DOI 10.15302/J-SSCAE-2018.03.001

我国能源技术革命体系战略研究

李立涅[1]，饶宏[2]，许爱东[2]，郭晓斌[2]，白浩[2]

（1. 中国南方电网有限责任公司，广州 510663；2. 南方电网科学研究院，广州 510663）

摘要：为了推进能源技术革命，中国工程院于 2015 年启动了“我国能源技术革命体系战略研究”重大咨询项目。本文从核能、风能、太阳能、储能、油气、煤炭、水能、生物质能、智能电网与能源网融合九大能源技术领域开展咨询调查研究，系统分析了各领域的能源技术现状，明确提出了构建以可再生能源为主体，终端能源以电能为主，多能多网融合互补的技术体系，制定了前瞻性技术（2020）、创新性技术（2030）和颠覆性技术（2050）三阶段发展的能源技术路线，最后提出推动能源技术革命的战略建议，为我国研究制订能源相关规划和政策提供了科学支撑。

关键词：能源技术革命；能源技术体系；能源技术路线；战略研究；战略建议

中图分类号：T-012　　**文献标识码：**A

Strategic Research on China Energy Technology Revolution System

Li Licheng[1], Rao Hong[2], Xu Aidong[2], Guo Xiaobin[2], Bai Hao[2]

(1. China Southern Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510663, China; 2. Electric Power Research Institute, CSG, Guangzhou 510663, China)

Abstract: In order to promote energy technology revolution, the Chinese Academy of Engineering launched a major consultation project in 2015, Strategic Research on China Energy Technology Revolution System. This paper states a development strategy through consultation and investigation in nine key energy areas, including nuclear energy, wind energy, solar energy, energy storage, oil and gas, coal, water energy, biomass energy, and integration of the smart grid and the energy network. Based on the system analysis of China’s current situation of energy technologies, this paper proposes an energy technology system in which renewable energies are the main part, electric energy is the main part of the end-use energy, and multiple energies and grids integrate and complement with each other, develops an energy technology route including three stages for development of forward-looking technologies (2020), innovative technologies (2030) and disruptive technologies (2050), and finally puts forward the strategy proposal to promote energy technology revolution, which provides scientific support for making plans and policies about energy in China.

Keywords: energy technology revolution; energy technology system; energy technology route; strategic research; strategy proposal

一、前言

世界能源供给和消费发生深刻变化，减缓全球气候变化需逐步减少对传统化石能源的依赖，绿色低碳的新能源和可再生能源利用得到快速发展，“节能减排、绿色低碳”成为能源供给消费的发展趋

收稿日期：2018-06-05；**修回日期：**2018-06-12

通讯作者：许爱东，南方电网科学研究院，高级工程师，主要从事智能配电网和微电网控制研究与技术管理工作；E-mail: xuad@csg.cn

资助项目：中国工程院咨询项目“我国能源技术革命的技术方向和体系战略研究”(2015-ZD-09)

本刊网址：www.enginsci.cn

势。面对能源供需格局新变化和国际能源发展新趋势 [1]，中国需通过能源技术革命，促进能源供给向多元化发展，能源利用趋向综合高效，能源消费体系更加科学完善。

党的“十九大”报告指出，中国特色社会主义进入新时代，我国社会主要矛盾已经转化为人民日益增长的美好生活需要和不平衡不充分的发展之间的矛盾，能源消费与经济社会紧密联系，深刻影响着经济社会发展，当前经济结构转型、气候治理等都迫切需要能源供给体系转型，加强自主创新，积极研发应用新技术，促进能源转型和高效利用，不断满足人民日益增长的美好生活需要。由于能源产业具有投资大、关联多、周期长、惯性强的特点，必须明确全面协调可持续发展的技术方向，建立起立足于本国资源和需求特点，与世界能源高科技相衔接的能源技术体系。

二、能源技术现状分析

经过调研分析发现，我国在核能、风能、太阳能、储能、油气资源、煤炭、水能、生物质能、节能、智能电网与能源网的融合等能源领域上的技术水平已大幅提升，部分实现了跨越式发展，部分达到了国际先进水平。在新一代核电技术、发电装备制造与煤炭高效清洁燃烧、风力发电设备制造、含大规模新能源接入的特大电网调度运行与安全控制等方面实现了自主创新和技术突破，但部分核心技术和装备仍落后于国际先进水平，原创高端技术自我供应能力明显不足，亟需进一步开展研发攻关。

