

国际能源科技发展新动向及其 对我国的启示*

郭楷模¹ 陈伟^{**1} 吴勘¹ 何涛¹ 汪其² 李富岭²

(1. 中国科学院武汉文献情报中心, 武汉 430071; 2. 中国科学院大连化学物理研究所, 大连 116000)

摘要: 面对国内外能源形势变化, 世界主要国家和地区纷纷实施并适时调整作为顶层指导的中长期能源科技战略, 以抢占能源发展制高点。伴随我国经济进入新常态, 能源发展已进入了消费增长减速换挡、结构优化步伐加快、发展动能转换升级的战略转型关键期, 能源生产与消费革命正在不断深化, 亟需辨识适合我国国情的重大能源技术变革方向。为此, 本文对世界主要国家近年来的能源科技政策新动向、科技前沿进展进行系统梳理, 分析其科技政策体系框架及未来能源科技发展趋势, 提出我国能源科技发展的若干建议。

关键词: 能源科技; 能源政策; 发展新动向; 主要国家

中图分类号: G350 文献标识码: A doi: 10.16507/j.issn.1006-6055.2018.05.005

New Tendency of International Energy Science and Technology and Its Implication to China*

GUO Kaimo¹ CHEN Wei^{**1} WU Kan¹ HE Tao¹ WANG Qi² LI Fuling²

(1. Wuhan Library, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China;

2. Dalian Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences, Dalian 116000, China)

Abstract: With the development and changes of energy at home and abroad, strategic plans of energy science and technology in major countries and regions of the world are implemented and timely revised. With China's economy entering a "New Normal" stage, energy consumption growth is slowing down, and the process of energy structure optimization is accelerated. The energy production and consumption revolution is continuously deepening, and thus it is urgent to identify the direction of major energy technology development that suits China's national conditions. The advance in energy science research, and the development trend of energy technology policy in main countries are analyzed and discussed, and several suggestions for energy policy and technology in our country are put forward.

Key words: energy technology; energy policy; development trend; main countries

1 引言

能源是人类赖以生存和发展的基础, 其价值在当今经济高速发展的全球化时代更加明显: 经

济可持续发展、国家能源安全和国际社会的稳定都与能源休戚相关。当前, 全球能源领域正在经历战略和结构变革期, 呈现出能源体系绿色低碳演变、能源供需格局深刻调整、能源价格持续低位

2018-04-04 收稿, 2018-05-28 接受, 2018-06-12 网络发表

* 中国科学院文献情报能力建设专项(Y7KZ131001), 中国科学院文献情报中心青年人才领域前沿项目(Y6ZG83)资助

** 通讯作者, E-mail: chenw@mail. whlib. ac. cn; Tel: 027-87199180

震荡、能源地缘政治环境趋于复杂、气候履约刚性约束增强、新一轮能源技术革命兴起等趋势。变革传统能源开发利用方式、推动新能源技术应用、构建新型绿色能源体系成为世界能源发展的方向。

科技决定能源的未来,科技创造未来的能源。能源技术创新在能源革命中起决定性作用,是推动能源革命的根本手段。随着云计算、大数据、物联网等新兴技术的发展,能源生产、运输、存储、消费等环节正逐步发生变革。从传统集中式到分布式能源,从智能电网到能源互联网,从石化智能工厂到煤炭大数据平台,从用户侧智慧用能到汽车充电设施互联互通,一些重大或颠覆性技术创新在不断创造新产业和新业态,改变着能源的传统格局。

能源科技战略的制订涉及政治、经济、社会、外交等领域。能源科技战略的实施,尤其是对国际能源市场具有重大影响的大国和地区能源科技战略的实施,更是关乎世界能源格局的变化、全球能源产业的发展,甚至国际政治经济局势的调整。我国能源发展已进入消费增长减速换挡、结构优化步伐加快、发展动能转换升级的战略转型关键期,能源生产与消费革命正在不断深化,亟需研究适合我国国情的重大能源技术变革方向。因此,本文对世界主要国家近年来的能源科技政策发展新动向、能源科技前沿的重要进展和新趋势进行系统梳理,以期为我国准确把握世界能源技术变革和演进方向,并在能源科技领域的优先谋划和布局提供参考依据。

2 世界主要国家能源发展战略新动向

世界主要国家均把清洁能源技术视为新一轮科技革命和产业变革的突破口,近年来基于国际

国内形势变化、自身能源结构特点,积极实施并适时调整了作为顶层指导的中长期能源科技战略,以重大计划项目为牵引调动社会资源持续投入,并不断优化、改革能源科技创新体系以增强国家竞争力和保持领先地位,尤其重视具有潜在颠覆影响的战略性能源技术开发,从而降低能源创新全价值链成本。以下就主要国家近年的能源科技政策发展动向进行简要回顾。

2.1 美国

自20世纪70年代两次石油危机以来,“能源独立”作为一种能源政策理念,备受美国政府推崇。尽管历届政府谋求能源独立的思路和具体手段有所不同,但本质目标是一致的,即减少以至完全摆脱对国外进口油气资源的依赖,完全实现能源的自主供应。

