

动力与电气工程师

POWER & ELECTRICAL ENGINEERS

总第79期 2022 第03期



中国电机工程学会
CHINESE SOCIETY FOR ELECTRICAL ENGINEERING

• P03

凝聚科技创新力量 服务能源转型发展
加快建设中国特色一流学会

• P11

“双碳”目标下能源动力
与发电技术领域研究新进展



动力与电气工程师

POWER & ELECTRICAL ENGINEERS



主 管：中国科学技术协会
编印单位：中国电机工程学会
地 址：北京市西城区白广路
二条1号（100761）

编辑委员会

名誉主任委员：舒印彪

主任委员：林铭山

副主任委员：郑健超、汤广福、王 刚、刘建明、吴云喜、刘广峰、
李 鹏、范建斌、申彦红

顾问委员会委员（按姓氏笔画排序）：

王祥珩、王 毓、刘开俊、刘吉臻、李立涅、邱爱慈、何雅玲、张运洲、
张伯明、陈国平、陈维江、岳光溪、周孝信、赵 鹏、查仁柏、饶 宏、
郭剑波、黄其励、薛禹胜

编委会委员（按姓氏笔画排序）：

于歆杰、王 青、王 榕、王伟胜、王怡萍、王建华、王新雷、尤传永、
邓广义、付忠广、吕世森、朱 林、危师让、刘 伟、刘建明、汤 涌、
孙 锐、孙玉田、李武峰、李国庆、李铁友、李盛涛、杨争林、杨宝红、
来小康、肖立业、邱宇峰、汪映荣、张祖平、张粒子、张滨泉、陆 超、
林士涛、范长信、金文龙、周 纭、周远翔、郑福生、单葆国、孟玉婵、
赵 鹏、赵希才、赵建军、胡 荣、姚维强、顾联军、柴高峰、徐 越、
郭 强、梁曦东、董旭柱、董新洲、曾庆禹、谢书鸿、蒲天骄、雷金勇、
黎小林

主编：吴云喜

编辑部：

周 文 贾健莹 张玉荣 本期责任编辑：贾健莹

编辑部电话：(010) 63416713 (010) 63416544

传真：(010) 63414319

E-mail：jianying-jia@csee.org.cn

网址：http://www.csee.org.cn/

设 计：秦筱曦

印 刷：北京博海升彩色印刷有限公司

准印证号：京内资准字 1722-L0030 号

发送对象：会员

印 数：5000

印刷日期：2022 年 7 月

版权声明：本出版物发表的文字、图片、表格、版式、光盘等版权归中国电机工程学会所有，未经书面许可，不得为任何目的、以任何形式或手段复制、翻印、传播以及任何方式使用。本出版物保留一切法律追究的权力。

特别承诺：本出版物凡出现印装差错，一律由编辑部调换。

内部资料 免费交流

工作会议专题

- 03 凝聚科技创新力量 服务能源转型发展
加快建设中国特色一流学会
——在中国电机工程学会第十一届理事会第八次会议暨 2022 年工作会议上的报告
舒印彪
- 11 中国电机工程学会第十一届理事会第八次会议暨 2022 年工作会议在京召开
- 12 中国电机工程学会召开第十一届理事会党委第三次会议
- 13 中国电机工程学会新增选 16 名会士
- 14 中国电机工程学会 52 项标准发布
- 15 中国电机工程学会发布 2021 年度“清洁低碳发电和新型电力系统”领域科技创新成果和问题难题

特邀专题

- 17 “双碳”目标下能源动力与发电技术领域研究新进展



学会传真

- 34 2022 年顾毓琇电机工程奖在 IEEE PES 年会上颁发
- 34 第二十八届电机工程国际会议 (ICEE2022) 召开
- 35 2022 年海峡两岸能源电力融合发展论坛在厦门举行
- 36 中国电机工程学会获评中国科协“重大科技问题难题征集发布优秀推荐单位”
- 37 舒印彪理事长主编的《新型电力系统导论》图书在 2022 年全国科技工作者日主场活动上发布
- 37 中国电机工程学会副秘书长范建斌当选国际大电网委员会会士 (CIGRE Fellow)
- 38 学会主办英文期刊《CSEE Journal of Power and Energy Systems》国际影响力再创新高
- 38 2022 年中国电机工程学会直流输电与电力电子专业委员会技术研讨会在新疆昌吉召开
- 39 粤港电气工程师资格互认推介会广受关注 香港工程师学会逾 150 名会员踊跃参加