（一）自主三代核电技术进入大规模应用阶段，四代核电技术全面开展研究工作，研究力量比较分散

我国核电与国际最高安全标准接轨，并持续改进，机组安全水平和运行业绩良好，安全风险处于受控状态。自主三代压水堆核电技术落地国内示范工程，并成功走向国际，已进入大规模应用阶段。四代核电技术全面开展研究工作，快堆示范工程即将开工，高温气冷堆示范工程开始建造。在一些重要方面与国际先进水平尚有不小差距，铀资源勘查程度低，燃料组件制造产能不足。乏燃料干式储存、后处理和废物处置落后世界亟需赶上。延寿和退役工作正在起步，技术储备不足。核能领域有几项技术可能对未来能源结构产生深远影响，比如海水提铀、快堆、钍铀循环、聚变能源、聚变裂变混合能源 [2,3]，每一项技术又存在不同的技术路线，造成国内研究力量分散，各自为战。

（二）风电设备产业链形成，风电场设计和智能运维技术与国外差距较大

我国风电机组整机制造技术基本与国际同步，风电设备产业链已经形成，兆瓦级以上风电机组配套的叶片、齿轮箱、发电机、电控系统等已经实现国产化和产业化。陆上风电已经积累了丰富的设计、施工、建设、运维和检测经验，已建立了完善的集中式风电调度运行体系和技术支持系统。以大数据和互联网为基础对风电场设计、运行及维护进行改进及优化已经成为风力发电降低成本、提高发电量和高效率的重要手段，国外在此领域已经具备成熟的解决方案，国内在风电大数据标准、分析及基于大数据的风电场优化方面差距较大 [4,5]。未来，基于大数据开发出适用于不同类型风电场的设计及运维技术，将为我国大型风电基地以及分散式风电系统的优化布局和可靠运行提供技术支撑。

（三）光伏发电和光热发电技术成熟，而太阳能光化学利用技术仍处于实验室研究阶段

我国的太阳能光伏发电技术发展迅猛，已形成包括多晶硅原材料、硅锭 / 硅片、太阳电池 / 组件和光伏系统应用、专用设备制造等比较完善的光伏产业链。我国商业化单晶硅电池效率达到 20% 以上，多晶硅电池效率超过了 18%，在高效率低成本晶体硅太阳电池的生产方面具有优势。硅基薄膜电池在新材料、关键设备和工艺水平等方面，与国外还有很大差距 [6,7]。应加强新型可穿戴的柔性轻便太阳电池技术突破，进行示范应用。人工光合成太阳能燃料方面必须加大基础研究的力度，争取早日在关键基础科学问题上取得原创性突破。深入理解光 – 化学转化过程的微观机制和催化反应的热力学和动力学本质规律，发展相关的材料、理论、方法、策略。

（四）电化学储能是目前最常用和成熟的化学储能技术，需持续开展氢储能研究

我国在若干类型的物理和化学储能技术上取得

了长足进步，形成了自主知识产权，走在世界前列。目前我国锂离子电池大部分材料实现了国产化，由追赶期开始向同步发展期过渡，本土总产能居世界第一。在液流电池材料、部件、系统集成及工程应用关键技术方面取得重大突破。铅炭电池的作用机理研究、高性能炭材料开发、电池设计和制造技术等取得较大进步 [8]。在钠硫电池和锂硫电池领域已经进入实用化的初级阶段。超级电容器的电极材料、电解质和模块化应用方面都取得了很大进步。其他新兴的储能技术仍需进一步提高电池的功率密度、环境适应性、安全性能、循环寿命等，降低制造成本 [9]。加强基于可再生能源的水电解技术的研究，实现氢储能的规模化应用。