为了复苏美国经济、应对能源安全和气候变化,实现能源战略转型,推进美国能源独立进程,奥巴马政府自2009年上台后,便高举“能源独立”旗帜,出台一系列新能源政策和战略计划,掀起了一场自美国成立以来最大规模的能源革命。在推动美国能源革命进程当中,奥巴马政府从战略到战术层面有四大重点举措:首先,发布《未来能源安全蓝图》^[1],明确美国未来20年的能源发展目标,强调通过安全有序地扩大国内油气资源生产、充分发挥清洁能源潜力和大力推动科技创新等工作来保障美国能源安全;其次,推行《全面能源战略》^[2],变革美国能源体系,中心目标是开发和部署低碳技术,为清洁能源未来发展奠定基础,并在经济和国家安全方面带来显著效益;第三,出台清洁电力计划^[3],全面推动燃煤电厂减排,扩大可再生能源发展,进一步促进美国电力乃至能源结构优化调整;第四,推动能源科技体制改革,降低能源创新全价值链成本。此次革命

提出基础科学与应用能源研发融合的战略指导思想,设立了三个能源研发平台和机构(先进能源研究计划署、能源前沿研究中心和能源创新中心),有效整合产学研各方资源,支持变革性能源技术开发,确保美国抢占新能源技术战略制高点。得益于奥巴马时期推出的各项能源战略,美国能源结构发生了显著变化,已成功由传统的能源进口大国转变为能源出口国。

2017年3月,以总统特朗普为首的新一届美国政府推出了《美国优先能源计划》^[4]。该计划延续了美国追求能源独立的基本思想,致力于降低能源成本,最大化利用国内能源资源,尤其是传统的化石燃料。随后,特朗普又签署了一份名为“推动能源独立和经济增长”的总统行政令^[5],以废除奥巴马时期的多项能源和气候变化政策法规,解除对美国能源开发与生产的各种非必要监管,复兴美国能源产业(尤其是煤炭产业),创造就业岗位,促进美国能源独立,振兴美国经济。2017年6月下旬,美国“能源周”期间,特朗普提出“能源主导”战略新思路,即将能源作为一种重要战略资源,扩大能源出口,在实现能源独立的同时谋求世界能源霸主的发展之路。

2.2 欧盟

欧盟视应对能源与气候变化安全问题为其减小能源对外依存度、加强欧盟能源自强独立、增加就业、促进欧洲经济繁荣的重大机遇,因此将可持续性、前瞻性的能源环保政策纳入到重要的政治议程当中,出台数个能源气候政策以促进能源技术的开发,推动欧盟支柱产业的绿色转型,力图成为全球低碳经济的领导者。

自2010年以来,为了应对气候变化和实现碳减排目标,促进能源安全和结构多元化,欧盟相继提出2020^[6]、2030^[7]和2050^[8]年的能源气候政策

框架,设定欧盟能源系统中长期发展目标,确立了构建“有竞争力、可持续和安全”能源系统的总目标,明确低碳转型方向,提出了优先进行的四大事项,包括:建立一个高能效、一体化欧盟能源市场;实现最高级别的能源安全保障;加强和拓展欧盟在先进节能和可再生能源技术创新方面的世界领导作用;强化欧盟外部能源市场。2014年新一届欧盟委员会上台后全面实施能源联盟战略,旨在全面提升欧洲能源体系抵御能源、气候及经济安全风险的能力。作为落实能源联盟战略的关键举措之一,欧盟委员会于2015年9月公布升级版战略能源技术计划(SET-Plan)^[9],将研究与创新置于低碳能源系统转型的中心地位。升级版SET-Plan改变以往单纯从技术维度来规划发展的方式,而是将能源系统视为一个整体来聚焦转型面临的若干关键挑战与目标,以应用为导向打造能源科技创新全价值链,围绕可再生能源、智能能源系统、能效和可持续交通四个核心优先领域以及碳捕集与封存和核能两个适用于部分成员国的特定领域,开展十大研究与创新优先行动,包括:开发高性能可再生能源技术及系统集成,降低可再生能源关键技术成本,开发智能房屋技术与服务,提高能源系统灵活性、安全性和智能化,开发和用低能耗建筑新材料与技术,降低工业能耗强度,推动交通电气化,促进替代燃料的应用,加强碳捕集、利用与封存技术应用,提高核能系统的安全性和利用效率。

2.3 德国

面对严峻的能源形势,自20世纪两次能源危机以来,德国政府就一直致力为本国的社会发展探寻和构建安全可持续、经济清洁的能源供给系统。为此,德国在世界上率先实施以可再生能源为主导的能源结构转型战略。早在2010年,

德国政府就发布了以发展可再生能源为核心的《能源战略 2050》^[10]报告,描绘了德国中长期能源发展路线图,提出了到 2050 年实现能源结构转型的发展目标。而 2011 年日本福岛核事故加速和坚定了德国政府能源转型步伐,促使德国政府率先提出了全面弃核的能源转型战略^[11],确立了可再生能源和能效两大战略支柱,描绘了新能源发展和减排的中长期目标,即到 2050 年可再生能源电力占比达到 80%。在科技层面为支持能源转型战略,2011 年实施的第六次能源研究计划^[12]将可再生能源、能效、储能、电网技术作为战略优先推进领域。而为了从系统层面推动转型解决方案,2015 年 9 月,德国联邦教研部投资 4 亿欧元启动了“哥白尼计划”^[13],这是截至目前德国为促进能源转型开展的最大科研资助行动,着重关注四大重点方向^[14]:新型电网的开发、可再生能源过剩电力储存、适应波动性电力供应的工业生产流程和加强能源系统的系统集成。

