DOI 10.15302/J-SSCAE-2018.03.002

我国能源技术革命形势及方向分析

饶宏[1]，李立涅[2]，郭晓斌[1]，许爱东[1]，白浩[1]

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

摘要：能源技术革命是助推能源消费、供给、体制革命和加强国际合作的基础，是实现清洁低碳、安全高效可持续的现代能源体系的支撑，是建设创新型国家的重要内容。本文阐述了我国的能源形势与面临的挑战，以 2020 年、2030 年、2050 年三个不同发展时期作为时间节点，研究了未来的能源结构。分析总结了技术发展的共同趋势，即实现多领域能源技术协同并进。明确了技术发展方向，即实现能源技术的跨越式发展和引领，构建中国特色的能源技术创新体系。

关键词：能源技术革命；能源形势；能源结构；技术趋势；技术方向

中图分类号：T-012　　**文献标识码：**A

Study on Situation and Direction of China Energy Technology Revolution

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

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

Abstract: Energy technology revolution is the foundation for boosting energy consumption revolution, supply revolution, institutional revolution and strengthening international cooperation. The energy technology revolution is the support of a modern energy system that is clean, low-carbon, safe and efficient. It is an important part of building an innovation-oriented country. This paper states the energy situation and challenges in China, studies future energy structures in three time nodes including 2020, 2030 and 2050, and summarizes the common trend of the technology development to realize the collaboration of multi-field energy technologies. Also, the development direction of energy technology is proposed to realize the leapfrog development, and to build an energy technology innovation system with Chinese characteristics.

Keywords: energy technology revolution; energy situation; energy structure; technology trend; technical direction

一、前言

面对能源供需格局新变化、国际能源发展新趋势，2014 年 6 月 13 日，习近平总书记主持召开中央财经领导小组第六次会议，明确提出中国能源安全发展的“四个革命、一个合作”战略思想。能源技术革命的首次提出，标志着能源技术创新已经摆在能源发展全局的核心位置。能源技术革命是助推

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

能源消费、供给、体制革命和加强国际合作的基础，是实现“十三五”时期建设绿色、低碳、安全、高效可持续的现代能源体系目标的支撑，是建设创新型国家的重要内容 [1]。

新一轮能源技术革命已经出现，我国需把握住这一历史性机遇，准确分析我国的能源形势和能源禀赋，展望 2020 年、2030 年和 2050 年能源消费结构，分析核能、风能、太阳能、储能、油气、煤炭、水能、生物质能、智能电网的技术趋势，提出支撑结构转型的能源技术革命方向，积极抢占能源革命的制高点，成为新一轮竞赛规则的制定者和主导者，在未来能源体系和经济政治格局中占据主动地位。

二、能源形势

我国已成为世界上最大的能源生产国和消费国，形成了煤炭、电力、石油、天然气、新能源、可再生能源全面发展的能源供给体系，技术装备水平明显提高，生产生活用能条件显著改善，能源事业发展取得举世瞩目的成就。在供求关系缓和的同时，结构性、体制机制性等深层次矛盾进一步凸显，成为制约能源可持续发展的重要因素，我国能源发展也面临诸多矛盾交织、风险隐患增多的严峻挑战。

（一）能源资源地域分布不均匀

中国煤炭资源主要分布于华北、西北地区，地质开采条件较差，极少可供露天开采。石油、天然气资源多分布于东、中、西部地区和海域，地质条件复杂，埋藏深，勘探开发技术要求较高。未开发的水利资源多集中在西南的高山深谷，开发难度大、成本高。而我国主要能源消费地区集中在东南沿海经济发达地区，大规模、长距离的北煤南运、北油南运、西气东输、西电东送，是中国能源流向的显著特征和能源运输的基本格局。

（二）一次能源消费结构问题依旧突出

2016 年我国一次能源消费结构中，煤炭占比为 61.93%，石油占比为 18.83%，天然气占比为 6.28%，非化石能源占比为 12.96%。说明我国现阶段能源利用过于单一，过于依赖煤炭、石油等化石能源，这与我国的能源资源现状相关，反映出我国能源结构的均衡性差，不能抵抗未来煤炭、石油紧缺而带来的经济风险和能源问题。因此，需要将非化石能源作为满足未来新增能源需求的重点，大力发展核电、水电、风电和太阳能发电。