（五）常规勘探技术成熟，非常规油气探测技术以及智能传感技术仍存在不足

我国能源需求、能源结构及能源行业发展现状，决定了在 2035 年前需采用稳油兴气的发展战略，面临着较多的勘探开发技术难题或关键技术需求。物探技术取得了长足进步，在全球陆上地震技术市场份额占比已达到 46% 并拥有定价权，但与国外相比在装备制造能力方面还存在一定的差距。常规陆上地震勘探技术成熟，特色的复杂山地地震勘探技术先进，海洋、天然气水合物等非常规油气资源勘探技术尚处于起步阶段。深海技术和深水钻井装备和配套技术研发处于产业化快速发展的初期，已经具备水深超过 1 650 m 的深水钻完井工程方案设计、深海冷海钻井装置与技术选择与优化设计研究能力 [10,11]。虽然在若干领域取得长足进步甚至重要突破，但是仍存在诸多不足。对于基于微机电系统（MEMS）的全方位高分辨多波多分量地震勘探技术，目前尚不具备实验测试等基础研发条件 [12]。钻完井技术在这轮以智能化为主的技术发展潮流中，受制于国家在高端微纳传感器技术和智能材料技术领域的短板，技术发展已进入创新瓶颈期并且导致难动用储量占比持续增大。

（六）煤炭燃烧利用是煤炭利用的主要方式，煤炭清洁燃烧的技术创新始终是能源发展的重要任务

从清洁煤炭燃烧利用所涉及的超超临界技术、燃煤工业锅炉、民用散煤、煤电深度节水技术、碳捕获和封存 / 碳捕获、利用和封存技术、煤电废物控制技术等六类技术的发展现状和国内外对比看，我国在超超临界、煤电深度节水、煤电废物控制、碳捕获和封存等一些技术领域已处于世界先进甚至领先的水平。然而，即便在上述优势领域，也仍有部分技术和关键设备需要进一步研发或改进。燃煤工业锅炉装备总体水平差，运行效率低，比国际先进水平低 20%，缺乏有效的控制民用散煤污染物排放的技术措施。在二氧化碳的运输管道建设、化学链燃烧等前沿技术的基础研究领域，与美国等发达国家相比还较为落后。

（七）水力发电领域技术处于领先地位，是实现绿色、低碳可持续发展的重要保障

我国水能资源总量、投产装机容量和年发电量均居世界首位。已在 7×10^5 kW 级机组研制、300 m 级别高坝设计、超大型地下厂房设计、复杂输水系统过渡过程分析、巨型输水系统结构设计等大型水电关键技术和相关科学问题上取得突破。在水能开发的过程中，还有许多关键技术问题：巨型水轮机及其系统的稳定性问题未得到很好的解决，超高水头、引水式电站开发技术仍需攻关，亟需开展超高水头超大容量冲击式机组、大容量高水头贯流式机组稳定性方面的关键技术和科学问题研究。在抽水蓄能电站方面，仍需研究变速抽水蓄能技术、海水抽水蓄能电站关键技术、抽水蓄能与其他能源协调控制技术等。对于小水电，在低水头、大流量小水电设备的制造、微小水电的稳定、长期运行技术以及机组自动控制技术等方面与国外先进水平相比还有相当大的差距 [13]。

（八）生物质能开发潜力大，需加强生物质能源技术研发和产业体系建设

我国生物质能开发利用存在利用效率低、产业规模小、生产成本高、工业体系和产业链不完备、研发能力弱、技术创新不足等一系列问题。我国的生物发电总装机容量已位居世界第二位，但生物质直燃发电技术在锅炉系统、配套辅助设备工艺等方面与欧洲国家相比还有较大差距，生物质发电在原料预处理及高效转化与成套装备研制等核心技术方面仍存在瓶颈 [14]。生物柴油技术已进入工业应用阶段，但在生物质液体燃料的转化反应机理、高效

长寿命催化剂、酶转化等方面的基础研究薄弱。固体成型燃料的黏接机制和络合成型机理尚不清楚。能源植物资源品种培育研究与收集工作刚起步，而且不同单位收集的资源侧重点不同，相对分散，主要关注传统育种。分子遗传育种才刚起步，且对培育出来的优良品种的利用与推广较少。

