

# 中国工程科技能源领域 2035 发展趋势与战略对策研究

张博<sup>1,2</sup>, 郭丹凝<sup>2</sup>, 彭苏萍<sup>1</sup>

(1. 中国矿业大学(北京)煤炭资源与安全开采国家重点实验室, 北京 100083;

2. 中国矿业大学(北京)管理学院, 北京 100083)

**摘要:** 未来 20 年, 能源科技创新将引发我国能源产业形态与特征的深刻变革。本文在分析我国能源发展背景与需求的基础上, 针对我国能源工程科技发展现状与存在的问题, 提出了我国能源工程科技发展的中长期战略对策, 包括总体思路、重点战略任务以及主要的技术发展方向, 并对能源工程科技发展的可能影响与 2035 年图景进行了展望。研究结果将为建立符合中国发展需求和资源特色的能源工程科技创新体系, 明确面向 2035 年关系全局和长远发展的能源工程科技发展战略提供参考依据。

**关键词:** 能源工程科技; 趋势分析; 技术方向; 面向 2035 年; 发展战略

**中图分类号:** F206 **文献标识码:** A

## Development Trends and Strategic Research for China's Energy Engineering Science and Technology to 2035

Zhang Bo<sup>1,2</sup>, Guo Danning<sup>2</sup>, Peng Suping<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Coal Resources and Safe Mining, China University of Mining & Technology (Beijing), Beijing 100083,

China; 2. School of Management, China University of Mining & Technology (Beijing), Beijing 100083, China)

**Abstract:** In the next 20 years, science and technology innovation in energy will bring about profound reform in the characteristics and patterns of China's energy industries. This paper analyzes the basic background and related strategic demands of China's energy development, describes the present situation, and identifies existing problems in energy engineering science and technology. It also proposes medium- and long-term development strategies for China's energy engineering science and technology, including overall conception, main tasks, and important technical directions. Trends, impacts, and a possible blueprint for energy engineering science and technology to 2035 are predicted. These results can contribute to the scientific establishment of innovation systems in energy engineering science and technology, based on China's energy resources and development conditions. Furthermore, these results can contribute to the formation of China's strategic countermeasures in energy engineering science and technology to 2035 by considering China's overall and long-term development demands.

**Keywords:** energy engineering science and technology; trend analysis; technical direction; to 2035; development strategy

收稿日期: 2016-12-12; 修回日期: 2016-12-20

通讯作者: 张博, 中国矿业大学(北京), 副教授, 主要从事能源经济与政策研究; E-mail: zhangbo@cumt.edu.cn

资助项目: 中国工程院咨询项目“中国工程科技 2035 发展战略研究”(2015-ZD-14)、“能源与矿业工程科技 2035 发展战略研究”(2016-XY-19)、“能源科技发展方向及其对我国能源格局影响研究”(2015-XY-51); 国家自然科学基金项目(L1624054)

本刊网址: www.enginsci.cn

## 一、前言

当前,全球处于产业、经济和社会加速变革的时期,伴随着新一轮科技和产业革命,世界能源多元化、清洁化和低碳化的趋势进一步加强,能源结构加快调整,能源资源版图正在发生深刻变化[1]。技术进步对全球能源供应结构产生了巨大冲击,能源开发利用技术水平的提升显著提高了全球能源供应能力,化石能源预测的枯竭期被不断推迟[2],清洁高效的能源开发利用技术赋予了化石能源新的竞争力。非化石能源的快速发展推动了能源生产模式的多元化,促进了能源生产和消费结构的转型升级。可再生能源的发展促进了分布式能源系统的发展,可再生能源发电与现代电网也在不断融合,同时,现代电网向大电网和微型电网并行发展并逐步向智能化方向发展。能源新技术的推广和应用,将有望在化石能源清洁高效利用、海洋和非常规油气资源开发、核能安全利用、可再生能源大规模开发利用、智能电网、大规模储能与分布式能源、高性能能源装备及关键材料等诸多领域发展出新的产业集群与经济增长点[3]。能源技术创新正在成为引领能源产业变革的原动力。

未来20年,积极应对资源、环境、经济挑战始终是全球能源发展面临的重大课题。发达国家和新兴经济体不断出台政策,加速能源新技术研发与产业布局,致力于抢占新一轮绿色、低碳能源技术与产业发展的制高点。推动能源生产和消费革命,确保国家能源安全,是我国中长期能源发展的中心任务[4]。科技是引发和支撑我国能源革命的关键[5]。实现世界上庞大、复杂的能源生产和消费体系的长期稳定和可持续发展,亟待能源科技创新驱动与支撑。因此,建立符合我国发展需求和资源特色的能源工程科技创新体系,需准确把握国内外能源发展态势,识别国家对能源工程科技的重大战略需求;对面向2035年的能源工程科技发展趋势开展前瞻判断,提出关系全局和长远发展的重点领域、优先技术方向与对策,进而为我国中长期能源工程科技发展的系统谋划和前瞻部署提供参考。