（三）能源供给安全可持续发展亟待保障

石油对外依存度是衡量一个国家和地区石油供应安全的重要指标，受国内产量下降和进口量增加双重影响，2016 年中国原油对外依存度升至 65.4%。高依存度容易使得我国受到供应中断和国际油价波动等外部因素的影响。亚太地区与中亚地区及海上要道相连，能源地缘政治博弈主要为运输通道的控制、海外资源来源争夺以及海上油气资源争夺，如菲律宾炮制“南海仲裁案”、日本觊觎钓鱼岛涉及油气资源的博弈。我国石油进口的 80% 以上需要通过印度洋和马六甲海峡，马六甲海峡容易受到他国干涉，威胁正常的能源运输通道。因此我国需积极建设中缅天然气石油管道、泰国克拉地峡，开辟新的资源通道。通过“一带一路”加强和俄罗斯、中亚的资源交易，拓展能源进口来源。

（四）能源发展导致的生态环境问题日趋严重

以煤为主的能源消费结构所带来的严重环境污染、煤炭燃烧的低效率和煤炭使用防污染设施的缺乏，导致我国雾霾频繁发生。煤炭消费的巨大体量和煤的高碳性，使煤炭相关二氧化碳排放量成为我国二氧化碳排放的最主要来源，同时导致我国成为世界第一碳排放国。我国部分地区能源生产消费的环境承载能力接近上限，大气污染形势严峻。以气代煤和以电代煤等清洁替代成本高，洁净型煤推广困难，大量煤炭在小锅炉、小窑炉及家庭生活等领域散烧使用，污染物排放严重。高品质清洁油品利用率较低，交通用油等亟需改造升级。在核电大发展背景下，我国核电站卸出的乏燃料数量在不断增长，乏燃料后处理能力严重不足，乏燃料储存与废物处置压力日益增加。

（五）能源综合利用效率偏低

世界银行统计数据表明，2016 年我国单位 GDP 能耗为 3.7 tce / 万美元，是世界能耗强度平均水平的 1.4 倍，是发达国家平均水平的 2.1 倍，与国外发达国家相比，我国能源综合利用效率依然偏低。能源综合利用效率是指能源在开采、加工、转

换、储运和利用过程中得到的有效能与实际输出能之比，包括能源生产和中间环节效率及终端能源使用效率。在能源生产环节，煤电转换效率仍有提升空间；在能源传输环节，电力、天然气峰谷差逐渐增大，系统调峰能力严重不足，长距离大规模外送需配套大量煤电用以调峰，输送清洁能源比例偏低，部分地区弃风、弃水、弃光问题严重，系统利用效率不高；在终端能源使用环节，电力、热力、燃气等不同供能系统集成互补、梯级利用程度不高，需求侧响应机制尚未充分建立，供应能力大都按照满足最大负荷需要设计，造成系统设备利用率持续下降。

（六）各能源领域尚未有明确的长周期技术路线和技术体系

核能、风能、太阳能、储能、油气资源、煤炭、水能、生物质能、智能电网领域的技术取得了快速发展，但部分关键核心技术装备仍受制于人，重大能源工程依赖进口设备的现象仍较为普遍，技术空心化和对外依存度偏高的现象尚未完全解决。创新模式有待升级，引进消化吸收的技术成果较多，但与国情相适应的原创性成果不足。各能源领域没有明确确定未来的技术体系，无法精准识别重点的技术领域和相应的关键技术，容易造成技术力量分散，无法集中人力、物力、财力攻克重点技术难题，核心技术升级缓慢。相关研究机构制定了研究路线，但未形成长周期的技术路线，容易造成各能源领域的技术冗余研究，无法通过统筹兼顾，协调发展，形成技术领域的交互推进，同时没有清晰的阶段发展目标和技术的演变关系，无法形成技术节点的衔接和稳步升级。通过制定明确的技术路线和技术体系，将有助于引导广大企业和科研机构在充分进行市场调研、审慎考虑自身条件的基础上，确定本单位的发展方向和重点。

三、能源消费结构展望

“十九大”报告指出要构建清洁低碳、安全高效的能源体系，未来将形成煤、油、气、核、新能源、可再生能源多轮驱动的能源结构。面对能源结构的重大转型，能源技术革命要为新型能源体系结构提供重要支撑。从目前可以预见的趋势出发，基于现有政策情景，分析了 2020 年、2030 年以及 2050 年中国的能源消费结构，为制定能源技术路线、构建能源技术体系提供参考。