（九）我国正积极推动智能电网与能源网融合，融合趋势将向智能化、透明化、智慧化的三个层次递进发展

我国在特高压输电、柔性直流输电、大容量储能、大电网调度、主动配电网、微电网、能源转化设备等电网智能化技术方面处于国际领先水平。但当前电网与能源网长期保持着独立运行、条块分割的局面，跨系统间的行业壁垒严重，市场交易机制缺失，屏蔽了多样化能源的互补属性，极大地制约了不同种类能源间互联互通、相互转换、自主交易所带来的能效提升和优化运行的优点。目前，我国电力与能源体制改革不断深入，有力地推动智能电网与能源网的融合进程，开展了一批能源互联网、多能互补和增量配电网示范项目的建设。随着我国一次能源占比要求的不断提高，以及智能材料与通信技术的发展，智能电网与能源网的融合将向智能化、透明化、智慧化的三个层次递进发展，智能电网与能源融合模式也将呈现出三种不同的形态：以智能电网广域互联为载体，实现可再生能源集中式消纳与跨区域能源资源配置 [15,16]。以区域与用户级综合能源系统为载体，实现可再生能源就地消纳与终端能效提升。以智能装备与泛在能源网络为载体，构建零边际成本能源网络，实现能源生产和消费的新业态、新模式。

三、能源技术体系

如图 1 所示，构建了以可再生能源为主体，终端能源以电能为主，多能多网融合互补的技术体系，从纵向分为煤炭、油气、核能、水能、风能、太阳能、生物质能、储能、智能电网与能源网融合九个领域。从横向划分为创新性技术、前瞻性技术以及颠覆性技术三个层次。

煤炭领域需专注于煤炭高效燃烧技术、煤电废物控制技术；终端散煤利用技术、二氧化碳捕集、传输和利用技术；磁流体联合循环发电技术。

油气领域需专注于全波地震勘探技术、精确导向智能钻井技术；智能完井采油技术；仿生钻采系统技术。

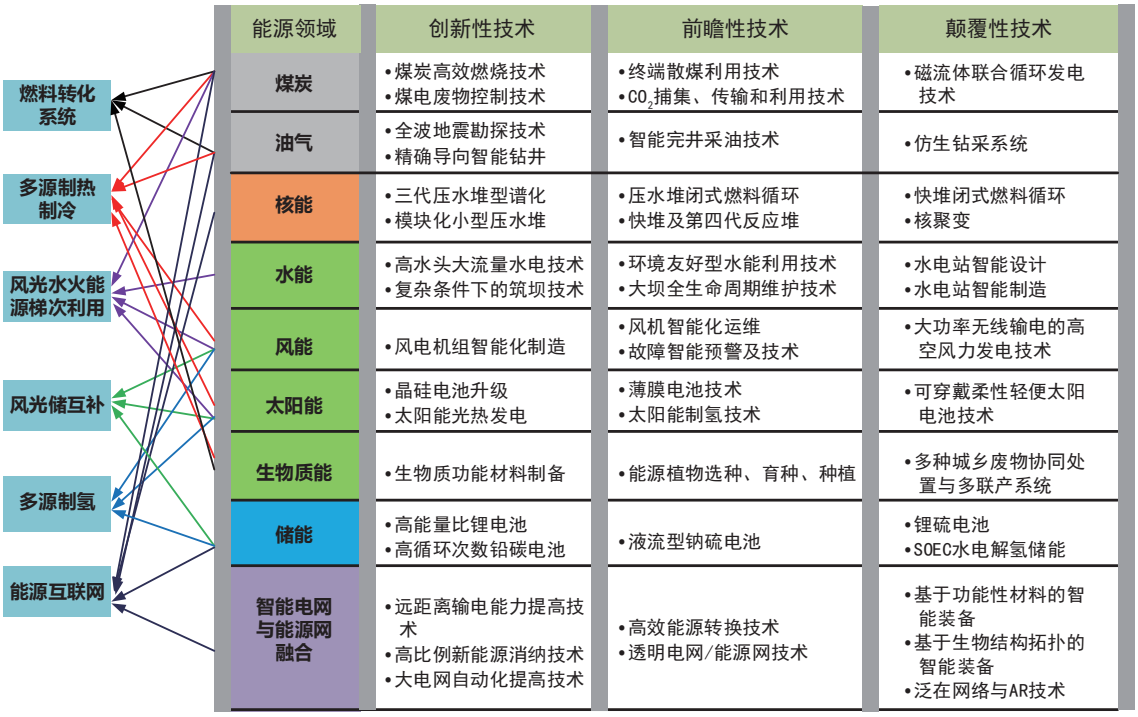

图 1　中国能源技术体系

核能领域需专注于先进深部铀资源开发技术；压水堆优化和规模化推广利用技术；快堆及四代堆开发利用技术；核燃料循环前端和后端技术匹配发展；模块化小堆多功能应用；可控核聚变技术研发。

