附 (析氢反应中间产物), 从而提升了将 N_2 电还原转化成 NH_3 的催化活性, 从而增强了 N_2 到 NH_3 还原效率。更为关键的是含 ZrO_2 的 Ru@NC 催化剂在恒电位下电解 60 小时后, 电流密度仍然保持稳定, 且产氨速率和法拉第效率几乎不变, 展现出优异的稳定性。该项研究通过分子工程设计合成了 ZrO_2 修饰的 Ru 金属锚定的氮掺杂多孔碳复合催化剂, 有效地抑制了析氢副反应, 实现了常温常压下高效稳定的电化学氮还原, 为人工固氮提供了极具前景的技术方案。相关研究工作发表在《Chem》¹³。

(刘竞 郭楷模)

新型 NASICON 正极材料实现钠电池高效稳定运行

传统的钠电池层状正极材料存在体积变化大和相转变不稳定性等缺点, 而钠离子快离子导体 (NASICON) 型正极材料因其具有三维钠离子快速传输网络、长循环稳定性以及高钠离子迁移率优点, 而备受研究人员关注。但常规的锰基 NASICON 型正极材料由于受到 Jahn-Teller 效应影响导致性能不佳, 需要有效地解决。美国德

¹³ Philip Weber, Thorsten Scherpf, Ilja Rodstein, et al. Nitrogen Fixation by Ru Single-Atom Electrocatalytic Reduction. *Chem*, 2018, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chempr.2018.10.007>

克萨斯大学奥斯汀分校的 John B. Goodenough 教授带领的研究团队设计合成了一种具有低活化能、高电压平台的碳包覆的钠电池正极材料 $\text{Na}_3\text{MnZr}(\text{PO}_4)_3$ ，有效地抑制了体积的膨胀，展现出优秀的化学稳定性，提高了电池的寿命。研究人员通过溶胶凝胶法合成了碳包覆的 $\text{Na}_3\text{MnZr}(\text{PO}_4)_3$ 正极材料，扫描电镜表征显示该正极材料是由平均粒径 200 nm 的颗粒组成。X 射线衍射表征显示， $\text{Na}_3\text{MnZr}(\text{PO}_4)_3$ 的晶体结构由 MnO_6 和 ZrO_6 八面体单元与 PO_4 四面体单元通过角共享桥接的形式构成，建立具有三种不同类型 Na^+ 离子的框架结构，包括六配位、八配位的 Na 和四配位的 NaO_4 。通过模拟计算得出 $\text{Na}_3\text{MnZr}(\text{PO}_4)_3$ 正极材料的理论比容量为 107 mAh g^{-1} 。循环伏安曲线研究显示， $\text{Na}_3\text{MnZr}(\text{PO}_4)_3$ 正极材料在 3.6 V 和 4.1 V 位置出现了氧化峰，分别对应 $\text{Na}_3\text{MnZr}(\text{PO}_4)_3 \rightarrow \text{Na}_2\text{MnZr}(\text{PO}_4)_3$ 和 $\text{Na}_2\text{MnZr}(\text{PO}_4)_3 \rightarrow \text{NaMnZr}(\text{PO}_4)_3$ ，即逐步脱钠的过程；而在 4.0V 和 3.5V 的地方出现了还原峰，对应材料的嵌钠过程。对比已有的文献报道可知， $\text{Na}_3\text{MnZr}(\text{PO}_4)_3$ 电压平台高于其他磷酸盐体系钠电正极材料。0.1 C 倍率时，基于 $\text{Na}_3\text{MnZr}(\text{PO}_4)_3$ 正极材料的电池放电比容量达到 105 mAh g^{-1} ，接近理论值。当倍率提升 10 倍到 1C 时，依旧可以获得高达 82 mAh g^{-1} 放电比容量。在 0.5 C 的倍率下循环 500 次后，电池可以保持初始容量的 98.7%，表现出优秀的电化学稳定性。接着研究人员探究了电极材料性能优异的潜在机理：非原位 XRD 的方法研究 $\text{Na}_3\text{MnZr}(\text{PO}_4)_3$ 在 Na^+ 脱嵌过程中的结构变化显示，在 $\text{Na}_3\text{MnZr}(\text{PO}_4)_3 \rightarrow \text{Na}_2\text{MnZr}(\text{PO}_4)_3$ 和 $\text{Na}_2\text{MnZr}(\text{PO}_4)_3 \rightarrow \text{NaMnZr}(\text{PO}_4)_3$ 的相转变过程中，晶胞参数变化较小，从而保障了电极材料结构的稳定性。对比 $\text{Na}_2\text{MnZr}(\text{PO}_4)_3$ 中 MnO_6 中的 Mn^{3+} 与不同 O 的键长，结果表明，虽然 MnO_6 部分扭曲，但 Mn^{3+} 为中心的 Jahn-Teller 效应被有效的抑制，有利于材料循环性能的长期稳定。该项研究设计合成了新型 NASICON 型钠电池正极材料 $\text{Na}_3\text{MnZr}(\text{PO}_4)_3$ ，其工作电压平台达到了 4V，显著高于磷酸盐体系正极材料，此外材料晶体结构稳定，而 Jahn-Teller 效应被有效抑制，从而表现出优秀的电化学稳定性，为设计和开发高性能的钠离子电池正极材料提供了新的思路。相关研究工作发表在《*Journal of the American Chemical Society*》¹⁴。