（一）中国能源现状

由图 1 和图 2 可知，我国能源消费结构呈现出向清洁能源转型的大趋势。2016 年全年能源消费总量为 4.36×10^9 tce，比上年增长 1.4%，为世界能源最大消费国，其中化石能源占比 87.11%。煤炭消费量为 2.7×10^9 tce，同比下降 4.7%，占能源消费总量的 61.93%，比上年下降 2%。石油消费量为 8.21×10^8 tce，原油消费量增长 5.5%，占比为 18.83%。天然气消费量为 2.74×10^8 tce，增长 8.0%，占比为 6.28%。全社会用电量为 5.9198×10^{12} kW·h，

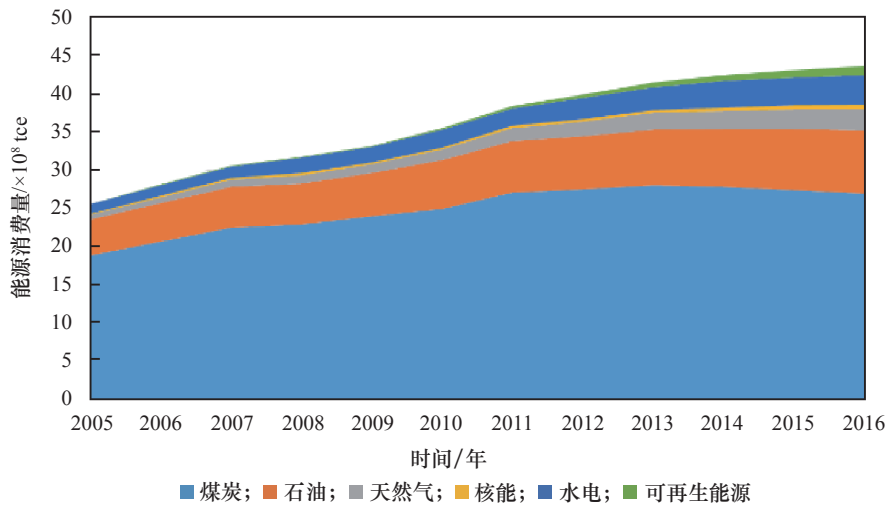

图 1　2005—2016 年我国能源消费结构趋势图

电力消费量增长 5.0%。水电、风电、核电等非化石能源消费量占能源消费总量的12.96%，提高了1.3%。

（二）2020 年中国能源展望

2016—2020 年，为能源结构优化期，我国需把发展清洁低碳能源作为调整能源结构的主攻方向，坚持发展非化石能源与清洁高效利用化石能源并举，坚持发展非煤能源发电与煤电清洁高效有序利用并举，降低煤炭的消费比重，显著提高非化石能源和天然气消费比重，加快推进主体能源由油气替代煤炭、非化石能源替代化石能源的双重更替 [2~5]。

2020 年，能源消费总量控制在 4.7×10^9~4.9×10^9 tce。煤炭、油气、非化石能源消费比例达到 6∶2.5∶1.5。煤炭消费总量控制在 4.1×10^9 t 以内，煤炭消费比重降低到 58%，基本达到峰值水平（如图 3 所示）。石油消费总量为 5.9×10^8 t，消费比重达到 17%。天然气消费比重逐渐上升，最终达到 10%，即 4.1×10^{11} m^3。非化石能源消费比重提高到 15% 以上，其中核能利用量达到 1.7×10^8 tce、水能利用量达到 3.7×10^8 tce、风能利用量达到 1.5×10^8 tce、太阳能利用量达到 1.4×10^8 tce、生物质能利用量达到 6×10^7 tce [6]。

（三）2030 年中国能源展望

2021—2030 年，为能源变革期，实现能源消费显著优化和能源绿色低碳发展，力争 2030 年煤炭、油气、非化石能源消费比例达到 5∶3∶2，非化石能源占比将提升至 22%，打破对化石能源绝对依赖的局面。风能、水能、太阳能、核能等占一次能源消费的比重将上升 [7~10]。从化石能源结构上看，从煤炭一家独大向着煤、气、油结构逐渐合理的方向演进，能源消费结构更趋低碳化和清洁化。