水能领域需专注于高水头大流量水电技术、水电站筑坝技术；环境友好型水能利用技术、大坝维护技术；水电站智能设计、智能制造、智能发电和智能流域综合技术。

风能领域需专注于风能资源评估以及监测、大功率风电机组整机设计；风机运维与故障诊断；大功率无线输电的高空风力发电技术。

太阳能领域需专注于晶硅电池升级、太阳能光热发电；薄膜电池技术、太阳能制氢技术；可穿戴柔性轻便太阳电池技术。

生物质能领域需专注于城乡废物协同处置与多联产；生物质功能材料制备；能源植物选种育种以及种植。

储能领域需专注于高能量比和安全性的锂电池技术、高循环次数的铅碳电池技术；液流型钠硫电池技术；锂硫电池技术、固体氧化物电解池（SOEC）水电解氢储能。

智能电网与能源网融合领域需专注于提升远距离输电能力技术、提升高比例新能源消纳技术、提升大电网自动化技术；高效能源转换技术、透明电网 / 能源网技术；基于功能性材料的智能装备、基于生物结构拓扑的智能装备、泛在网络与虚拟现实（AR）技术。

各能源领域技术深度融合，燃料转化系统可实现煤转气，煤转油、生物质制柴油、生物质制天然气，补充油气资源。煤炭、天然气、风光构成多源联合制热制冷系统和制氢系统，在风力和光伏充裕时，将电能转化为其他形式能源，同时通过煤制氢，实现脱碳化和清洁化。将风能、水能、光伏、火力发电以及储能结合，实现能源梯次利用。

四、能源技术革命发展路线

如图 2 所示，我国能源技术革命从技术层面和体系层面，在 2020 年、2030 年和 2050 年三个阶段实现递进性建设。

到 2020 年，能源自主创新能力大幅提升，一批创新性技术取得重大突破，突破煤炭高效清洁利用技术，初步形成煤基能源与化工的工业体系；突破非常规油气的深度勘探开采技术，建立油气行业微纳测井和智能材料基础研发体系 [17]。利用水力资源和远距离超高压交直流输电网的同时，突破太阳能热发电和光伏发电技术、风力发电技术初步形成可再生能源作为主要能源的技术体系和能源制造体系；自主三代核电形成型谱化产品，带动核电产业链发展；模块化小型压水堆示范工程开始建设；逐步提高核能，可再生能源和新型能源的比重，减少二氧化碳排放量。助力未来能源发展方向转型，根本扭转能源消费粗放增长方式。能源自给能力保持在 80% 以上，基本形成比较完善的能源安全保障体系；能源技术装备、关键部件及材料对外依存度显著降低，我国能源产业国际竞争力明显提升，进入能源技术创新型国家行列，基本建成中国特色能源技术创新体系 [18]。