德国政府不仅重视可再生能源技术研发创新工作,还非常重视给予可再生能源发展坚实的法律制度保障,为此于 2000 年通过了著名的《可再生能源法》(EEG-2000)。随着德国可再生能源发展的情况变化,其对《可再生能源法》不断进行修订和完善。最新出台的《可再生能源法》2017 版(EEG-2017)^[15]对先前法案内容进行了全面修订,主要包括:控制可再生能源年度装机容量增长目标,补贴重点侧重于更加经济有效的可再生能源类型(如陆上风电和光伏),实施上网电价递减率与年度新增装机容量挂钩的灵活限额机制,调整上网电价递减周期等等,采用招投标模式来确定可再生电力的补贴额度。这表明德国可再生能源的发展从过去的全面促进和吸引投资阶段转变到重点扶持、引导投资和成本控制新阶段。

2.4 日本

作为岛国,日本国内能源资源较为匮乏,其能源消费高度依赖进口。能源短缺问题成为制约日本经济发展的重要因素,二战后日本政府就一直将降低对能源进口依赖、改善能源自给率作为其能源战略的重点。为此,日本政府实施了以“3E+S”(能源安全(Energy Security)、经济增长(Economic Growth)、环境保护(Environment)和安全性(Safety))为目标的能源结构多元化战略,强调节能减排、降低对进口能源的依赖和发展新能源。2010 年 6 月,日本经济产业省发布以“保护环境和经济增长”为主题的《能源战略计划》,强调大力发展核能,构建以核电为主的低碳电源。随着世界经济发展和能源格局的变动,日本对本国的能源战略不断作出调整。在经过福岛核事故之后,日本在能源科技发展重点上有较大调整,于 2014 年修订了《能源战略计划》^[16],指出未来发展方向是压缩核电发展,举政府之力加快发展可再生能源,以期创造新的产业。2016 年 4 月,日本相继公布了能源中期和长期战略方案:一份是经济产业省发布、面向 2030 年产业改革的《能源革新战略》^[17],从政策改革和技术开发两方面推行新举措,确定了节能挖潜、扩大可再生能源和构建新型能源供给系统这三大改革主题,以实现能源结构优化升级,构建可再生能源与节能融合型新能源产业;另一份是日本政府综合科技创新会议发布、面向 2050 年技术前沿的《能源环境技术创新战略》^[18],主旨是强化政府引导下的研发体制,通过创新引领世界,保证日本开发的颠覆性能源技术广泛普及,实现到 2050 年全球温室气体排放减半和构建新型能源系统的目标。技术创新战略确定了日本将要重点推进的五大技术创新领域,包括:利用大数据分析、人工智能、先进传感和

物联网技术构建智能能源集成管理系统,通过创新制造工艺和先进材料开发实现深度节能,新一代蓄电池和氢能制备、储存与应用,新一代光伏发电和地热发电技术,以及二氧化碳固定与有效利用。2017年12月,日本发布《氢能基本战略》^[19],规划新能源汽车和氢能发展目标,加速推进氢能社会构建,实现能源供给多元化以提高能源自给率。

2.5 其他经济体

在能源危机和全球气候变化成为国际主流议题的大背景下,推进绿色低碳技术创新、发展以可再生能源为主的现代能源体系已经成为国际社会的共识。除了上述主要国家/地区,世界其他国家也纷纷基于自身能源资源禀赋特点制定了相应的低碳能源科技战略。

英国是最早提出“低碳经济”的国家,也是第一个实施“碳预算”的国家。早在2011年,英国政府就公布了《英国可再生能源路线图》^[20],阐述了加快英国可再生能源部署和利用的全面行动计划,确定了到2020年可再生能源满足英国15%能源需求的发展目标。2017年10月,英国商业、能源和工业战略部(BEIS)发布《低碳发展战略》报告^[21],阐述了英国如何在削减碳排放以应对气候变化的同时推动经济持续增长,为英国低碳经济发展描绘蓝图。加拿大是北美主要海洋国家,拥有世界上最长的海岸线,蕴含丰富的海洋资源。2011年,加拿大发布了《加拿大海洋可再生能源技术路线图》^[22],提出海洋能源发展的中长期阶段目标,以及实现目标的具体技术途径和促进条件,以保持加拿大在海洋能源领域的领先地位,为加拿大创造全新的经济增长点。2015年,法国议会正式通过绿色增长能源转型法案^[23],提出到2030年温室气体排放将比1990年降低40%,到

2050年降低75%(同时能源消费减半),降低化石燃料占比,控制核电装机上限为63.2 GW,可再生能源在能源结构中占比达到32%。这一法案被视为谋划法国能源战略转型的重大举措,旨在让该国更有效地应对气候变化,加强能源独立性,更好地平衡不同的能源供应来源。