2020—2030 年期间能源需求总量增长放缓，2030 年总量达到 5.3×10^9 tce。一次能源消费结构持续优化，传统石化能源消费占比将下降至 78%（如图 4 所示）。煤炭消费峰值已经过去，消费量回落至 3.6×10^9 tce 左右，占比降至 49%；2020—2030 年中国石油供需基本以 1%~2% 的速度增长，到 2030 年石油消费量在 6.5×10^8 t 左右，占比降至 17%。2020—2030 年中国天然气供需增长率降到 5% 左右，2030 年中国天然气需求量为 4.1×10^{11} m^3，占能源需求总量比重将达到 12% [11,12]；石油占比下降，天然气占比上升，油气比趋于合理，在 2030 年达到 1∶0.7 左右。非化石能源占比上升到 22% 左右，其中核能占 5%，水能占 10%，可再生能源占 7%。

（四）2050 年中国能源展望

2030—2050 年，是能源革命的定型期，将形成新型能源体系。经过能源供给侧改革，能源消费在 2035 年前后达到峰值，达到 5.5×10^9 tce 左右，然后 2030—2040 年年均降低 0.04%，2040—2050 年年均降低 0.5%，最终在 2050 年一次能源消费量下降到 5×10^9 tce [7,8]。通过走高比例可再生能源利用路线，实现《能源生产和消费战略》中对 2050 年的展望，非化石能源消费占比为 50% 以上。

中国经济增长放缓、结构优化以及对环境污染和气候变化的高度重视，促使煤炭消费提前进入下降趋势。在严格控煤政策下，中国煤炭消费逐步下

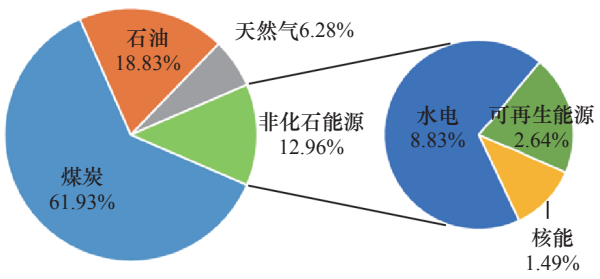

图 2　2016 年我国一次能源消费结构

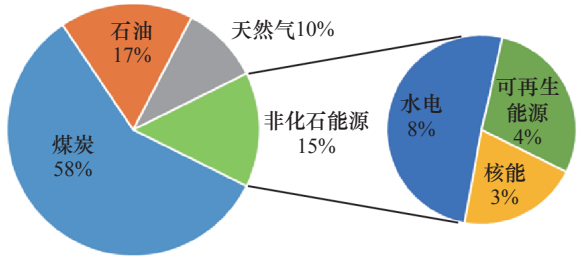

图 3　2020 年我国一次能源消费结构展望

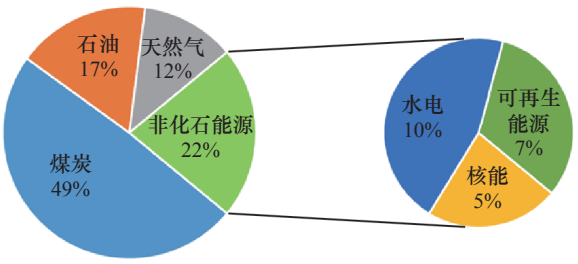

图 4　2030 年我国一次能源消费结构展望

降到 2050 年的 1.86×10^9 tce，年均降低 1%。受经济增速下降和环保政策的影响，煤电增长将受到制约，同时考虑到煤电效率的提升，预计发电用煤在 2030 年之后持续下降，届时新增电力需求将主要依赖于可再生能源和核电。2035 年之后，随着燃油经济性不断提高、燃料替代和电动汽车普及加快，成品油消费量开始出现较快下降，最终 2050 年石油消费下降到 5×10^8 t 左右。天然气需求持续增长，2016—2050 年年均增长 3.8% 左右，2050 年将达到 7×10^{11} m^3，接近美国目前消费水平。同时天然气净进口量到 2050 年将高达 2.85×10^{11} m^3 左右，对外依存度达到 40% [13]。

中国化石能源消费将在 2030 年达到峰值，2030—2050 年年均下降 2.3%，2050 年占比达到 49%。煤炭消费比重持续下降 [14,15]，在 2050 年达到 26%（如图 5 所示）；电力替代技术快速发展，导致石油消费比重快速下降，直到 2050 年占比降到 9%；天然气消费比重则上升到 14% 左右。非化石能源消费增速远快于化石能源增速，2050 年达到 1.54×10^9 tce，年均增长 1.3%，消费比重达到 50% 以上，其中太阳能、风能等其他可再生能源比重上升最快，由 2030 年的 7% 上升至 2050 年的 26%。