专家论坛

- 40 氢气转化可规避氢能事故，开辟应用新途径
- 42 紧紧牵住科技创新“牛鼻子”，引领新型储能高质量发展

杨裕生

杜忠明



电力人物

- 44 彭士禄：中国核动力事业的拓荒牛

青年人才

- 47 阎洁：为风电预测插上人工智能的翅膀



政策解读

- 49 国务院印发《关于印发扎实稳住经济一揽子政策措施的通知》
49 国务院：在有条件的地区推进屋顶分布式光伏
49 九部委发布“十四五”可再生能源发展规划
50 17 部委联合印发《国家适应气候变化战略 2035》
50 教育部印发碳达峰碳中和人才培养工作方案
51 发改委等六部门：加大煤炭清洁高效利用市场调节和督促落实力度
51 发改委印发《“十四五”生物经济发展规划》
52 发改委、能源局发文推动新型储能参与电力市场
52 能源局印发《全国电力安全生产大检查工作方案》
53 能源局印发《2022 年电力行业班组安全建设专项监管工作方案》
53 能源局出台 30 项措施防止电力安全事故
53 国家能源局批准《智能风电场技术导则》等 209 项能源行业标准

前沿速览

- 54 世界首个配置抽背式 9F 级燃气 – 蒸汽联合循环发电机组工程全面建成投产
54 我国首座梯级水光蓄互补联合电站正式投运
55 全国首座光伏直供换电站投运
55 全球首条 35kV 低频海底电缆入海
56 全国首个大规模“以大换小”增容改造风电项目并网发电
56 我国首个深远海浮式风电国产化研制及示范项目正式进入工程实施阶段

创新成果

- 57 2021 年度中国电力科学技术进步奖
一等奖获奖项目介绍（三）



凝聚科技创新力量 服务能源转型发展 加快建设中国特色一流学会

——在中国电机工程学会第十一届理事会第八次会议暨
2022 年工作会议上的报告

中国电机工程学会理事长 舒印彪

壹 > 2021 年工作回顾

过去的 2021 年是党和国家历史上具有里程碑意义的一年，我们实现了第一个百年奋斗目标，开启了向第二个百年奋斗目标进军的新征程。学会在习近平新时代中国特色社会主义思想指导下，认真落实中国科协工作部署和学会理事会工作安排，切实履行“四个服务”职责，统筹推进疫情防控和学会发展，扎实开展党史学习教育，围绕建设中国特色一流学会战略目标，积极创新方式方法，着力提升服务能力，在加强党的领导、提升学术引领、服务行业创新、助力人才成长、推动科学普及、深化国际交流、完善治理体系等方面，开展了一系列工作并取得显著成效，先后荣获中国科协“党建工作先进学会”“科技公共服务优秀学会”“重大科技问题难题征集发布优秀推荐单位”“全国学会科普工作优秀单位”等荣誉，学会的组织凝聚力、学术引领力、社会公信力和国际影响力都实现了新提升。

（一）坚持党的全面领导，政治引领能力和人才凝聚作用显著增强

一是党建引领作用不断增强。坚持党的全

面领导，深入学习贯彻习近平总书记系列重要讲话、“七一”重要讲话和十九届六中全会精神，深入学习领会习近平总书记在两院院士大会、中国科协第十次全国代表大会上的重要讲话精神，扎实开展党史学习教育。认真履行理事会党委职责，健全学会三级党组织结构，在专委会层面建立党建工作小组，完成办事机构党支部换届。深入推进党建和学会业务融合发展，结合“我为群众办实事”活动要求，组织科技工作者在福建龙岩和湖南韶山开展“党建 + 科普”“党建 + 科技服务”等活动，积极助力扶贫攻坚和乡村振兴。