2.6 对比分析

综合分析上述各个国家的能源战略可知,尽管各国的发展理念、资源禀赋和制度背景不同,但各国/地区均不约而同地将能源技术创新放在了能源战略的核心位置。就具体技术而言,各国都非常重视高效技术、能源系统集成技术的开发,现代化电网的构建以及新型智能化能源系统构筑,以达到降能耗、减排放,实现经济和环境效益协调统一。

3 能源科技前沿重要研究进展

3.1 能源发展迈入数字化时代

随着大数据和机器学习算法的普及,能源科技创新研究工作也逐渐广泛引入以人工智能和数据挖掘为基础的新兴研究手段,以提升研究效率。2016年12月,斯坦福大学Evan J. Reed教授课题组^[24]基于人工智能技术,利用锂离子电池文献报道的所有实验数据构建了具备深度学习能力的计算机预测模型,并建立了锂离子导电性、结构稳定性、成本和材料来源几个筛选标准,从材料数据库中的12831种含锂固态化合物中筛选出20余种有潜力的固态电解质材料,全程仅耗时数分钟,筛选效率是传统随机测试的百万倍,大幅提高了研究效率。麻省理工学院的Yang shao-horn教授课题组^[25]利用配位化学晶体场理论以及固体能带理论,对钙钛矿型氧化物催化剂电子结构与催化活性的关系进行深刻阐述,并结合机器学习、晶体

截断杆等技术展望了未来的催化剂发展趋势。人工智能、大数据、物联网等新兴数字技术能够为能源行业重大挑战提供全新的数字化解决方案,推动全球能源系统的紧密互联、智能、高效、可靠和可持续^[26]。预计到2025年,全球能源领域数字化市场规模将增长到640亿美元,新的能源创新将集中在数字技术和数据的战略使用上^[27]。

3.2 3D打印技术助力先进燃烧系统研发

3D打印(亦称为增材制造)技术具有制造周期短、材料利用率高等特点,能够实现复杂结构一体化成型,是复杂构件制造的新兴技术。欧美巨头积极布局3D打印技术,促进燃气轮机设计创新,提高效率,降低能耗和排放,缩减生产周期和成本。2017年2月,西门子公司利用3D打印技术生产的燃气轮机叶片首次在满负荷的条件下完成性能测试,获得了突破性成果,转速可高达13000转/分钟,工作温度超过1250℃(叶片被安装在发电功率为13MW的西门子SGT-400工业燃气轮机上获得的实测结果)。3D打印技术使得改进叶片内部冷却几何形状的新设计成为可能,可燃气轮机的整体效率^[28]。同年12月,美国通用电气(GE)公司宣布旗下的HA级重型燃气轮机9HA.02联合循环发电效率突破64%,且输出功率高达826MW,刷新了9HA.01重型燃气轮机2016年创造的世界纪录(63%,605 MW),这归功于3D打印技术应用于多个燃气轮机关键部件的制造^[29]。

3.3 核聚变研究取得重大突破

核聚变能源产生过程不污染环境、不产生放射性核废料、安全性高、清洁且资源无限,被视为人类可持续发展的最理想的新能源。而想要将核聚变的能量真正利用起来,就必须对核聚变的速度和规模进行控制,实现能量持续、输出平稳。为

此,科学家正努力研究如何实现可控核聚变。美欧中核聚变实验装置持续创造纪录,稳步推进受控核聚变的实现。2016年3月,德国马普学会等离子体物理研究所建造的世界最大仿星器聚变装置W7-X成功产出首个氢等离子体,正式启动科学实验;10月,麻省理工学院Alcator C-Mod核聚变反应堆装置在最后一次实验中,等离子体压强首次突破2个大气压达到2.05个大气压,对应的温度达到3500万摄氏度^[30];2017年7月,中国科学院等离子体物理研究所全超导托卡马克EAST实现了101.2秒稳态长脉冲高约束等离子体运行,创造了新的世界纪录,EAST成为了世界上第一个实现稳态高约束模式运行持续时间达到百秒量级的托卡马克核聚变实验装置^[31]。

3.4 储能技术在反应机理探索、电化学体系新设计、新材料开发方面成果斐然

深刻理解电化学电池充放电循环过程的反应机理和动力学过程是制备高性能电池的关键理论基础。2016年5月,斯坦福大学William C. Chueh教授课题组^[32]牵头的联合研究团队设计了一种全新的“同步液态扫描透射X射线显微成像(STXM)”技术,借助该技术研究人员首次在介观尺度实现对锂离子电池充放电过程中单个纳米颗粒活动行为的原位实时观测和成像;2017年2月,劳伦斯伯克利国家实验室利用集成X射线谱的全场透射显微成像技术(FF-TXM-XANES)首次在纳米尺度上实现了对锂离子电池充放电循环过程中锂锰镍氧(LiMn_{1.5}Ni_{0.5}O₄, LMNO)正极材料相变过程的详细观测研究,揭露了脱锂过程中LMNO电极相转变机制^[33];5月,瑞士保罗谢尔研究所研究团队利用X射线技术首次实现对锂硫电池放电中间产物的直接观测,对锂硫电池反应机理有了进一步的深入认识,为设计和开发高性