## 二、我国能源发展的基本态势与工程科技需求

### (一) 我国能源发展的基本态势

我国是世界最大的能源生产和消费国,能源

工业的快速发展为国民经济和社会发展作出了重要贡献,然而粗放的经济增长方式和“需求导向”的能源供应模式导致能源开发利用规模急剧扩大。在2015年我国占全球能源消费量的23%,占全球能源消费增长的34%。我国能源消费增幅虽然只有1.5%,创近20年最低增幅,但已连续15年成为全球最大的能源消费增长国[6]。同时,我国各品种能源发展规模与速度不一,能源开发利用规模体量差巨大,面临的问题复杂多样。

我国能源资源禀赋条件差异较大,拥有总量较大的化石能源资源,其中煤炭资源占主导地位,已探明的油气资源储量相对不足,非常规油气资源开发潜力较大。然而,与世界其他能源资源丰富的国家相比,我国人均可采能源资源储量较低,优质、绿色能源资源紧缺,煤炭、油气资源开发地质条件较差,技术要求相对较高。非常规能源资源勘探程度低,经济性较差[7]。我国可供大规模开发的可再生能源资源较为丰富,但大都集中于远离负荷中心的西部地区。能源生产和消费空间格局存在很大的错位,能源资源赋存与水资源、生态环境条件、经济发展水平极不协调,大规模、长距离的能源输送格局需要长期存在。

煤炭等传统化石能源在我国一次能源结构中占比过大,且远未被优质化开发利用。我国是全球煤炭生产和消费第一大国,煤炭作为主体能源,为促进经济社会发展和保障能源安全作出了重大贡献,但煤炭在建煤矿规模大、产能过剩严重,科学绿色开发的煤炭产能比例低等问题突出,煤炭利用面临着大气污染控制、温室气体减排和生态环境保护的多重压力,清洁高效利用水平总体不高。我国已成为油气生产与消费大国,非常规油气进入规模化勘探和工业化开发阶段,但油气资源国内保障程度较低,难以满足巨大的能源需求。国内石油稳步发展难度增大,天然气上产速度受资源品位下降影响有所放缓,导致油气对外依存度持续快速攀升。

我国非化石能源发展虽然较快,但规模化程度仍然有限,替代传统化石能源的作用并不突出。核电是我国有实力在世界上获得核心竞争力的高新技术领域,目前在自主三代核电机型、装备、核燃料等方面具备规模化发展条件,迎来了规模发展核电的时期,但是在国家能源结构调整过程中,受规模限制仍难以发挥较大作用。我国可再生能源发电规

模世界第一，太阳能光伏、风能等非水可再生能源发展迅速，已成为全球最大的风电市场，是全球风电新增装机容量最大的国家，也是世界最大的太阳能发电国，发电竞争力显著增强，但在装备制造技术、运行管理、电力消纳等诸多方面面临挑战。我国已建成世界上规模最大的电力系统，具备全国范围内大规模跨区域配置和优化能源资源的能力，智能电网的建设持续稳步推进，但可再生能源发展的支撑能力、输配电的经济性和可靠性还有待提高。

当前，能源资源对我国经济发展的制约得到有效缓解，生态环境保护和应对气候变化上升为我国能源发展面临的重大问题。我国能源利用效率仍然偏低，终端用电比例过低，人均用电量少，与发达国家差距明显，全社会仍有巨大的节能潜力。为保障能源需求和国家能源安全，优化能源生产和消费结构，改善生态环境质量和应对气候变化，培育经济增长新动能，亟待能源工程科技的创新发展。

## （二）能源工程技术发展现状与问题

“十二五”以来，我国能源新技术研发与产业化进程正在不断加快，能源行业通过自主创新以及大规模技术引进和消化吸收、再创新等方式，不同领域的能源工程科技水平和创新能力均得以持续提升，部分领域达到国际领先水平 [5]。我国大型煤矿建设和开采技术处于世界领先水平，以燃煤发电污染物超低排放技术、先进燃煤发电技术和现代煤化工技术为代表的煤炭清洁高效转化与利用取得重要突破；油气科技在油气藏勘探理论技术、老油田精细注水与化学驱提高采收率技术等方面居世界前列，深水油气、致密气、页岩气、致密油、煤层气的勘探开发技术取得重大进展；核能产业创新能力进一步加强，掌握了第三代核电技术的大部分核心关键技术，开发了具有自主知识产权的大型先进压水堆机型，并走出国门；可再生能源产业发展迅速，新增发电装机已经超过化石能源新增装机，太阳能发电技术基本与世界保持同步，风电科技在大型风机叶片设计和制造方面已经跻身世界领先水平；在特高压 / 柔性输电、大电网稳定控制与优化调度、可再生能源发电等技术领域已经取得丰硕成果，在智能电网关键技术、装备和示范应用方面具有良好的发展基础；在分布式电源 / 储能、节能、燃料电池等新兴技术领域也取得了较大进步。