四、技术发展趋势

核能、风能、太阳能、储能、油气资源、煤炭、水能、生物质能、智能电网与能源网的融合等不同能源技术方向的发展趋势和技术路线不尽相同，但存在重叠内容和共性部分。总结归纳起来，不同类型能源的技术发展趋势将呈现共基 / 交叉、渗透 / 融合、先进 / 高端、智能 / 高效等特征。技术突破和创新将更加注重基础研究、技术研发、工程示范等工作的统筹协调和衔接，以及研发、设计、制造、试验和运行等环节的相互促进和闭环的实质性协同合作。

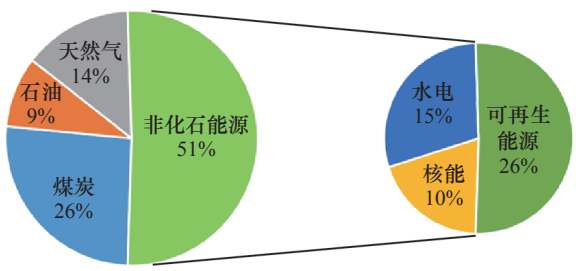

图 5　2050 年我国一次能源消费结构展望

（一）不同类型能源具有共同的内生动力

各类能源技术的进步和突破越发依赖于基础材料、先进制造和信息通信等基础学科和原创性技术的发展。不同能源类型具有不同的技术发展方向，但在理论、器件和材料等层面拥有共同的基础和内生动力，同一基础性重大突破将可能同时给多个能源技术方向带来跨越性发展。未来能源技术发展趋势将更加强调能源相关技术与非能源相关技术的交叉联系和创新，尤其是能源、材料、环境、信息和数据等交叉方向的基础理论研究。比如，耐高温材料研发是提高核能、油气和煤炭等各类能源技术方向的发电装备制造水平的关键，可提高能源利用效率和机组发电效率；纳米技术是太阳能和油气资源等能源技术方向的共同支撑技术；先进传感技术在油气资源探测、风电场智能监控、水情测报、智能电网与能源网融合等方面发挥重要作用；先进电力电子变换技术是风能、太阳能、储能、智能电网与能源网的融合等能源技术方向的共同核心技术，具有广泛的能源领域应用场景，而高压大容量功率半导体器件和宽禁带半导体器件是电力电子技术发展的基础。

（二）不同类型能源相互渗透和不断融合

在能源生产侧、传输侧和消费侧等不同环节以及在物理、信息等不同层面，各类能源互相渗透和不断融合，信息流与能量流的耦合越发紧密。在各类能源技术取得共同和全面进步的基础上，建设安全、低碳、清洁、高效的新一代综合能源系统是未来的技术发展趋势，这不是简单的某个环节的技术进步，而是贯穿各类能源生产、供给与消费的全过程，打破目前各类能源计划单列、条块分割、各自垄断的固有藩篱，为各种一次、二次能源的生产、传输、使用、存储和转换提供先进装备和可靠网络。能源体制革命与互联网渗透发展的新形势，为能源领域的技术融合创新提供了新机遇。比如，光热电站与其他能源形式的整合与集成，诸如光热 – 天然气联合发电、光热 – 生物质联合发电、光热 – 风电联合发电、光热 – 燃煤电站梯级利用等都将具有发展前景；天然气系统在负荷侧通过热电联产或冷热

电三联供等耦合设备与电力系统实现交互，在源端或者网侧通过电转气技术实现多类型能源联合优化运行；热力系统在受端通过电 – 热耦合和存储技术及设备，完成与电力系统结合；耦合设备的增加为互联系统的供应带来更多的灵活性和可靠性，有利于就地消纳分布式可再生能源，并通过实现能量的长时间、大范围时空平移达到有效消纳大规模集中式可再生能源发电；信息通信技术实现新一代综合能源系统各能源系统、各环节之间的高效信息通信与交互共享，为综合能源系统从产能到用能的全过程实时信息采集、多能流生产协同控制、多能调度和交易服务等提供技术支撑。