能锂硫电池提供了重要的科学理论参考^[34]。

锂离子电池较小的能量密度以及电解质易燃易爆问题限制了其应用范围,因此研发低成本、高能量密度、长寿命、安全可靠的新型非锂离子二次电池技术成为了前沿研究热点。加州大学河滨分校开发全球首个水合氢离子电池(以 H_3O^+ 为正电荷载流子,传统的电池技术主要采用碱金属离子或者铝离子作为正电荷载流子),具备较高的电荷储存容量和良好的可逆性,有望开辟全新的电池技术,为电网规模储能带来新的解决方案^[35];麻省理工学院报道了一种全新的无泵“沙漏式”液流电池(也称为重力驱动型液流电池, GIFcell),其能量转化效率超过91%,能量密度高达约1000毫安时/克,放电电压约为2.05伏。相比传统液流电池,该电池无需外加泵来驱动电解液流动,机械能量耗散极低,且结构更简单、成本更低,有望开辟全新的液流电池技术^[36]。

3.5 钙钛矿太阳电池研究取得全面进展

钙钛矿电池技术在机理研究、材料研发、制备工艺等方面取得全面进展,解决了器件大面积制备、长期稳定性等技术瓶颈。日本冲绳科技大学研究系统揭露了碘基钙钛矿薄膜降解作用机理,认为碘卤素钙钛矿太阳电池发生降解引起性能衰退的原因不只是受到水汽、紫外线、热应力和电应力等因素影响,其本身也存在自我降解的特性,即碘蒸汽也会诱发碘卤素钙钛矿薄膜发生降解,这为改善钙钛矿电池稳定性问题提供了重要的理论参考^[37];韩国化学研究所制备的新型钙钛矿材料显著减少了钙钛矿薄膜缺陷态浓度,光电转换效率22.7%,创造了新的世界纪录^[38];上海交通大学与瑞士洛桑联邦理工学院联合采用新工艺制备出 36.1 cm^2 超大面积钙钛矿电池,效率13.9%,突破大面积工艺瓶颈,为钙钛矿电池的大规模生

产奠定了技术基础^[39]。稳定性问题是钙钛矿太阳电池能否成功走向商业化应用一大关键因素,韩国蔚山科技大学制备出全新的镧元素掺杂的锡酸钡钙钛矿材料,替代 TiO_2 作为电子传输层应用于钙钛矿太阳电池,显著提升电池的稳定性,在连续光照1000小时情况下,仍然能够保持初始效率的93%,创造了钙钛矿电池稳定性世界记录^[40]。

4 能源科技中长期发展规律与趋势

当今世界正处于新一轮能源革命的起步期,可再生能源、智能电网等技术开始规模化应用,分布式能源、第四代核电等技术进入市场导入期,大容量储能、新能源材料、氢燃料电池等技术有望取得重大突破。这些重大技术变革引发的能源革命将主导第三次工业革命的发展。纵观历次能源革命中技术变革的发展历程,均遵循了能源科技创新固有的特点和规律,即:能源科技是面向应用的阶段性发展过程,体现出高度综合、多学科交叉特点,具有经济、战略和环境等多重属性,国家需求导向和战略引领在能源科技发展中起到关键作用。能源技术进步既是遵循上述特点和规律、解决发展中面临的问题和障碍使然,也是重视能源科技创新体系的建立和完善、提高能源科技创新能力和装备制造水平的结果。

随着新能源技术和一系列新兴信息通信技术(云计算、大数据、物联网等)的发展和深度融合,全球新一轮能源技术革命呈现出“低碳能源规模化、传统能源清洁化、能源供应多元化、终端用能高效化、能源系统智慧化、技术变革全面深化”的整体趋势。

低碳能源规模化:能源结构由高碳化石能源向低碳清洁能源转变,天然气和可再生能源成为世界能源发展的主要方向。除了继续发展集中式

发电系统技术,可再生能源利用也朝着与化石能源多能互补、分布式利用的方向发展。尤其是可再生能源发电与现代电网的融合,是提高可再生能源利用比例必须跨越的技术瓶颈。

传统能源清洁化:化石能源的清洁高效开发和利用一直是能源科技的主要任务,煤炭分级分质转化清洁利用技术、碳捕集与封存技术等快速发展,表现出煤炭超低排放利用与深度低碳化兼容发展的态势。

能源供应多元化:全球天然气利用的比例不断增大,太阳能、风能、生物质能等可再生能源的利用规模化,先进安全核能等一批新能源技术的发展都在改变传统能源结构。这些改变体现在针对不同能源的资源禀赋特点而形成的开发、转化、利用、污染物控制等各个环节。

终端用能高效化:绿色能源消费模式是终端能源消费的主要方向,而终端能源未来将更多地转向电力消费。能源消费端致力于研发低能耗、高效能的绿色工艺与装备产品,工业生产向更绿色、更轻便、更高效方向发展。

能源系统智慧化:随着以智慧优化和调控为特征的能源生产消费新模式的涌现,智能电网、分布式智慧供能系统等发展迅速,交通运输向智能化、电气化方向转变,建筑向洁净化、绿色化、智能化方向发展,能源互联网发展应用正在引发用能模式和业态变革,智慧能源新业态未来将蓬勃发展。

5 启示与建议

我国是世界上最大的能源生产国和消费国,面临能源需求压力巨大、能源供给制约较多、能源技术水平总体落后等挑战,推进能源革命势在必行。“十三五”时期是全面建成小康社会、实现第