到 2030 年，建成与国情相适应的完善的能源

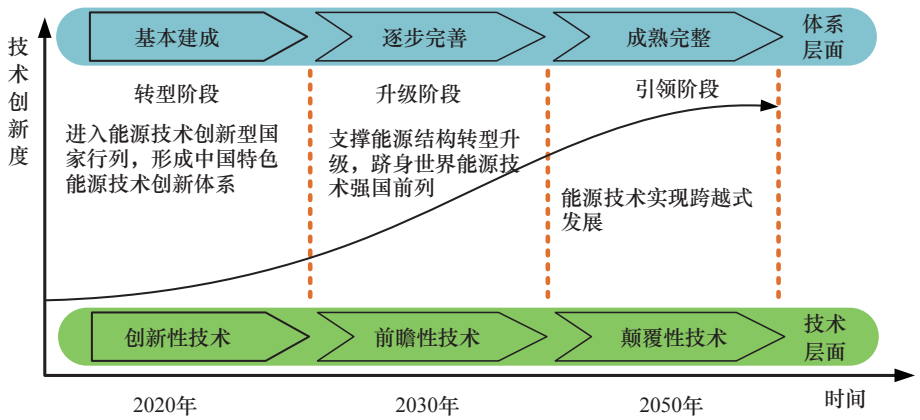

图 2　中国能源技术革命发展路线图

技术创新体系，能源自主创新能力全面提升，能源技术水平整体达到国际先进水平 [19]。物质液体燃料技术形成规模化商业应用，突破电力新材料新装备技术以及安全信息技术，实现大容量低损失的电力传输和终端高效利用，初步形成以光伏技术、风能技术为主的分布式微网的新型电力系统，初步实现智能电网与能源网的融合；以耐事故燃料为代表的核安全技术研究取得突破、全面实现消除大规模放射性释放，提升核电竞争力；实现压水堆闭式燃料循环，核电产业链协调发展；钠冷快堆等部分四代反应堆成熟，突破核燃料增殖与高水平放射性废物嬗变关键技术；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；实现核能、可再生能源和新型能源的大规模使用。能源自给能力保持在较高水平，更好利用国际能源资源；发展前瞻性技术促进我国能源结构发生质变，支撑我国能源产业与生态环境协调可持续发展，初步构建现代能源体系，跻身世界能源技术强国前列 [20]。

到 2050 年，通过颠覆性技术打破传统能源技术的思维和路线，实现能源革命跨越式发展，突破天然气水合物开发与利用技术，油替代技术，氢能利用技术，燃料电池汽车技术，实现快堆闭式燃料循环，压水堆与快堆匹配发展，力争建成核聚变示范工程，建立节能技术体系，基本形成化石能源、新能源与可再生能源、核能并重的低碳型多元能源结构 [21]。成熟完整的能源技术创新体系，成为世界能源主要科学中心和创新高地，引领新一轮科技革命和产业革命。能效水平、能源科技、能源装备达到世界先进水平；成为全球能源治理重要参与者；建成现代能源体系，保障实现现代化。

五、推动能源技术革命的重大举措

（一）坚持“在保护中开发，在开发中保护”的水电发展理念，大力发展生态友好型中小水电

大力发展水电，正确处理生态环境保护与水电开发的关系，开发应坚持生态环境保护优先，积极、科学、合理开发利用的原则，在保护中开发，在开发中保护，正确处理好保护与开发的关系，贯彻落实科学发展观，促进人与自然和谐相处，必须以水资源的可持续利用支撑经济社会的可持续发展，把维护河流健康作为水资源开发利用的基础和前提。围绕低水头、大流量中小水电设备的制造、微小水电的稳定与长期运行技术以及机组自动控制技术、生态友好型小水电设计准则、鱼类友好型水轮机设计、“互联网 + 小水电 / 智能云电站”技术和生态友好的大坝建设的生态准则，开展前瞻性研究和关键科技问题集中攻关，进行新技术的推广应用及产业化，最终成为清洁可再生能源的一大支柱。

（二）因地、因需地选择生物质开发方式，不局限于生物质发电

根据生物质类型、所在地的经济条件和环境条件等，选择合理的综合开发方式，不局限于生物质发电。建议将生活垃圾转化为生物质液体燃料，如生物质柴油和纤维素原料燃料乙醇；将人畜粪便和农林废弃物转化为生物质燃气，建设大中型沼气工程，进行沼气提纯和高效存储；将农林废弃物转化为生物质成型燃料，进行固体成型燃料和热解制备生物炭。建立完善的秸秆、生活垃圾、农林废弃物等的回收体系，加强收购、运输、储存、加工等环节的配套衔接。

（三）大力发展太阳能发电技术，明确其在能源结构转型中的战略地位

太阳能获取方便，且清洁安全。我国适宜太阳能利用的国土面积和建筑物受光面积很大。建议把太阳能发电作为面向未来可再生能源利用的主要技术方向，作为长周期的能源发展技术路线的核心组成部分。建议大力发展和推广降低硅太阳电池成本，提高电池效率的技术和工艺，全面提升晶硅电池产业链；加快薄膜太阳能电池发展，加强硅基薄膜电池产业化技术研发，充分发挥薄膜电池柔性、轻便、灵活等独特优势，填补对空间、面积和重量敏感的发电市场。

（四）新能源以“分布式开发、就地消纳”为主，避免大容量远距离传输

优化电源投资结构，延缓弃风、弃光严重地区的新能源投资建设，并依托高耗能负荷就地消纳过剩新能源电量。大力推广应用分布式光伏发电、分散式风电、智能配电网和储能技术，将我国新能源的开发利用由目前的“大规模开发、远距离传输”