同时，我国能源技术发展仍面临诸多问题，在能源勘探开发、加工转换、利用工艺、设备制造等领域，创新模式有待升级。煤炭行业清洁高效转化和利用水平需要提升，先进煤炭开发利用技术急需进一步研发、示范推广；非常规油气开发仍存在关键技术制约，非常规油气和深海油气尚未实现大规模商业化开发；核电装机仍没有形成规模，核电技术的安全高效发展需要进一步加强；可再生能源领域自主创新的核心技术不足，特别是光伏电池、太阳能光热发电、地热能发电等核心技术装备仍然在很大程度上要依赖国外进口，并网消纳等诸多问题依然突出；智能电网发展仍受制于技术、市场等多方面因素。此外，我国重大能源工程依赖进口设备的现象仍然较为普遍 [5]。在前沿技术创新与应用方面，燃煤发电超低排放、整体煤气化联合循环发电系统（IGCC）/ 整体煤气化燃料电池发电技术（IGFC）、微地震、数字油田、水平井体积压裂、深海油气和非常规油气勘探开发、特高压、第三代和第四代核电、智能电网、节能与新能源汽车、太阳能光伏发电、风力发电、燃料电池和大规模储能等技术的研发与产业化进程亟待加强。

## 三、我国能源工程科技发展战略对策

### （一）总体思路

我国中长期能源工程科技发展须从经济社会发展阶段与国家重大战略需求出发，由于传统化石能源在我国能源体系中的基础性地位还无法替代，需要通过发展化石能源清洁高效开发利用技术，实现“高碳能源减量革命”；天然气、核能和可再生能源技术的快速发展与规模化应用，将有效推进“清洁能源增量革命”；智能电网、储能、能源互联网、节能等技术的不断突破，将提高电能终端能源消费中的比重，大幅提高能源系统整体效率，助力“系统节能提效革命” [8]。因而，在尊重能源技术发展规律的基础上，需加快供应侧绿色化开发科技创新，强化消费侧清洁化、低碳化、集约化利用科技创新，优先发展节能减排技术，从原始创新、技术开发、商业化，再到推广、应用的能源科技发展全价值链，超前布局能源新技术与装备，通过重点示范工程建设带动关键技术研究 and 重大装备的国产化发展。根本目的在于建立符合我国发展需求和

资源特色、具备国际竞争力的能源工程科技体系,支撑中国能源体系重塑,实现能源开发利用从清洁、高效,到绿色、低碳,再到智慧、多元化的转变,提供具有资源、环境、经济竞争力的能源产品与服务,满足经济社会可持续发展的能源需求,助力我国从能源大国向能源强国转变。

## (二) 重点战略任务 [9]

### 1. 煤炭工程科技

发展煤炭绿色开发和高效清洁低碳发电技术是煤炭开发利用方式转型的重点任务。一是煤炭安全高效开采始终是煤炭开发的重要课题。针对西部煤炭主产区的煤炭开采水资源保护利用和矿区地表生态修复技术是未来煤炭开发面临的重大工程科技问题,同时煤炭精细化勘探、西部复杂煤层安全高效开采、煤炭与铀矿和油气以及其他共伴生资源的协调共采、智能化开采与智能矿山也是未来急需攻克的技术难题。二是煤炭利用朝着高效、节能、节水和清洁的方向发展。积极开发新一代清洁、高效和污染物近零排放技术,实现二氧化碳减排是世界燃煤发电技术发展的热点和难点 [10]。以燃煤发电技术为重点,先进 700 °C 超超临界燃煤发电技术,新一代 IGCC 与 IGFC 发电及多联产技术,燃煤电厂污染物近零排放及先进的碳捕集、利用与封存 (CCUS) 技术是急需攻关的重大技术问题。三是新型煤化工的不断大型化和产业化是煤炭转化领域的发展趋势。开发更为高效的煤基多联产技术、煤气化技术、催化气化和加氢气化技术,在工艺、催化剂和大型装备方面寻求不断突破,逐步解决煤转化过程中耗水高与废水循环再利用等难题。力争全面形成煤炭科学开发模式和清洁高效的煤炭消费模式,燃煤发电基本实现高效低碳清洁发电,实现整体发电效率在 50% 以上,大型燃煤电厂基本实现污染物近零排放,且均配有 CCUS 系统。

### 2. 油气工程科技

世界油气资源勘探开发向海底化、智能化、复合化方向发展。为适应我国油气勘探开发向陆上深层、海域深水、非常规油气、“双高”老油田、复杂油气藏方向发展,重点发展深海油气勘探开发装备和技术、提高采收率技术,提升勘探开发效率,显著降低常规/非常规油气勘探开发成本,科技保障国内石油长期稳产、天然气产量持续上升以及海