一个百年奋斗目标的决胜阶段,也是建设生态文明、推动能源革命的攻坚阶段,是积极应对气候变化、落实《巴黎协定》的一个转折期。为此必须要进一步转变思想,坚定信心,加快能源技术创新,推动能源革命。

近年来,我国能源科技创新能力和技术装备自主化水平显著提升,建设了一批具有国际先进水平的重大能源技术示范工程,标志着我国能源科技水平得到了跨越式发展。虽然我国能源科技水平有了长足进步和显著提高,但与世界能源科技强国和引领能源革命的要求相比,还有较大的差距。因此,为了更好地推进能源科技创新突破,助力能源革命,缩小与国际先进水平的差距,早日跻身世界能源科技强国之列,在结合我国国情情况下,针对我国在能源领域的科技活动提出如下建议。

5.1 顶层设计实施科学合理的前瞻性能源转型战略

把握世界能源科技绿色低碳、智能、高效、多元的发展方向,结合国家战略需求,有重点、有步骤调整面向2030和2050年的中长期能源转型战略,把战略接续油气资源开发、化石能源清洁高效利用、先进安全核能、规模化可再生能源、分布式能源和智慧能源网络作为战略优先方向,适时更新中长期发展战略/行动计划,并利用技术和产业路线图指导技术研发和产业创新。

5.2 加快技术创新提升能源装备水平和利用效率

我国能源装备和利用效率总体尚处于较低水平,因而必须通过能源技术创新,提高用能设备设施的效率,增强储能调峰的灵活性和经济性,推进能源技术与信息技术的深度融合,加强整个能源系统的优化集成,实现各种能源资源的最优配置,

构建一体化、智能化的能源技术体系。绿色低碳能源技术创新及能源系统集成创新很可能会成为引领新一代工业革命的关键因素,因此需培养能源技术自主创新生态环境,集中攻关一批核心技术、关键材料及关键装备。

5.3 关键耦合技术开发促进多能互补现代能源体系构建

“多能互补”成为能源可持续发展的新潮流,引领着能源行业迈向多种能源深度融合、集成互补的全新能源体系,是能源变革的发展趋势。因此发展多能互补的关键耦合技术,如加大风光水火储多能互补关键技术和专用技术以及多能互补控制器等关键设备研发力度,破除化石能源、可再生能源、核能等各能源体系之间技术上的相对割裂态势,促进不同能源体系相互联系和相互支持的共性技术及核心关键技术的突破,推进关联产业融合发展,构建多能互补、协调发展的能源体系。

5.4 建设美丽中国推进能源绿色发展

十九大报告将推进能源生产与消费革命列入“加快生态文明体制改革,建设美丽中国”章节,对能源发展改革工作提出了新的使命要求,即推进能源发展向更高水平、更加绿色的方向迈进。一方面,要坚定不移推进能源供给侧结构性改革,把提高供给质量作为主攻方向,大力推进化石能源清洁化发展、非化石能源规模化发展,加强煤炭清洁高效利用,降低传统化石能源生产和消费比重,不断壮大清洁能源产业,着重提高可再生能源可持续发展能力,构建清洁低碳、安全高效的能源体系。另一方面,要坚持节约集约循环利用的资源观,深入推进能源技术革命,优化能源生产管理模式,不断提高能源转换效率,降低产煤、炼油、发电等综合能耗、水耗,着力提高能源资源利用综合

效益。

5.5 着力解决可再生能源消纳问题

为促进可再生能源消纳,首先需要进一步通过相关支持政策和激励机制加大推进力度,出台可再生能源配额制,明确地方政府的主体责任,逐步放开发用电计划,将发电权交易、直接交易等交易机制纳入电力市场体系等;其次,优化可再生能源规划建设及区域布局,把握好新增项目建设节奏,严格控制弃风弃光严重地区的风电和光伏发电新增建设规模;再则,要打破区域壁垒,在可再生能源供给侧和消费侧做好平衡,立足各地资源禀赋,建立宏观调度机制,构建全国电力市场,提升跨区调度和协同互济保供能力,促进可再生能源全国范围内消纳。另外,抓住“一带一路”战略机遇,加强与“一带一路”沿线国家的能源合作,为我国可再生能源消纳提供新路径。

5.6 积极拥抱数字技术发展数字能源

在大数据时代,能源行业的数字化转型已然大势所趋。未来的几十年内,数字技术将使全球能源系统变得更加紧密互联、智能、高效、可靠和可持续。因此需要坚定不移地推进能源和数字技术深度融合,以引导能量有序流动,构筑更高效、更清洁、更经济、更安全的现代能源体系。为了顺利推进能源数字化转型,需要对能源行业从业人员进行专业的数字技术技能培训,确保以适当的方式获取及时、可靠、可验证的数据,赋予政策一定的灵活性以适应新技术发展需求,广泛地开展跨能源部门的讨论以更好地制定政策、推进能源数字化转型。此外,应该从系统观出发来考量能源数字化转型的成本和收益,密切追踪观测数字化转型对全球能源消费需求变化的影响,充分考虑和评估能源数字化转型过程中面临的潜在风险,提供一个公平的竞争环境,以更好地服务各类