（三）能源相关技术水平更为高端和先进

能源生产、传输、使用、存储和转换等环节相关的器件 / 部件、装备 / 系统、工艺 / 集成等技术水平向更加高端、先进方向发展，具体体现在参数高、容量大、体积 / 密度大、安全系数高、集成度高等方面，主要目的是提高能源利用效率、降低能源利用综合成本。比如，铀资源利用率可到 60% 以上的快堆技术是核能下一步的发展方向；风能开发向高空和海上发展，需重点突破 10 MW 及以上高可靠性海上风机的关键部件技术，包括 100 m 级超大型、轻量化风电机组叶片和风电机组变流器；太阳能利用需实现单结晶体硅太阳电池效率达到 25% 以上，且需掌握 35 年长寿命低衰减晶体硅电池组件成套重大工艺及核心装备技术；在储能方面，需突破 10 MW/100 MWh 和 100 MW/800 MWh 的超临界压缩空气储能系统中宽负荷压缩机和多级高负荷透平膨胀机、紧凑式蓄热（冷）换热器等核心部件的流动、结构与强度设计技术，锂硫电池能量密度达到 300 Wh/kg，铅炭储能电池循环寿命 >5 000 次；油气资源开发朝深海和深井方向发展，宽方位多分量高分辨率地震勘探技术需满足东部 4 500 m/ 分辨率 <3 m、西部 7 000 m/ 分辨率 <7 m，识别断层断距 < 5 m 等需求；700 ℃超超临界燃煤发电技术是煤炭清洁高效利用的核心技术，需研制 700 ℃机组关键材料和关键部件，同时需掌握 600 MW 等级 700 ℃先进超超临界发电系统的方案设计技术；水能资源开发利用向高落差方向发展，需发展 700 m 水头、4×10^5 kV 及以上冲击式水电站技术；直流输电向高电压等级发展，重点突破 ±1 100 kV 特高压直流输电关键技术和 500 kV 以下基于架空线的柔性直流输电技术。

（四）智能化技术深度影响和改变能源行业

以先进传感技术、信息通信技术、控制技术、物联网技术、云计算技术、大数据技术和人工智能技术等为基础的智能化技术体系将深度渗透和影响各传统能源行业及其产业链，可实现能源生产、传输、使用、存储和转换等环节的全方位感知、数字化管理、智能化决策和自动化运维。在各能源系统物理层面融合和自身智能化提升的基础上，通过互联网技术进一步促进各能源系统在信息层面的融合，实现综合能源系统的智能化，建立能源生产运行的监控、管理和调度信息共同服务网络，推动能源生产和消费革命，进一步提高能源利用效率，实现可再生能源的全额消纳。比如，未来油气资源技术将由传统技术体系转向智能化技术体系，基于纳米尺度下的微纳技术、智能材料技术、人工智能和量子技术，以智能化精确导向钻完井系统、纳米采油、原位改质等极具颠覆性的技术组成的新一代油气资源勘探开发智能化技术体系正在形成；在核电站智能化技术方面，通过提高燃料可利用率、在线监测、智能诊断等技术减少备品备件，实现高效运营，未来将以计算机超算技术为基础，实现核电站设计分析的精细化与多物理场耦合；在发电设备方面，将发展基于物联网、大数据和云计算的设备全寿命周期设计、控制、智能运维及故障诊断技术；包括电网在内的综合能源系统运行将实现高度智能化，运行状态透明化，形成趋零边际成本的能源输送网，整个能源网络泛在化，可高智能、深优化、高可靠性地获取各类能源，并优先支持可再生能源电力传输和消纳；基于互联网的综合能源信息融合将带来商业模式创新，并衍生新的能源产业链。

五、能源技术革命方向

新一轮科技革命和产业变革正在兴起，全球科技创新进入高度活跃期，新兴能源技术正以前所未有的速度加快对传统能源技术的替代，正在并将持续改变世界能源格局。我国需紧跟能源产业转型升级步伐，通过不断创新发展思路，集中力量突破重大关键技术瓶颈，推动能源技术革命，引领能源生

产和消费方式的重大变革。我国能源技术革命需体现科学性、全局性和战略性，既要着眼于当前，也要考虑长远发展，为全面构建安全、绿色、低碳、经济和可持续的现代能源产业体系提供技术支撑。

（一）研发创新性技术，实现能源技术自主创新

创新性技术是能源技术革命的核心和牵引力。目前我国能源领域核心技术缺乏，关键装备及材料依赖进口问题比较突出，三代核电、新能源、页岩气等领域关键技术长期以引进消化吸收为主，燃气轮机及高温材料、海洋油气勘探开发技术装备等长期落后。能源科技一直走追赶与超越并重的道路，而实践反复证明，任何关键、核心技术都不是舶来的，自主创新才是最终的落脚点。坚持发展创新性技术，占领能源技术高峰，彻底摆脱了对外依赖，实现能源技术自主化，满足短期能源技术需求，助力未来能源发展方向转型。