外勘探开发的质量与效益。一是勘探开发老区精细挖潜和勘探类型转换(常规向非常规)中面临的工程技术问题攻关;二是深层、深海和非常规油气高效勘探面临的地质理论、高精度成像、超深井和定向井钻探、高端装备等问题攻关;三是老油田、低渗油田、稠油油田等提高采收率技术攻关以及复杂油气田和深水油气田高效开发配套技术;四是不同类型非常规油气田开发储层改造工艺技术、低成本水平井钻井技术、环境友好型开发技术等。瞄准深层、深海、非常规和提高采收率等重大前沿领域,超前研发深水钻完井、天然气水合物勘探开发、纳米机器人等具有重大影响性、带动性或颠覆性的核心技术,力争低渗-特低渗碎屑岩油藏提高采收率技术达到国际领先水平,致密油提高采收率技术成熟并实现规模应用,数字盆地/数字油田技术全面覆盖,深层页岩气、构造应力复杂区煤层气实现规模发展,天然气水合物进入商业试生产阶段,油气勘探开发科技水平整体达到国际先进水平。

### 3. 核能工程科技

世界核能发展更加强调安全和全产业链可持续性,第三代核电技术已经成为新建核电机组的主流技术,第四代核电技术也受到重视,中小型模块化反应堆由于核能利用多样化、可适应分布式能源网络而受到广泛关注,先进核燃料及其循环技术正在快速兴起,对在役核电机组进行运行许可证延续也是核电发展的重要方向 [11]。我国核能工程科技发展以核电为龙头,带动核燃料技术和产业协调发展,突破消除大规模放射性释放的安全目标,在核电技术、核电装备及配套的核燃料科技和产业领域取得突破。一是加强运行和维修安全技术和管理研究,提高在役核电站安全运行水平、延长使用寿命,包括开展运行和维修、运行事故管理、高性能和长寿命燃料、老化及延寿、先进的核电站监测技术和数字化核电站等领域研究;二是推动具有自主知识产权的先进压水堆核电示范工程建设和规模化发展,满足更高的核安全要求;三是统筹规划第四代核电技术和未来核能技术的研究开发;四是研发和推广核能在非电新领域的技术应用,探索核能多用途利用,如热电联产、集中供热、制氢和海水淡化;五是按照我国发展核能的既定战略和方针建设核燃料闭式循环;六是为解决高水平放射性废物的减容需要,实现快堆(加速器驱动次临界洁净核能系统)或嬗

变的示范应用,实现固化及地质处置前的中间处理,即分离-嬗变,开展高水平放射性废物的玻璃固化和深地质处置研究。力争压水堆技术实现耐事故燃料元件研发并应用在在役和新建核电站中,提升固有安全性。第四代核电技术尽快实现示范工程建设,实现核电规模化、多用途、可持续发展的格局。

#### 4. 可再生能源

可再生能源技术研发向大型化、高效、低成本方向发展,可再生能源利用朝着多能互补、冷热电联产与综合利用方向发展,急需提高可再生能源能量转换效率,减轻可再生能源产品生命周期内的环境影响,显著提升可再生能源利用整体技术水平。一是太阳能光伏发电技术继续沿着高效率、低成本方向持续进步。开展高效光伏环保型功能材料研究,加快对高效(>25%)晶硅太阳能电池、化合物薄膜太阳能电池和钙钛矿太阳能电池的基础研究和产业化关键技术研发。提高光伏建筑构件安全性、可靠性和产品多样化,加速高可靠光伏建筑一体化智能微网技术研究。二是太阳能光热技术向高参数、高效率、基本电力负荷方向和长周期储热方向发展,攻关高温承压型空气吸热器和储热等核心技术,建成兆瓦级第三代太阳能热发电示范系统,加速太阳能低温驱动的高效制冷技术研究及大容量储热材料和传热、储热发电关键技术研发,推进低温位热能驱动的太阳能制冷循环、大规模太阳能供暖及太阳能中温热利用等领域的技术攻关和示范应用。三是风力发电向大型化、智能化和高可靠性方向发展,远海和高空风能开发提上日程[5]。开发10 MW级大型增速永磁同步风电机组关键技术、10 MW级双馈增速型风电机组关键技术。针对低风速地区风电开发,研发3 MW级以上低速型风电机组关键技术。加强高空型(6 000~12 000 m)风力发电机组的探索性研究。海上风电场开发成套关键技术研发及示范、风电大数据分析及风电场设计和运营优化等也是前沿研究问题。四是在生物质能领域,高品位生物质能转化技术、生物质能清洁制备与高效利用技术、能源植物基因重组育种、生物油精制原理、生物学系统氢能转换原理等前沿技术需不断探索。开展农林畜牧废弃物能源化工技术的研发,突破生物柴油、燃料醇、热解油、合成油等生物质液体燃料及化学品的高效清洁转化、低成本分离纯化、工程放大等技术难题。藻类也是生物质能源开发的重要