能源公司和消费者,并加强国际合作,分享能源数字化转型的成功案例和经验。

参考文献

- [1] Whitehouse. Blueprint for a Secure Energy Future [EB/OL]. 2011-03-30. http://www.whitehouse.gov/sites/default/files/blueprint_secure_energy_future.pdf.
- [2] Whitehouse. The All-of-the-Above Energy Strategy as a Path to Sustainable Economic Growth [EB/OL]. 2014-05-29. http://www.whitehouse.gov/sites/default/files/docs/aota_energy_strategy_as_a_path_to_sustainable_economic_growth.pdf.
- [3] Whitehouse. Fact Sheet: President Obama to Announce Historic Carbon Pollution Standards for Power Plants [EB/OL]. 2015-08-03. <https://www.whitehouse.gov/the-press-office/2015/08/03/fact-sheet-president-obama-announce-historic-carbon-pollution-standards>.
- [4] Whitehouse. An America First Energy Plan [EB/OL]. 2017-03-28. <https://www.whitehouse.gov/the-press-office/2017/03/28/presidential-executive-order-promoting-energy-independence-and-economy-1>.
- [5] Whitehouse. Presidential Executive Order on Promoting Energy Independence and Economic Growth [EB/OL]. 2017-03-28. <https://www.whitehouse.gov/the-press-office/2017/03/28/presidential-executive-order-promoting-energy-independence-and-economy-1>.
- [6] European Commission. Energy 2020: A Strategy for Competitive, Secure, and Sustainable Energy [EB/OL]. 2010-11-10. <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52010DC0639&from=EN>.
- [7] European Commission. A Policy Framework for Climate and Energy in the Period from 2020 to 2030 [EB/OL]. 2014-01-22. <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52014DC0015&from=EN>.
- [8] European Commission. Energy Roadmap 2050 [EB/OL]. 2011-12-15. http://ec.europa.eu/energy/energy2020/roadmap/doc/com_2011_8852_en.pdf.
- [9] European Commission. Towards an Integrated Strategic Energy Technology (SET) Plan: Accelerating the European Energy System Transformation [EB/OL]. 2015-09-15. https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/1_EN_ACT_part1_v8_0.pdf.
- [10] Federal Ministry of Economics and Technology. Energy Concept for an Environmentally Sound, Reliable and Affordable Energy Supply [EB/OL]. 2010-09-28. <http://www.bmwi.de/English/Redaktion/Pdf/energy-concept,property=pdf,bereich=bmwi,sprache=en,rwb=true.pdf>.
- [11] Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety. Transforming Our Energy System-The Foundations of a New Energy Age [EB/OL]. 2012-05. https://secure.bmu.de/fileadmin/bmu-import/files/pdfs/allgemein/application/pdf/broschuere_energiewende_en_bf.pdf.
- [12] Federal Ministry of Economics and Technology. Research for an Environmentally Sound, Reliable and Affordable Energy Supply: 6th Energy Research Programme of the Federal Government [EB/OL]. 2011-11. <http://www.bmwi.de/English/Redaktion/Pdf/6th-energy-research-programme-of-the-federal-government,property=pdf,bereich=bmwi2012,sprache=en,rwb=>

- true. pdf.
- [13] BMBF. Sicher, Bezahlbar und Sauber [EB/OL]. 2016-04-05. <https://www.bmbf.de/de/sicher-bezahlbar-und-sauber-2624.html>.
- [14] BMBF. Kopernikus-Projekte für die Energiewende [EB/OL]. 2016-04-05. <https://www.bmbf.de/de/kopernikus-projekte-fuer-die-energiewende-2621.html>.
- [15] Deutscher Bundestag. Erneuerbare-Energien-Gesetz 2017 (EEG2017) [EB/OL]. 2016-10-18. https://www.gesetze-im-internet.de/eeg_2014/EEG_2017.pdf.
- [16] Ministry of Economy, Trade and Industry. Strategic Energy Plan [EB/OL]. 2014-04. http://www.enecho.meti.go.jp/en/category/others/basic_plan/pdf/4th_strategic_energy_plan.pdf.
- [17] 経済産業省. エネルギー革新戦略(概要) [EB/OL]. 2016-04-19. <http://www.meti.go.jp/press/2016/04/20160419002/20160419002-1.pdf>.
- Ministry of Economy, Trade and Industry. Energy Innovation Strategy (Summary) [EB/OL]. 2016-04-19. <http://www.meti.go.jp/press/2016/04/20160419002/20160419002-1.pdf>.
- [18] 内閣府. 「エネルギー・環境イノベーション戦略(案)」の概要 [EB/OL]. 2016-04-19. <http://www8.cao.go.jp/cstp/siryo/haihui018/siryo1-1.pdf>.
- Cabinet Office, Government of Japan. National Energy and Environment Strategy for Technological Innovation towards 2050 [EB/OL]. 2016-04-19. <http://www8.cao.go.jp/cstp/siryo/haihui018/siryo1-1.pdf>.
- [19] 経済産業省. 水素基本戦略 [EB/OL]. 2017-12-26. <http://www.meti.go.jp/press/2017/12/20171226002/20171226002-1.pdf>.
- Ministry of Economy, Trade and Industry. Hydrogen Strategy [EB/OL]. 2017-12-26. <http://www.meti.go.jp/press/2017/12/20171226002/20171226002-1.pdf>.
- [20] Department of Energy and Climatechange. UK Renewable Energy Roadmap: 2011 [EB/OL]. 2011-07-12. https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/48128/2167-uk-renewable-energy-roadmap.pdf.
- [21] Department for Business, Energy & Industrial Strategy. Government Reaffirms Commitment to Lead the World in Cost-effective Clean Growth [EB/OL]. 2017-10-12. <https://www.gov.uk/government/news/government-reaffirms-commitment-to-lead-the-world-in-cost-effective-clean-growth>.
- [22] Government of Canada. Canada's Marine Renewable Energy Technology Roadmap [EB/OL]. 2011-10. http://www.marinerenewables.ca/wp-content/uploads/2012/09/MRE_Roadmap_e.pdf.
- [23] EURACTIV. France Targets Carbon Tax in Energy Transition Law [EB/OL]. 2015-07-22. <http://www.euractiv.com/sections/sustainable-dev/france-targets-carbon-tax-energy-transition-law-316597>.
- [24] SENDEK A D, YANG Qian, CUBUK E D, et al. Holistic Computational Structure Screening of More than 12000 Candidates for Solid Lithium-Ion Conductor Materials [J]. Energy & Environmental Science, 2017(10):306-320.
- [25] HWANG J, RAO R R, GIORDANO L, et al. Perovskites in Catalysis and Electrocatalysis [J]. Science, 2017(358):751-756.
- [26] IEA. Digitalization and Energy 2017 [EB/OL].