近期（2020 年前），能源技术革命的方向是在能源各领域推进创新性技术研发攻关和自主创新，强化原始创新、集成创新和引进消化吸收再创新。在核能技术领域，加强关注自主三代核电技术优化和型谱化产品开发，带动核电产业链协调发展。在可再生能源和储能技术领域，关注陆上风电机组智能制造与运维技术、高效光伏和大容量储能关键部件制造技术、复杂地质条件下的水电站筑坝技术、生物燃料规模化生产示范技术。在节能领域，关注先进节能标准、检测、认证和评估技术。在化石能源技术领域，关注油气行业微机电系统 / 纳机电系统和智能材料两大核心技术。在智能电网和能源网融合技术领域，关注交直流混合输电技术、以智能电网为核心的能源供应技术。

（二）部署前瞻性技术，赶超国际先进水平

前瞻性技术是能源技术革命的基础和推动力。国内外的科学技术史表明，若一国的能源领域基础研究缺乏前瞻性，其科学技术水平将长期处于跟随状态，很难追赶其他国家的先进水平。我国在世界能源技术革命和产业转型升级过程中，只有以前瞻性的战略眼光，研究布局能源技术体系，坚持发展前瞻性技术，才能在关键技术上、关键时间节点上，实现弯道超车，逐步追赶甚至赶超国际先进水平，从而推动我国能源技术革命的不断前进，促进我国能源结构升级。

中期（2030 年前），能源技术革命的方向是在能源各领域加强未来潜在技术发展方向的布局，科学分析各技术的可行性及技术发展潜力，产学研用协同闭环，逐步缩小与国际先进水平的差距，甚至在某些能源技术方向取得突破，实现超越。在核能领域，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物质释放，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多用途利用。在可再生能源和储能技术领域，关注 10 MW 级海上风电机组智能制造与运维技术；高参数太阳能热发电技术；高效储能结构设计及材料研制技术；生态友好型小水电和高水头水电站设计及机组制造技术；生物质混燃发电和气化发电。在节能技术领域，关注自主知识产权的先进节能技术体系。在化石能源技术领域，关注深层油气开发技术以及特殊品质油气开发技术；不同煤种先进煤气化技术。在智能电网和能源网融合技术领域，关注综合能源网络技术以及透明能源网络技术。

（三）探索颠覆性技术，领跑世界能源科技

颠覆性技术是能源技术革命的突破口和爆发力。探索和发展颠覆性技术，对我国在局部领域、关键行业和主流产品领跑世界能源科技意义深远。颠覆性技术打破传统的技术发展路线，是对渐进性技术的跨越式发展，必须突破既有思维模式和“渐进 – 突变”的纵向发展模式，跳出自身学科范畴，不断开拓跨学科研究，开展多种学科、多个方向的横向渗透和交叉交互研发试验工作，如量子计算、石墨烯材料、超导材料、互联网技术等在石油化工、储能、新能源、电力系统等各个领域的应用。

远期（2050 年前），能源技术革命的方向是敏锐识别、捕获和培育那些对能源供应安全具有战略影响的颠覆性技术，科学地、系统地开展研究，抢占能源新科技变革的战略主动权，奠定我国在未来世界能源科技竞争格局中的优势地位。在核能技术领域，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。在可再生能源和储能技术领域，关注高空风力发电等新型风能利用

技术及装备；新型高效太阳能电池技术；氢储能以及多功能全新混合储能技术；水电站智能设计、智能制造、智能发电和智能流域综合技术；高品质能源植物新品种的产业化技术。在节能技术领域，关注先进节能技术与新一代信息技术深度融合。在化石能源技术领域，关注极限钻井以及智能采油技术；新型煤基发电技术；磁流体发电联合循环发电技术。在智能电网和能源网融合技术领域，关注基于功能性材料的电子开关以及泛在信息能源网。

六、结语

能源结构转型需要能源技术支撑，坚持多能源领域基础技术研究，推动能源交叉融合，促进技术高端化和智能化。坚持研究创新性技术、前瞻性技术和颠覆性技术，支撑在 2020 年、2030 年和 2050 年完成能源结构优化、变革以及定型，使得非化石能源占比提高到 15%、22% 和 51%，逐步构建清洁低碳、安全高效的能源体系，实现能源技术革命战略。

参考文献

[1] 杜祥琬, 周大地. 中国的科学、绿色、低碳能源战略 [J]. 中国工程科学, 2011, 13(6): 4–10.
Du X W, Zhou D D. China’s scientific, green and low carbon energy strategy [J]. Strategic Study of CAE, 2011, 13(6): 4–10.