（郭楷模）

¹⁴ Hongcai Gao, Ieuan D.Seymour, Sen Xin, et al. $\text{Na}_3\text{MnZr}(\text{PO}_4)_3$: A High-Voltage Cathode for Sodium Batteries. *Journal of the American Chemical Society*, 2018, DOI: 10.1021/jacs.8b11388

中国科学院武汉先进能源科技战略情报研究中心

中国科学院武汉先进能源科技战略情报研究中心是服务国家和中科院能源决策管理、科技创新、产业发展的专业情报研究机构，历年来承担和参与了多项国家级、中科院、省部级能源科技战略规划和重要科技计划研究。中心的主要产品包括《先进能源发展报告》、《先进能源动态监测快报》（半月刊）、《能源与科技参考》及各类深度能源情报研究分析报告，主要研究方向包括能源科技领域的国际科技战略与规划、科技计划与预算、科技进展与动态、科技前沿与热点、重大成果工程应用、重要科技政策与管理研究。

研究内容		特色产品
战略规划研究	开展科技政策与科研管理、发展战略与规划研究等相关服务，为科技决策机构和管理部门提供信息支撑。	先进能源发展报告：科技引领能源 国际能源战略与新能源技术进展 金融危机背景下的能源战略 世界能源强国能源科技创新体系分析报告 美国能源科技计划管理机制及启示
领域态势分析	开展特定领域或专题的发展动态调研与跟踪、发展趋势研究与分析，为研究机构、企业的科研项目提供情报服务。	核电技术国际发展态势分析报告 太阳能热发电技术国际发展态势分析报告 智能电网国际发展态势分析报告 规模化电力储能技术国际发展态势分析报告 高端洁净煤发电技术国际发展态势分析报告
技术路线研究	开展产品、成果、专利或标准的情报研究，分析相关行业的现状及发展趋势，为企业发展与决策提供参考。	国际能源领域技术路线图解析 低阶煤热解/气化/循环流化床专利态势分析 新型煤气化技术发展报告 太阳能技术新突破：钙钛矿太阳电池 我国能源互联网发展重要战略问题研究

编辑出版：中国科学院武汉先进能源科技战略情报研究中心

联系地址：武汉市武昌区小洪山西 25 号（430071）

联系人：陈伟 郭楷模 岳芳

电话：（027）87199180

电子邮件：energy@whlib.ac.cn

微信公众号：CASEnergy