- 2017-11-05. <http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/DigitalizationandEnergy3.pdf>.
- [27] BNEF. Digitalization of Energy Systems [EB/OL]. 2017-11-09. <https://about.bnef.com/blog/digitalization-energy-systems/>.
- [28] MARTIN S. Siemens Breakthrough with 3D printed Gas Turbine Blades [EB/OL]. 2017-02-06. <https://www.siemens.com/innovation/en/home/pictures-of-the-future/industry-and-automation/additive-manufacturing-3d-printed-gas-turbine-blades.html>.
- [29] GE. HA Technology Now Available at Industry-first 64 Percent Efficiency [EB/OL]. 2017-12-05. <http://www.genewsroom.com/press-releases/ha-technology-now-available-industry-first-64-percent-efficiency-284144>.
- [30] MIT. New Record for Fusion [EB/OL]. 2016-10-14. <http://news.mit.edu/2016/alcator-c-mod-tokamak-nuclear-fusion-world-record-1014>.
- [31] 中国科学院等离子体物理研究所. EAST 首次获得百秒量级稳态高约束模等离子体 [EB/OL]. 2016-07-04. http://www.ipp.cas.cn/xwdt/kydt/201707/t20170726_378916.html. Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences. EAST Achieves 100s World Record Steady-state High Performance Plasma [EB/OL]. 2016-07-04. http://www.ipp.cas.cn/xwdt/kydt/201707/t20170726_378916.html.
- [32] LIM J W, LI Yiyang, ALSEM D H, et al. Origin and Hysteresis of Lithium Compositional Spatiodynamics within Battery Primary Particles [J]. *Science*, 2016, 353 (6299): 566-571.
- [33] KUPPAN S, XU Yahong, LIU Yijin, et al. Phase Transformation Mechanism in Lithium Manganese Nickel Oxide Revealed by Single-crystal Hard X-Ray Microscopy [J]. *Nature Communications*, 2017(8): 14309.
- [34] CONDER J, BOUCHET R, TRABESINGER S, et al. Direct Observation of Lithium Polysulfides in Lithium-sulfur Batteries Using Operando X-Ray Diffraction [J]. *Nature Energy*, 2017 (2): 17069.
- [35] WANG Xingfeng, BOMMIER C, JIAN Zelang, et al. Hydronium-Ion Batteries with Perylenetetra-carboxylic Dianhydride Crystals as an Electrode [J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2017, 56 (11): 2909-2913.
- [36] LIU Tianbiao, WEI Xiaoliang, NIE Zimin, et al. A Total Organic Aqueous Redox Flow Battery Employing a Low Cost and Sustainable Methyl Viologen Anolyte and 4-HO-TEMPO Catholyte [J]. *Advanced Energy Materials*, 2016(6): 1501449.
- [37] WANG Shenghao, JIANG Yan, JUAREZ-PEREZ E J, et al. Accelerated Degradation of Methylammonium Lead Iodide Perovskites Induced by Exposure to Iodine Vapour [J]. *Nature Energy*, 2016, doi:10.1038/nenergy.2016.195.
- [38] NREL. Best Research-Cell Efficiencies [EB/OL]. 2017-10-30. <https://www.nrel.gov/pv/assets/images/efficiency-chart.png>.
- [39] CHEN Han, YE Fei, TANG Wentao, et al. A Solvent- and Vacuum-Free Route to Large-area Perovskite Films for Efficient Solar Modules [J]. *Nature*, 2017(550): 92-95.
- [40] SHIN S S, YEOM E J, YANG W S, et al. Colloidally Prepared La-doped BaSnO₃ Electrodes for Efficient, Photostable Perovskite Solar Cells [J]. *Science*, 2017, doi:10.1126/science.aam6620.