



能源科技发展前沿及未来方向

杜祥琬

中国工程院, 北京 100088

E-mail: duxw@cae.cn

1 能源革命的大趋势

在讨论能源科技发展方向之前, 我们首先需要展望一下中国和全球能源变革的趋势。中国能源革命的方向可概括为能源消费革命(由粗放低效逐步转向节约高效)和能源生产革命(由黑色高碳逐步转向绿色低碳); 而能源科技革命是它们的支撑, 智能化、电气化、低碳化、高效化是能源技术革命的方向。

1.1 能源安全的新观念

(1) 能源供给安全观念的革新。应由供给侧单向提供保障, 转向由供给侧和需求侧双向协同提供保障的观念, 即转向“以科学供给满足合理需求”, 把抑制不合理需求提升到保障我国能源安全的战略高度, 通过能源需求的合理化, 供应的科学化、洁净化、低碳化, 实现我国可持续的能源安全保障。

(2) 能源的环境安全观。由单纯的“保障供给”理念, 转向“保障供给和保护环境并重”的理念, 把解决能源利用造成的生态环境问题提升到国家安全的战略高度。

(3) 国际竞争环境中的能源安全观。人类文明形态的进步将伴随着能源革命, 国际能源结构的优化、能源效率的提高、能源科技的进步、能源价格的优势等对我国能源的核心竞争力构成挑战也提供机遇。我国长远能源安全观应基于新能源科技和产业的振兴, 占领未来能源新科技的战略制高点, 确立国际视野和长远战略眼光的能源安全观。

中国能源结构变革的三个历史阶段, 化石能源为主(化石能源>90%)阶段(过去); 多元结构(非化石能源>10%)阶段(目前); 非化石能源为主(非化石能源>50%)阶段(几十年后)。可以肯定, 低碳能源将逐步成为中国和全球的“常规能源”。

1.2 全球能源变革的大趋势

(1) 环境的战略地位在提升, 观念在进步。这是“以人为本”的基本诉求; 逐步认识到需要大保护, “环境保护是第一要务”, 而不是“大开发”, 在保护中发展, 在环境容量下发展; 气候变化成为全球性的环境问题, 应对气候变化正在引领全球能源的低碳转型, 是严肃的、责任重大的



杜祥琬 应用物理、强激光技术和能源战略专家, 1964年毕业于苏联莫斯科工程物理学院, 中国工程物理研究院高级科学顾问, 中国工程院院士、原副院长, 俄罗斯国家工程科学院外籍院士。主持了中国工程院的“中国可再生能源发展战略研究”、“中国能源中长期(2030、2050)发展战略研究”、“我国核能发展的再研究”等我国能源

发展战略重大咨询研究项目, 现任国家能源专家咨询委员会副主任, 第三届国家气候变化专家委员会名誉主任。

全球性努力。由此提出: 重塑能源, 绿色化、低碳化、高效化, 逐步走向以非化石能源为主的结构。能源科技创新进入高度活跃期。

(2) 未来社会的形态与能源转型。未来将是更加个性化的以消费者为中心的社会, 需要更多的分布式能源供给, 智能化网络化的管理使能效提升; 基础设施的投资将加大对分布式电器、分布式发电设施以及智能化的投资, 把智能技术与绿色、低碳能源相结合; 人类将拥有更高的资源循环利用能力。

(3) 欧盟、美国、日本都提出了高比例发展非化石能源的战略目标, 许多发展中国家也树立了“把脱贫与可持续相结合”的发展战略。为提高低碳能源的竞争力, 需着力发展相应新材料、新工艺、新概念、新技术, 特别是与信息技术与数字技术的深度融合, 占领未来能源科技的战略制高点。

如欧盟的目标是: 2020年比1990年: 能效提高20%, 可再生能源占比提高20%, 一次能源消耗降20%; 2050年比1990年: GHG排放减80%~95%, 可再生能源占终端能源达75%。

2 能源科技发展的若干前沿领域

2.1 储能技术可能具有颠覆性

高能量密度储能技术可能是一个颠覆性的技术领域,

它将与间歇性可再生能源配合,使其高效规模化发展;它将使电动汽车轻量、小型;并将使智能电力系统节能提效,也可用于智能小区的管理……所以,储能技术是各国着力创新的领域。

(1) 化学储能。以色列研制的空气锂电池,比锂-镁电池的储电量提高 8 倍,而西班牙的石墨烯电池的储电量又比空气锂电池高出 5 倍;操控和设计纳米材料的能力推动了储能的创新,美国斯坦福大学研究的覆盖有石墨烯的镍纳米粒子锂离子电池,被称为“不会起火的纳米粒子电池”;液体电池、铅炭电池、纳米储能、智能储能(由电池组和功率检测器及电脑组成)、纤维状超级电容器等呈百花竞开之势,无线的电磁充电技术也在发展中。