方向。五是水能发展的重点在于水电运行控制问题,包括流域梯级优化调度、水库和大坝运行安全管理和风险防控以及特高压直流水电输送消纳与调峰等基础问题和关键技术研究,开展大水电互联与调控关键成套技术研究。六是地热能领域存在人工破碎和压裂技术、热流体防腐防垢技术两大共性技术难题,需加速增强型地热发电工程技术及低温地热泵热电耦合联供技术的研发。七是不断拓展氢能制氢燃料来源领域与应用范围,从化石能源制氢到可再生能源制氢、从物理储氢到储氢材料储氢、从化工用氢到以氢气为核心的无碳能源的全链条设计和一体化研发,构筑绿色制氢、高效储氢、高效用氢的氢能体系。开展天然气/氢气混合输送技术及混合燃料燃烧器开发。集中攻关燃料电池分布式发电关键技术。八是需解决海洋能技术效率低、可靠性差、造价高及对环境的影响等问题,加快波浪能发电、潮汐能电场、海水淡化平台关键技术研发,促进相关技术走向市场化。

#### 5. 电力工程科技

世界电力工程技术的发展特征是安全可靠、经济高效、智能开放。构建智能电网,适应大规模可再生能源接入技术、融合分布式可再生能源的微电网技术,发展直流电网模式或交直流电网模式是电力工程科技发展的重点。突破大规模可再生能源并网技术瓶颈,大力发展大容量远距离联网技术,通过能源互联网等大规模供需互动技术,将电网转变为能源交互平台。电力系统技术发展的关键在于智能电网,推广应用柔性输电和协调控制技术以提高电网的稳定性与运行效率,积极推进分布式发电、微电网、需求响应等配用电技术集成应用以及综合能源的互联。规模化新型电能存储技术等仍有待重点突破。电力工程科技发展将形成一系列标志性成果,包括大规模可再生能源的全额消纳综合技术、高电压大容量柔性直流输电与互联工程、超远距离±1 100 kV特高压直流输电工程以及支撑智慧城市的智能用电工程等。

### (三) 优先发展的技术方向

根据科技创新能力、技术发展潜力与成熟程度、市场需求等因素,在煤炭、油气、核能、电力和可再生能源5个主要细分领域,面向2035年重点布局化石能源清洁高效开发与利用技术、非常规油气

资源和深海油气资源勘探开发、自主创新的核电技术和核废料处理技术、智能电网和储能新技术以及可再生能源规模化利用技术, 优先发展的主要能源技术方向详见表 1[9]。此外, 还需积极推动支撑能源工程科技发展的基础研究与前沿材料、信息等技术的储备工作。

#### 四、能源工程科技发展的影响与 2035 年图景展望

未来 20 年, 我国城镇化将从量变走向质变, 工业化进程将基本完成, 生产消费模式将发生深刻变革。传统产业升级和基础设施的建设对能源资源的需求依然强劲, 在可再生能源开发利用、核能利

用、天然气开发、碳减排等能源新技术领域, 新增需求巨大。尽管能源需求总量仍将增长, 但随着经济发展的成熟和效率的持续提升, 能源需求增长将逐步与经济增长脱钩。在 2035 年之前, 尽管以传统化石能源为主的能源结构将受到冲击, 化石能源仍将在能源结构中发挥主要作用, 但可再生能源发展势头强劲, 非化石能源和天然气在终端消费、二次能源和一次能源中的占比和作用将不断提高, 能源发展方式将从过去的粗放型开发利用向集约型开发利用转变, 从支撑经济增长向生态环境和气候友好型转变, 不断寻求能源发展的质量与可持续性, 能源产业形态与特征都将产生深刻变革 [12,13], 能源工业将进入以绿色低碳、智能、多元化为主要特征的新时代。