模式加快转变为“分布式开发、就地消纳”模式，避免采用远距离输电工程传输新能源至负荷中心。

（五）大力应用多能互补技术，支撑能源结构转型

在能源供给侧，充分发挥各类异质能源的可替代性及互补性，实现多类型异质能源的互补开发和协调优化调度，形成稳定、高效、清洁的能源供应体系。在能源消费侧，因地制宜通过电能替代、冷热电多联供、智能微网、园区综合能源系统满足终端用户电、热、冷、气等多种用能需求，实现多能协同供应和能源综合梯级利用。在雄安新区部署实施多能互补集成示范应用，建设国际一流、国内领先的智慧绿色高效能源系统。

（六）加强新材料、新器件的研发，支撑颠覆性技术发展

加强能源技术革命所需的新材料、基础元器件、集成芯片、微型传感器等的研发力度，加快我国柔性薄膜太阳能电池发展，用于可穿戴领域，实现无毒可穿戴电池技术产业化；加快利用弃风、弃水、弃光进行电解水制氢的发展；利用微纳探测技术（微机电系统 / 纳机电系统、纳米传感器、纳米光纤）打造智能化油气开采特色技术体系；基于微型传感器构造透明电网技术研究及示范应用，支撑能源颠覆性技术发展。

（七）建设清洁能源国家研究中心，抢占全球能源科技制高点

建设清洁能源国家研究中心，以国家能源重大战略需求为导向，凝练重大科学问题，强化多能源系统融合、多能源学科交叉、政产学研用结合、人财物资源整合以及体制机制创新，深入开展与清洁能源相关的基础性、前瞻性、战略性科技创新，加强能源与材料、信息、化学、控制、机械等基础科学的协同创新，推动能源技术与大数据、云计算、物联网、人工智能、机器人和智能制造等应用技术的集成创新，破解制约能源技术革命的重大科技和装备瓶颈。

（八）建设国家级能源大数据中心，支撑国家能源决策

建设国家级能源大数据中心，加强全国范围内多种能源数据多维度的采集、传输、存储、分析和应用，从海量能源数据中快速提炼出深层知识并发挥其应用价值，全面掌握各省区、各行业的能源利用情况等重要数据，发挥国家大平台资源调配作用，为推动我国能源转型发展提供科学决策。通过统一能源信息采集、集成、存储标准，解决多源数据异构所带来的信息孤岛问题。加强能源信息安全建设，落实信息安全技术防护和管理措施，切实保障能源信息安全。

参考文献

[1] 张映红, 路保平. 世界能源趋势预测及能源技术革命特征分析 [J]. 天然气工业, 2015, 35(10): 1–10.
Zhang Y H, Lu B P. Prediction of global energy trend and analysis on energy technology innovation characteristics [J]. Natural Gas Industry, 2015, 35(10): 1–10.

[2] 康晓文, 付文. IEA/NEA 新版核能技术路线图(上): 世界核能发展的状况及趋势 [J]. 中国核工业, 2016 (4): 35–37.
Kang X W, Fu W. IEA/NEA new technology roadmap for nuclear energy (part one): Situation and trend of nuclear energy development in the world [J]. China Nuclear Industry, 2016 (4): 35–37.

[3] 康晓文, 付文. IEA/NEA 新版核能技术路线图(中): 世界核能发展的预期行动 [J]. 中国核工业, 2016 (5): 34–37.
Kang X W, Fu W. IEA/NEA new technology roadmap for nuclear energy (part two): Expected action for the development of nuclear energy in the world [J]. China Nuclear Industry, 2016 (5): 34–37.

[4] 钱伯章. 风能技术与应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2010.
Qian B Z. Wind energy technology and its application [M]. Beijing: China Science Publishing & Media Ltd., 2010.

[5] 沈德昌. 我国风能技术发展历程 [J]. 太阳能, 2017 (8): 9–10.
Shen D C. The development course of wind energy technology in China [J]. Solar Energy, 2017 (8): 9–10.

[6] 汤叶华, 谢建. 光伏技术的发展现状 [J]. 可再生能源, 2005 (3): 68–69.
Tang Y H, Xie J. Current development of photovoltaic technology [J]. Renewable Energy Resources, 2005 (3): 68–69.