二是大力弘扬科学家精神。在学会网站、微信公众号和会刊上建立专题，广泛宣传“最美科技工作者”及优秀科技工作者的先进典型事迹。举办全国科技工作者日、青年学术会议、科技工作者座谈会等活动，邀请专家宣讲科学道德、科研诚信和先进事迹，大力推动行业学术自律建设。

三是会员发展取得新成效。学会现有个人会员 13 万余人，单位会员 400 余家，其中

2021 年新发展个人会员 9300 多人、单位会员 40 余家, 晋升高级会员 301 人, 新增会士 16 人, 其中外籍会士 8 人。为会员提供《电信息》《动力与电气工程师》和数字化图书馆等服务。组织开展女科技工作者职业发展自立课题研究。

四是科技奖励和人才举荐成果丰硕。完成 2021 年度中国电力科技奖评审, 评选获奖项目 145 项。学会提名项目获得 2020 年度国家技术发明二等奖 1 项、国家科技进步二等奖 2 项。完成 2021 年顾毓琇电机工程奖评审, 华北电力大学贺仁睦教授获得殊荣。完成 2021 年度中国电力科技人物奖评审, 评选获奖者 110 名。组织编写《电力科技发展与电力科技成果》图书。完成 2021 年度院士候选人、光华工程科技奖、求是杰出青年成果转化奖等重大人才奖项推荐。组织完成“青年人才托举工程”项目评审, 5 人入选中国科协项目, 28 人入选学会项目。

（二）大力提升学术活动质量，学术引领作用和决策支撑能力显著增强

一是一流期刊建设扎实推进。《中国电机工程学报》期刊影响力指数继续保持学科国内排名第一, 荣获中国科协卓越行动计划 2021 年度优秀期刊奖。英文刊《CSEE JPES》影响因子较上年大幅增长, 跻身该领域 Q1 分区。《农村电气化》和《农电管理》入选中国科协“2021 年度全国学会期刊出版能力提升计划”。完成中国科技期刊能源、化工与环境集群年度优秀论文遴选, 推荐 10 篇论文全部入选。评选学会 2021 年优秀论文 100 篇。

二是学术交流质量不断提升。以“开放 合作 共享 构建新型电力系统”为主题, 召开学术年会, 并举办“院士专家论坛”“学术报告发布会”“新型电力系统论坛”等主题活动。紧密围绕碳达峰碳中和、构建新型电力系统, 组织召开电气工程学院院（校）长论坛、清洁高效发电协作网会议、太阳能热发电大会、海峡两岸能源电力融合发展论坛等重要会议, 举办 5 期“CSEE

网络学术报告厅——能源创新青年论坛”, 电力系统等 8 个专委会联合召开清洁能源发展与消纳论坛, 直流输电与电力电子专委会举办直流输电与电力电子创新杯大赛, 全年举办学术交流活动近百场。

三是创新引领能力日益增强。开展中国科协“2021 年度电力领域重大科学问题、工程技术难题”征集, 推荐的“以新能源为主体的新型电力系统路径优化和稳定机理”入选 2021 年度十大科学问题。组织开展 2021 年“清洁低碳发电和新型电力系统”领域科技创新成果和问题难题征集, 编写《分布式发电及智能配电》等 10 部专业发展报告和《青藏电力联网工程关键技术再评价》等 14 部专题技术报告。

四是决策咨询支撑成效显著。组织完成中国工程院“电力行业碳达峰、碳中和实施路径研究”课题研究, 成果已由中国工程院正式发布。完成国家能源局“新能源电力系统发展及其技术与装备创新支撑研究”课题, 组织开展国家能源局《防止电力生产事故的二十五项重点要求》（2014 版）修订, 参与《专利法实施细则》修订并提出咨询意见, 承担中国科协“新能源高层次研讨会”组织工作并完成《新能源高质量发展科技工作者建议》, 编写完成中国科协“双碳”系列丛书——《新型电力系统导论》并正式发布, 承担人工智能、氢能、储能等科技咨询项目研究, 组织开展高比例新能源并网、电动汽车与电网互动等学会自立项目研究。