表 1 面向 2035 年能源细分领域工程科技优先发展的技术方向

煤炭	油气	核能	电力	可再生能源
1. 煤矿开采地质条件评价及其探测关键技术	1. 基于大数据的数字盆地与剩余资源预测评价技术	1. 一体化燃料循环的自主大型商用快堆技术	1. 高压大容量柔性直流输电技术	1. 高效光伏环保型功能材料技术
2. 深部和特大型矿井安全开采关键技术	2. 纳米机器人井下油气快速开采技术	2. 耐事故燃料元件技术	2. 规模化新型电能存储技术	2. 大型中高速永磁风电机组关键技术
3. 煤炭洗选与提质关键技术	3. 宽频带、宽方位、高覆盖地球物理勘探技术	3. 核电站消除大规模放射性物质释放安全技术	3. 规模化车网融合互动技术	3. 农林畜牧废弃物能源化工技术
4. 煤炭开采与生态环境保护关键技术	4. 低品位—非常规油气清洁高效压驱一体化技术	4. 非常规铀资源综合开发技术	4. 电力用户与电网深度互动技术	4. 增强型地热发电工程技术
5. 煤炭及其共伴生资源智能化协同开采技术体系	5. 实时测量、评价、导向一体化智能随钻测井技术	5. 高放废物深地质处置关键技术	5. 以智能电网为基础的综合能源系统	5. 多馈入大规模特高压直流水电消纳和调峰关键技术
6. 新一代 IGCC 与 IGFC 发电及多联产技术	6. 钻井实时智能优化钻井系统(自动化钻井)	6. 先进核能系统的核燃料后处理技术	6. 高电压、大功率新型电力电子装置	6. 大规模可再生能源电解水制氢技术
7. 700 °C 先进超超临界燃煤发电技术	7. 无水压裂技术	7. 激光抑制凝聚法同位素分离技术	7. 高温超导电力装备及应用技术	7. 高效率聚光器及聚光场设计技术
8. 先进循环流化床发电技术	8. 天然气水合物大规模安全经济开采关键技术与装备	8. 铀资源多维智能化勘查技术	8. 电网运行态势感知与韧性电网	8. 主动型生物质能源的培育与转化技术
9. 煤炭分质、分级转化利用技术	9. 超深层油气成藏理论与有效开发技术	9. Z-箍缩驱动聚变裂变混合堆技术		9. 大型直驱永磁风电机组关键技术
10. 先进二氧化碳捕集、利用和封存技术	10. 海洋深水钻完井与事故快速处理技术及装备	10. 全智能一体化小型模块式反应堆技术		10. 低风速风电机组关键技术
	11. 无钻机探测技术	11. 核能制氢及氦气透平发电技术		11. 高可靠光伏建筑一体化智能微网技术
	12. 煤层气、页岩气大规模高效勘探开发技术	12. 在役反应堆高放射性条件下设备状态监测、维修及评价技术		

(1) 在能源生产方面, 传统化石能源供应能力和智能化开发水平极大地提升, 伴随绿色煤炭资源评价、能源资源精准开采、透明地球物理与一体化探测、智能矿山、非常规油气开发、深层油气勘探开发、复杂油气藏有效开发、提高采收率等能源资源开发技术的不断突破和大规模应用, 显著拓展能源安全高效开发与多种资源综合协调开发的空間。我国煤炭开采量将达到峰值, 常规石油产量长期保持稳定。非常规油气技术可能取得重大突破, 非常规和深海油气、煤化工替代油品和生物燃料将形成一定替代规模, 极大地影响我国油气供给格局。电力生产总量仍将保持长期增长, 以风能、光伏为代表的可再生能源发电比重迅速扩大, 可再生能源发电和核电规模化发展将导致电源结构发生巨大变化, 非传统化石能源将主导新增能源和电力的生产。2030 年非化石能源在一次能源结构中占 20 % 的目标或将提前实现。

(2) 在能源消费方面, 能源消费总量还将增长, 但消费结构将持续优化, 终端用能和用电结构显著改善, 节能效果明显。煤炭消费总量缓慢下降, 并向发电领域集中。石油消费规模总体稳定, 天然气消费量显著提升。城乡居民用能、用电条件大幅改善。在用电消费领域, 负荷需求响应、智慧楼宇、智能家电、电动汽车等技术的兴起, 使得电力用户与电网之间的互动、满足多元化能源需求将成为可能。智能电网的发展将全面提升能源系统整体效率, 实现能源资源的优化配置, 提高能源输送经济性, 满足用户多元化、灵活互动用电需求, 并最终变革终端能源消费模式。制度节能和管理节能将基本实现。智能制造技术的发展将为工业能源消费提供新的节能空间。智能建筑的发展将提高建筑物能源利用效率, 降低运行能耗, 建筑物被赋予智慧和控制功能, 充当智能电网和分布式能源系统功能实现的有效载体。智慧交通的发展将推动交通运输方式和交通工具耗能结构的变革 [2]。智能制造、智能建筑和智慧交通的发展倒逼供给侧的结构性改革, 用户与电网互动机制的建立, 将为大幅提高终端用电的比例和能效以及提升电网资产的利用效率创建新的路径。

(3) 在产业布局与竞争力方面, 能源产业布局将发生深刻变化, 能源科技水平全面提升, 在诸多能源领域均可具备国际竞争力, 影响国际能源市场

的地缘政治格局。煤炭开发主要集中在晋陕蒙宁地区和北疆地区, 油气增产将转向深海、非常规油气资源集中区域。电网格局将发生重大变化, 形成覆盖特高压输电网和用户微电网的世界上最复杂、规模最大的交直流混联电网。广域能源互联系统建设引领国际输电技术潮流。大规模、长距离输电及输煤等能源输送水平的不断提高, 大规模可再生能源发电的经济消纳和就地分布式接入, 将化解我国能源生产与消费逆向分布格局的难题。风电、太阳能光伏发电成本有望与常规能源发电技术相当, 非化石能源具备与传统化石能源竞争消费市场的能力。主要能源的生产和消费环节的技术能效达到国际先进水平, 形成一批具备国际竞争力的大型综合性能源企业, 电网跨国、跨洲互联持续推进, 大幅提高我国在国际能源市场的话语权, 实现经略全球能源资源, 抢占全球能源领域战略性新兴产业的制高点 [14]。