[2] 中国工程院. 中国能源中长期(2030, 2050) 发展战略研究(综合卷) [M]. 北京: 科学出版社, 2011.
Chinese Academy of Engineering. China’s medium and long term (2030, 2050) development strategy (comprehensive volume)[M]. Beijing: China Science Publishing & Media Ltd., 2011.

[3] Wang Z, Zhu Y, Zhu Y, et al. Energy structure change and carbon emission trends in China [J]. Energy, 2016, 115: 369–377.

[4] Wang K, Wei Y M. China’s regional industrial energy efficiency and carbon emissions abatement costs [J]. Applied Energy, 2014, 130: 617–631.

[5] 国家发展和改革委员会, 国家能源局. 能源发展“十三五”规划 [R]. 北京: 国家发展和改革委员会, 国家能源局, 2017.
National Development and Reform Commission, National Energy Administration of the PRC. “13th Five-Year” plan for energy development [R]. Beijing: National Development and Reform Commission, National Energy Administration of the PRC, 2017.

[6] 国家发展和改革委员会, 国家能源局. 电力发展“十三五”规划 [R]. 北京: 国家发展和改革委员会, 国家能源局, 2017.
National Development and Reform Commission, National Energy Administration of the PRC. “13th Five-Year” plan for electric power development [R]. Beijing: National Development and Reform Commission, National Energy Administration of the PRC, 2017.

[7] 中国社会科学院. 世界能源中国展望 [R]. 北京: 中国社会科学院, 2015.
Chinese Academy of Social Sciences. World energy China outlook [R]. Beijing: Chinese Academy of Social Sciences, 2015.

[8] 周志霞. 2050 年, 世界能源会怎样?——专访中国石油经济技术研究院发展战略所副所长杜伟 [J]. 中国石油石化, 2016 (18): 42–45.
Zhou Z X. What is the world energy conference in 2050? Interview with Du Wei, deputy director of the Development Strategy Institute of China Petroleum Economics and Technology Research Institute [J]. China Petrochem, 2016 (18): 42–45.

[9] 中国能源研究会. 中国能源展望2030 [R]. 北京: 中国能源研究会, 2016.
China Energy Research Society. China’s energy outlook 2030 [R]. Beijing: China Energy Research Society, 2016.

[10] 国家发展和改革委员会, 国家能源局. 能源技术革命创新行动计划(2016—2030 年) [R]. 北京: 国家发展和改革委员会, 国家能源局, 2017.
National Development and Reform Commission, National Energy Administration of the PRC. Innovation action plan of energy technology revolution (2016—2030) [R]. Beijing: National Development and Reform Commission, National Energy Administration of the PRC, 2017.

[11] 国家发展和改革委员会, 国家能源局. 能源技术革命重点创新行动路线图 [R]. 北京: 国家发展和改革委员会, 国家能源局, 2017.
National Development and Reform Commission, National Energy Administration of the PRC. Road map of key innovation action for energy technology revolution [R]. Beijing: National Development and Reform Commission, National Energy Administration of the PRC, 2017.

[12] 国家发展和改革委员会, 国家能源局. 能源生产和消费革命战略(2016—2030 年) [R]. 北京: 国家发展和改革委员会, 国家能源局, 2017.
National Development and Reform Commission, National Energy Administration of the PRC. The strategy of energy production and consumption revolution (2016—2030) [R]. Beijing: National Development and Reform Commission, National Energy Administration of the PRC, 2017.

[13] Lawrence Berkeley National Laboratory. China’s energy and carbon emissions outlook to 2050 [R]. Berkeley Hills: Lawrence Berkeley National Laboratory, 2017.

[14] Royal Dutch Shell. Shell energy scenarios to 2050 [R]. Hague: Royal Dutch Shell, 2014.

[15] International Energy Forum (IEF). Global energy outlook 2050 [R]. Riyadh: International Energy Forum (IEF), 2016.