[7] Chow T T. A review on photovoltaic/thermal hybrid solar technology [J]. Applied Energy, 2010, 87(2): 365–379.

[8] Divya K C, Østergaard J. Battery energy storage technology for power systems—An overview [J]. Electric Power Systems Research, 2009, 79(4): 511–520.

[9] 李建林, 马会萌, 惠东. 储能技术融合分布式可再生能源的现状及发展趋势 [J]. 电工技术学报, 2016, 31(14): 1–10.
Li J L, Ma H M, Hui D. Present development condition and trends of energy storage technology in the integration of distributed renewable energy [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(14): 1–10.

[10] 孙卫斌, 曹杨, 鲁瑶. 海洋电磁油气勘探技术及应用进展 [C]. 天津: 中国石油学会2017 年物探技术研讨会, 2017.
Sun W B, Cao Y, Lu Y. Development of marine electromagnetic oil and gas exploration technology and its application [C]. Tianjin: 2017 Geophysical Technology Symposium of the Chinese Petro-

leum Society, 2017

[11] 喻言. 油气勘探技术的发展与革新 [J]. 技术与市场, 2016, 23(11): 136.
Yu Y. Development and innovation of oil and gas exploration technology [J]. Technology and Market, 2016, 23(11): 136.

[12] 刘宏. MEMS 矢量传感器在油气管道检测系统中的优化设计 [D]. 太原: 中北大学(硕士学位论文), 2014.
Liu H. Optimization design of MEMS vector sensor in oil and gas pipeline inspection system [D]. Taiyuan: North University of China (Master's thesis), 2014.

[13] Paish O. Small hydro power: Technology and current status [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2002, 6(6):537–556.

[14] 袁振宏, 吴创之, 马隆龙. 生物质能利用原理与技术 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
Yuan Z H, Wu C Z, Ma L L. Principle and technology of utilization of biomass energy [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005.

[15] 陈树勇, 宋书芳, 李兰欣, 等. 智能电网技术综述 [J]. 电网技术, 2009, 33(8): 1–7.
Chen S Y, Song S F, Li L X, et al. A review of smart grid technology [J]. Power System Technology, 2009, 33(8): 1–7.

[16] 李立涅, 张勇军, 陈泽兴, 等. 智能电网与能源网融合的模式及其发展前景 [J]. 电力系统自动化, 2016, 40(11): 1–9.
Li L C, Zhang Y J, Chen Z X, et al. Merger between smart grid and energy-net: Mode and development prospects [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(11): 1–9.

[17] 国家发展和改革委员会. 能源技术革命创新行动计划(2016—2030) [R]. 北京: 国家发展和改革委员会, 2016.
National Development and Reform Commission of the PRC. Innovation action plan of energy technology revolution (2016—2030) [R]. Beijing: National Development and Reform Commission of the PRC, 2016.

[18] 中国科学院. 中国至2050 年能源科技发展路线图 [M]. 北京: 科学出版社, 2009.
Chinese Academy of Sciences. China's road map of energy science and technology development to 2050 [M]. Beijing: China Science Publishing & Media Ltd., 2009.

[19] 国家发展和改革委员会能源研究所. 重塑能源: 面向2050 年能源生产和消费革命路线图研究 [R]. 北京: 国家发展和改革委员会能源研究所, 2016.
Energy Research Institute of the National Development and Reform Commission of the PRC. Reshaping energy: A roadmap for energy production and consumption revolution in 2050 [R]. Beijing: Energy Research Institute of the National Development and Reform Commission of the PRC, 2016.

[20] 国家可再生能源中心. 中国可再生能源发展路线2050 [R]. 北京: 国家可再生能源中心, 2015.
China National Renewable Energy Center. China's renewable energy development route 2050 [R]. Beijing: China National Renewable Energy Center, 2015.

[21] 国家发展和改革委员会能源研究所. 中国2050 高比例可再生能源发展情景暨途径研究 [R]. 北京: 国家发展和改革委员会能源研究所, 2015.
Energy Research Institute of the National Development and Reform Commission of the PRC. Research on the development scenarios and ways of 2050 high proportion renewable energy in China [R]. Beijing: Energy Research Institute of the National Development and Reform Commission of the PRC, 2015.