(4) 在生态环境保护与应对气候变化方面, 化石能源清洁高效利用水平和非化石能源供给能力的不断提高, 将驱动能源清洁化、低碳化发展。煤炭的清洁高效开发利用基本实现, 煤炭开发向实现科学绿色开发的方向转变, 燃煤发电整体效率进一步提高, 供电煤耗进一步降低, 燃煤发电超低排放及 CCUS 等先进技术的全面推广将有望使燃煤发电清洁低碳, 显著降低煤炭全产业链的环境影响。天然气、核能、可再生能源等低碳能源将发挥更加重要的作用, 碳排放峰值将在 2030 年前出现。可再生能源的技术进步将进一步降低其全生命周期内的环境影响。此外, 工业、建筑、交通、照明领域技术效率的全面提升, 通过终端消费节能的“放大效应”, 将持续发挥全局性节能减排作用。

(5) 在能源产业形态方面, 原有各能源系统独立规划、设计和运行的既有模式将被打破, 形成一体化的综合能源系统, 进而重塑中国能源生产与消费体系。2035 年的能源系统将是包括电力、燃气、水务、热力、储能等多种能源组成的智能化综合网络, 它将电力、燃气、供热 / 供冷、供氢等多种能源环节与交通、信息、医疗等社会基础设施有机结合, 通过对系统内部多种能源的产生、传输、分配、转换、存储、终端消费等环节进行有机协调与科学调度, 实现能源产供销一体化、分级分质梯级高效利用。智能电网将承担国家主干能源网络的供应和

调配,泛能网和微电网作为智能电网在社区、园区、城市综合体、城区等区域和终端智能用能的有效补充,实现集中式与分布式的有机结合,进而向能源互联网的高级形态演化 [2]。同时,能源系统将与其生态系统、技术系统和社会经济系统共同发展,能源转型还与金融创新紧密结合,与其他产业互相促进,逐步实现能源资源勘探、提取、转换、储存、分享、应用等要素协同发展。人人可以开发能源、控制能源、享有能源、获益能源,能源生产和消费的绿色低碳与高度智能化将是 2035 年新的能源与经济社会发展图景。

## 五、结语

能源工程科技创新正在支撑能源产业向以低碳能源结构、气候和生态适应型的能源发展方式、智能化能源服务为特征的全球能源转型。我国能源发展将逐步向依靠技术密集型、知识密集型产业驱动的模式转变,能源网、物联网和互联网高度融合,国家主干能源网络、区域能源网络和终端能源网络协同,智能电网、分布式能源发电、微电网等将得到广泛应用,智能制造、智能建筑、智慧交通的发展进一步倒逼能源供给侧结构性改革,各种能源供应与消费方式有机结合、协同发展,将催生出以综合能源系统为特征的能源产业形态,进而重塑中国能源体系。

为发挥工程科技创新的引领作用,确保中长期我国能源工程科技水平与应用能力整体处于国际领先水平,需要采取全面和持久的保障措施。

(1) 在国家层面能源规划中,同等重视化石能源的清洁高效利用和核能、可再生能源的规模化发展,坚持两条技术路线并行发展,进一步加强在多种能源系统集成方面的战略规划,提前布局能源互联网等下一代能源技术研发。将“能源新技术”整体列入国家层面战略性新兴产业规划的支持范畴,设立国家颠覆性能源技术知识创新和产业创新基金。

(2) 整合现有能源科技资源,在煤炭、核能、电力等我国具有领先实力的能源领域牵头组织国际大科学计划和大科学工程;设立综合性能源集成与多种能源互补相关的重大工程和“能源资源一体化透明探测”“智能化绿色能源开发”“能源互联网”等重大工程科技专项;在北京、上海、深圳等地组

建能源国家实验室,集中攻关前沿性、颠覆性能源技术,提前布局与材料、信息、机械等多学科交叉的能源工程科技基础研究;持续支持能源战略咨询和科技政策研究,建设一批能源领域高端智库,鼓励成立实体化、市场化运作的大型综合性能源研究机构,培养造就一批瞄准国际科学前沿的能源科技创新领军人才与创新群体。

(3) 打造若干国际知名的高端能源科技品牌和领军企业,推动核电、煤炭、电力等领域具有国际竞争力的能源产品、技术装备和能源基础设施整体“走出去”,开发境外能源技术市场和综合能源供应与中转基地。加强能源治理和监管政策与科技创新政策的协调配合,进一步推动能源价格改革,恢复能源产品的商品属性,建立和完善能源资源消费税、环境税(包括碳税)等综合措施,建立有利于引导合理消费,推动节能,促进能源结构向清洁、高效、低碳的多元化体系发展的市场信号系统。