(2) 物理储能。除抽水蓄能外,压缩空气储能、飞轮储能、相变储能、制氢储能等也有新进展。

材料科学与能源技术创新不断涌现,佛罗里达州立大学开发了一种单层水钠锰(birnessite)材料,可在阳光照射下把雨水变成能源。可穿戴摩擦纳米发电机,已成为一个研究热点。斯坦福大学设计了一种微生物电池,在分解污水中的动植物废物时,可提取约 30% 的能量(产电菌),可部分弥补污水处理的电耗。染料涂层塑料既轻又薄,可使砷化镓太阳能电池能效加倍。强磁热效应的新材料会引起制冷技术革命,等等。

2.2 可再生能源是未来低碳能源的主力

(1) 水电。属于较成熟的技术,目前是可再生能源的主力,且仍有开发前景,并可做到水电与生态保护的双赢。

(2) 太阳能电池。硅基的柔性薄膜太阳能电池、CIGS 薄膜太阳能电池、非硅(聚合物的)超轻超薄的柔性太阳能电池以高的功率/重量比为特征;硅与半导体联姻的太阳能电池转换效率可达 40%~50%;全天候太阳能电池等也竞相发展,以材料和工艺的创新为基础。

在应用形式上,可做成适合与建筑物结合的 Power Wall,屋顶太阳能等,进而建成能够生产能源的智能楼宇。若 4000 万个屋顶装太阳能,容量可达 400 GW^[1]。

太阳能热发电有多种形式,关键在于提高光热转化效率,降低热损失。此外太阳能直接热利用也有新的发展空间。

(3) 风能技术。有多方面的创新势头,风机形状和排布的新形式;风机组成控制系统;变速恒频风力发电系统,使用智能逆变器让光伏和风电实现无缝并网(德国);高空风的利用与低速风的利用;风机叶片的复合材料与新工艺,包括轻型、柔性叶片和气动控制装置、传动系统的创新、新型传感器和智能控制系统;海上风电机组抗台风和腐蚀技术;间歇性的风能(及太阳能)峰值的利用技术:如电解水制氢、海水淡化等,以减少弃风、弃光。

(4) 生物质能的多种应用技术。生物纤维素乙醇(如

秸秆乙醇)需进一步提高生物酶的活性、降低成本;生物沼气,已可推广应用;秸秆破碎压缩固体成型,可用于供热等;生物质及垃圾的热解法生产油、气,垃圾发电技术等在农村能源形态变革中可发挥重要作用。

(5) 海洋能。能量量大、种类繁多。海洋可再生能源包括波浪能、潮汐能、盐差能、温差能等,开发利用处于起步阶段。

(6) 地热能的开发利用。包括发电、供热、制冷,是可再生能源技术方向之一,涉及到一系列的技术提升。地球内部的“干热岩”是一种致密热岩体,热能资源极丰。为了开发利用,首先需发展深部精准物探、高温钻探、地热资源评价等。热泵技术则是把不能直接利用的低位能(如空气、土壤、水中含有的热能、废热等),利用电或燃气(燃油)驱动,转换为可利用的高位热能(蒸汽或热水),实现供热或制冷,达到节约高品位能的目的。热泵技术可再生利用、运行费用低。据测算,每推广 1000 万平米的地源热泵可节约 56 万吨标煤,比传统的燃煤锅炉节能 30% 以上,并减少相应大气污染。

2.3 先进安全的核能技术

核能是一个科技含量高的领域。目前在全球实际应用的核裂变发电方面,需要关注:核废物的减量技术、嬗变技术及最终安全、环境友好的处置技术;更先进的堆型(含第四代堆、小型模块式堆)的研究;非常规铀资源勘探开发技术,从海(湖)水中提取铀的技术等。

为了实现受控核聚变,国际上正在合作进行磁约束核聚变(ITER 实验堆),几个大国在研究不同概念的惯性约束聚变(如激光核聚变、Z-Pinch 聚变)以及聚变—裂变混合堆等,特别要鼓励核聚变新概念的研究。

2.4 创新的智能化电力系统

电力系统向新能源的适应性变革,是能源体系低碳转型的核心。

发展的方向是智能化、低碳化。一个重要的趋势是发展移动(或固定)分布式的低碳能源网络,如建筑、人、车、包等既是能源的消费者,又可成为能源的生产者,与集中式的智能能源网(集成电、热、冷、水、气象网)结合并互动,以大数据等信息技术管理,实现横向的多能互补与纵向的“源-网-荷-储-用”优化结合,提供多样化的电能服务并提高能源利用的综合效率,其中应用的多种信息技术如下。

智能感知技术,如智能传感器获取输配电网、交通网、通信网、天然气网的运行状态数据,以及用户侧的用能设备、微电网及分布式电源的运行状态参数,用于分析和改进控制策略;大数据技术,能源系统中的管网监控、运行、能源交易和用户用能及各类分布式电源负荷数据量极大,

大数据分析的应用可大大提高系统的效率;而云计算技术则可以实现随时、随地的高性能计算,便捷地获取计算资源并提高其应用价值;微网技术是一个社区、单位或村镇可独立运行的能源网络,它将分布式发电、售电、输电、用电相融合,进行协调规划、控制与管理,同时它又可与公共智能电网连接、互动,构成新型的能源网络.配置带有数字传感器和精密控制器的微电网组件,能实现监控和优化运行,提高供电质量.

电力系统的可靠性理论、风险评估和概率规划方法的研究具有重要意义.同时,正在探索创新的电网配置,以期通过故障隔离、分布式发电以及设置孤岛操作,限制连续故障,以缓解天气引起的跨网停运^[6].柔性直流输电作为一种新型输电技术,也值得予以重视.

2.5 煤炭的清洁高效利用及 CCUS 创新

首先要重视煤炭的安全、高效、环保的开采技术,如建设数字化、自动化的现代矿井.在煤炭的利用方面,目前我国大约是一半发电、一半直接燃烧利用,其中的散烧煤是最为低效和污染的.散烧煤不容易清洁、高效,更无法低碳,只有替代(电替代、气替代、余热替代、生物质能替代等).

煤炭应主要用于发电.煤电的若干清洁、高效利用技术已成熟,可使几项污染物排放达标,常称作“超低排放”.高效的燃煤电厂的发电煤耗已降至 276 g/kWh(如上海外高桥三厂).整体煤气化联合循环发电(IGCC)也是一个方向.但煤电的 CO₂ 排放仍高,煤炭的低碳利用有待解决.目前的 CCUS 思路已在初步试用,离规模商用尚远.如将煤炭燃烧产生的 CO₂ 通过化工过程,直接封存在产品中;CO₂ 合成可降解塑料;CO₂ 矿化的放热反应能转换成电能;将 CO₂ 注入油井提高石油采收率;CO₂ 生物转化利用技术等;将 CO₂ 注入地下玄武岩形成碳酸盐矿物质从而封存于地下,正处在研究试验阶段.

热电联产不增加煤耗和 CO₂ 排放,有利于提高能效和大气污染防治,这方面的技术创造潜力大,值得努力.也需重视煤矸石、煤泥、洗中煤等低热值煤炭资源综合利用发电技术.

煤炭的另一个利用方向是作为原料(而非燃料),如煤制合成气(CO+H₂)生成多种化工产品;以甲醇为中心的煤化工,煤制乙炔化工等.

2.6 非常规和深海油气资源开发和利用技术

石油炼化需转型升级,提升成品油质量;提高油气的储备和调峰能力;发展石油的四种替代技术:电替代、生物油气替代、氢替代、太阳能替代.

非常规和深海是油气资源开发和利用的两个方向,涉及到多种技术:油气勘探的多维地震技术、可控源电磁测

量技术;油气开发的全自动钻井操作技术;页岩油气的地质理论及勘探技术;页岩气开采的水力压裂技术;煤层气开发和动态评价技术;天然气热、电、冷三联供技术;深海油、气(包括非常规油气)的资源勘探技术,例如可燃冰(天然气水合物)的探测和安全开采技术.在天然气的利用方面,高效燃气轮机的技术创新受到重视.

2.7 智能化节能提效技术

智能交通是在充分利用现有交通设施的基础上,以交通信息的收集、处理、发布、交换、分析和利用为主线,为交通的参与者提供多样性的选择和服务,实现全自动驾驶,从而实现高效、通畅、安全、节能、环保的运行目标.芬兰已将发展智能交通及相关产业作为一个新的增长点,并将地面智能交通工具的进步分为六个阶段稳步实施,智在必得^[3].智能化的汽车设计,加之碳纤维合成物等超轻、超强新材料的利用,可大幅度节能;出行方式的智能化,如汽车共享、拼车,可显著降低用车需求;智慧型的紧凑型市设计,可减少出行和堵车,节约交通用能.