## 致谢

感谢苏罡、张国生、李鹏、呼和涛力、曹志国、王洪建、李启明、郭奇峰、梁坤、富晓鹏、樊静丽等课题组成员对本文撰写的大力协助。

## 参考文献

- [1] “世界能源版图变化与能源生产消费革命”课题组. 中国工程院重大咨询项目“推动能源生产和消费革命战略研究”课题研究报告 [R]. 北京: 中国工程院, 2014.  
Research group on world's energy landscape change and energy production and consumption revolution. Strategic research report on promoting energy production and consumption revolution, supported by the major advisory project of Chinese Academy of Engineering [R]. Beijing: Chinese Academy of Engineering, 2014.
- [2] “第三次工业革命与能源生产消费革命”课题组. “推动能源生产和消费革命战略研究”课题研究报告 [R]. 北京: 中国工程院, 2014.  
Research group on the third industrial revolution and energy production and consumption revolution. Strategic research report on promoting energy production and consumption revolution [R]. Beijing: Chinese Academy of Engineering, 2014.
- [3] 中国工程科技发展战略研究院. 中国战略性新兴产业发展报告(2016) [M]. 北京: 科学出版社, 2015.  
Chinese Institute of Engineering Development Strategies. Development report on China's strategic emerging industries (2016) [M]. Beijing: China Science Publishing & Media Ltd (CSPM), 2015.
- [4] 中华人民共和国国务院办公厅. 能源发展战略行动计划(2014—2020年) [R]. 北京: 国务院办公厅, 2014.

- General Office of the State Council of the People's Republic of China. Energy development strategy action plan (2014–2020) [R]. Beijing: General Office of the State Council of the People's Republic of China, 2014.
- [5] 中华人民共和国国家发展和改革委员会, 国家能源局. 能源技术创新行动计划(2016—2030年)[R]. 北京: 国家发展和改革委员会, 国家能源局, 2016.  
National Development and Reform Commission, National Energy Administration of the People's Republic of China. Energy production and consumption revolution strategic action plan (2016–2030) [R]. Beijing: National Development and Reform Commission, National Energy Administration of the People's Republic of China, 2016.
- [6] British Petroleum. Statistical review of world energy 2016 [R/OL]. [2016-10-20]. London: British Petroleum, 2016. <http://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html>.
- [7] 谢克昌, 邱中建, 金庆焕, 等. 我国非常规天然气开发利用战略研究 [M]. 北京: 科学出版社, 2014.  
Xie K C, Qiu Z J, Jin Q H, et al. Strategy research on nonconventional natural gas development and utilization in China [M]. Beijing: China Science Publishing & Media Ltd (CSPM), 2014.
- [8] “‘十三五’新能源产业发展规划研究”课题组. “十三五”战略性新兴产业培育与发展规划课题研究报告 [R]. 北京: 中国工程院, 2015.  
Research group on the 13th Five Year Plan of new energy industry development. Research report on fostering and developing strategic emerging industries in the 13th Five Year Plan period [R]. Beijing: Chinese Academy of Engineering, 2015.
- [9] “能源与矿业领域工程科技2035 发展战略研究”课题组. 中国工程科技2035 发展战略(能源与矿业领域)研究报告 [R]. 北京: 中国工程院, 2016.  
Research group on engineering science and technology development strategy toward 2035 in energy and mining industry field. Research report on China's engineering science and technology development strategy toward 2035 [R]. Beijing: Chinese Academy of Engineering, 2014.
- [10] 谢克昌, 等. 中国煤炭清洁高效可持续开发利用战略研究 [M]. 北京: 科学出版社, 2014.  
Xie K C, et al. Strategy research on clean, high-efficiency and sustainable coal development and utilization in China [M]. Beijing: China Science Publishing & Media Ltd (CSPM), 2014.
- [11] 中国科学技术协会. 2014—2015 核科学技术学科发展报告 [M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2016.  
China Association for Science and Technology. Subject development report on nuclear science and technology (2014–2015) [M]. Beijing: China Science and Technology Press, 2016.
- [12] British Petroleum. BP energy outlook 2016 [R/OL]. (2016-09-12) [2016-11-10]. London: British Petroleum. <http://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/energy-outlook-2035.html>.
- [13] International Energy Agency. World energy outlook 2016 [EB/OL]. (2016-09-17) [2016-11-05]. <http://www.iea.org/newsroom/news/2016/november/world-energy-outlook-2016.html>.
- [14] 黄其励, 彭苏萍. 能源领域培育与发展研究报告 [M]. 北京: 科学出版社, 2015.  
Huang Q L, Peng S P. Research reports on fostering and developing strategic emerging industries in energy field [M]. Beijing: China Science Publishing & Media Ltd (CSPM), 2015.