建筑物的直接数字控制、变风量空调控制、智能照明及加装热辐射屏蔽,可降低室内取暖和热水用能.德国的一栋智能节能三层办公楼,能耗仅 21 kWh/m²·a,其屋顶的光伏板能发出五倍于需求的电量^[4].

辐射冷却新材料可用于建筑隔热:美国斯坦福大学研制了由二氧化铪和二氧化硅及一层锂、钛和硅构成的基层组成的材料,可反射 97% 的太阳光,且反射的波长(8~13 nm)可透过大气散至外空.

对工业制造流程进行优化.推进制造过程的信息处理、质量控制、生产控制、资源管理、环保处理等环节的流程化再造,推广先进工艺,发展一体化整合设计,发展 3D 打印,加之余热、余能的回收利用,可产生显著的工业节能效果.高耗能的泵和风机的制造,可通过改进设计,使摩擦力降低 80%~90%,显著降低成本^[4].正在发展新型的能量收集技术,可从射频信号、废热、太阳能、振动等收集能量,例如:压电元件,可把鞋内压力变化转化为穿戴设备可用的电力^[6].

新型城镇化,要对交通、建筑、工厂、园区、村镇进行系统整合设计,因地制宜,利用可再生能源、天然气、余热等低碳能源的网络满足能源增量的需求.物流业的智能化节能潜力大,一个有定位服务功能的货运及物流手机软件,可使当前高达 40% 的货车空驶率减半,每年可减排 CO₂ 100 万吨^[4].

3 结语

能源科技正在蓬勃发展,新的概念、新的技术、新的用能方式将重塑能源.本文只是作者挂一漏万的了解和归纳.能源是一个多学科交叉的应用领域,其创新发展与材

料科学、生物技术、信息技术的发展关系密切,故需加强基础研究。同时,新能源科技的突破也有难度和不确定性。重要的是认准战略方向,坚持努力并发展国际合作。中国

能源的安全和可持续与全球能源的安全、可持续,本质上是一致的。创造一个绿色、低碳、高效、安全的新型能源体系,将为国家和人类的永续发展作出贡献。

推荐阅读文献

- 1 Yuan H Y. The energy independence drive of United States(in Chinese). Energy Rev, 2016, (2): 38–39 [袁海洋. 美国: 能源独立之动力. 能源评论, 2016, (2): 38–39]
- 2 National Energy Agency. Innovative Action program of Energy Technology Revolution (2016–2030) (in Chinese). 2016 [国家能源局. 能源技术革命创新行动计划(2016~2030 年), 2016]
- 3 Bian C G. Smart Transportation(in Chinese). Guangming Daily. 2016-4-3 [卞晨光. 阡陌交通智在必得. 光明日报, 2016-4-3]
- 4 Lu A W. The good time of energy clean transition (in Chinese). Energy Rev, 2016, (3): 1 [卢安武. 向清洁转型的好时机来了. 能源评论, 2016, (3): 1]
- 5 Jeremy R. The Third Industrial Revolution (in Chinese). Beijing: Citic Press, 2012 [杰里米·里夫金. 第三次工业革命. 北京: 中信出版社, 2012]
- 6 DNV GL Group. Technology Outlook for 2025. 2016 [DNV GL. 2025 年技术展望. 2016]

Summary for “能源科技发展前沿及未来方向”

Frontiers and future directions of energy science and technology

DU XiangWan

Chinese Academy of Engineering, Beijing 100088, China
E-mail: duxw@cae.cn

The future energy revolution both in China and around the world is analyzed from different perspectives, including the direction of China's energy revolution, the new concepts of energy safety, the three stages of energy structure reform, and the general trend of global energy. To enhance the competitiveness of low-carbon energy, new materials and techniques are suggested to be developed correspondingly; meanwhile, information and digital techniques be deeply combined. Next, several dominant frontiers are reviewed in the development of energy technology: energy storage might experience a revolutionary change; renewable energies (e.g. hydropower, solar energy, wind power, biomass, geothermal and ocean energy) will become the mainstream of low-carbon energy; advanced and safe nuclear energy may serve as a sustainable non-fossil energy. Other technological advances are also introduced, such as the innovative and smart electrical power system, the clean and highly efficient use of coal as well as CCUS innovation, the exploitation and utilization of non-conventional deep-sea oil and natural gas, and the intelligent technology of energy saving and efficiency improvement. Finally, basic research, disciplinary crossing and international cooperation are stressed for their important role in the future energy revolution.

energy, frontier, direction

doi: 10.1360/N972017-00145