五是科普品牌效应持续提升。完成“电力之光”科普品牌标识注册, 组织开展第四届“电力之光”中国电力科普日活动, 围绕碳达峰碳中和与新型电力系统举办“电力之光大讲堂”线上系列讲座, 新聘任科学传播专家 97 名, 新授牌“电力科普教育基地”29 家, 向中国科协推荐全国科普教育基地 10 家。以“科普扶智 + 产业振兴 + 党建活动”模式, 举办湖南科普下乡暨乡村振兴活动。指导专委会和省级学会开展科技周等科

普活动。联合国家电网公司共同编著《绿电与冬奥》科普丛书5册,开展2021年优秀科普短视频和科普作品评选。

六是服务科技经济融合成效显著。组建能源互联网和工业互联网融合发展产业科技服务团,以浙江温州、青海西宁等“科创中国”试点城市为依托,加强与地方科协和省级学会的沟通协调,组建专家团队开展企业技术需求调研和产业科技咨询服务,先后推荐100余位专家,挖掘凝练50余条产业服务需求,遴选50余项技术成果信息,发布在“科创中国”平台。

（三）坚持专业化运营管理，科技服务质量和学会治理能力显著提升

一是公共服务质量持续提升。完成科技成果评价270余项、成果登记480余项,完成42家电力查新机构的资质复检。优化学会标准管理机制,修订管理办法和实施细则,组织开展标准工作交流、应用宣贯等活动,全年发布标准132项,新立项标准90项,系列标准工作稳步推进。推动电气工程类工程师资格国际互认,协助中国科协与巴基斯坦开展标准互认,共151人获得学会工程会员资格。与英国工程技术学会(IET)联合开展国际工程师资质认证,76人通过认证。首次开展能源动力类专业工程教育认证,3个专业通过认证,遴选认证专家63人,推荐3位专家进入《华盛顿协议》(WA)国际咨询专家库。

二是学会组织体系持续完善。严格依据章程召开理事会和常务理事会,对学会重大事项进行审议。印发学会监事会工作办法,健全监督机制。新成立电力机器人、海上风电、区块链和智能感知4个专委会,完成6个专委会换届。评选2021年度先进集体28个,先进个人33人。加强与省级学会的协同合作,与福建、湖南、江苏等省级学会联合开展学术交流、科普、党建等活动。

三是运营管理能力不断提升。制订发布学会“十四五”发展规划,编制2021年年报。加

强干部员工队伍建设,组织员工参加能力提升、继续教育培训,完善绩效考核评价机制。加强资金和预算管控,深化业财融合,财务基础工作进一步夯实。加强学会信息化建设,完成5个系统优化升级,持续完善数字化图书馆,累计入库科技信息23万余条。

（四）不断加强对外交流合作，国际科技治理能力和学术影响力显著提升

一是国际标准工作成效显著。积极推进IEC主席领导IEC机构治理改革,推动IEC国际标准促进中心落户南京。成立国际标准专家咨询委员会和国际标准促进委员会,在IEC发起成立电力机器人新技术委员会和极端环境下电气设备新标准化评估组,组织编写电力机器人等3项国际标准草案,牵头编制3本IEC白皮书。推动能源电力合格评定体系建设,完成电动汽车充换电等4个认证项目研发。开展国际标准课程设计和授课,举办大型国际标准讲座,培训国际标准课程学员500余人。

二是国际人才交流不断深化。积极组织国内专家参加国际组织的工作,开展CIGRE专委会中国委员换届,推荐中国专家担任专委会委员,深度参与CIRED机构改革。北美会员中心、英国分会等海外会员中心积极开展学术交流活动,推荐外籍专家作为会士候选人,联系服务海外科技工作者的能力持续提升。

三是国际学术交流不断加强。组织国内专家在线参加第26届国际供电会议、国际大电网委员会百年庆典等大型国际学术会议活动。在韩国电气学会2021年年会、IEEE PES年会上发表视频致辞。以线上线下相结合方式,举办第13届中美绿色能源论坛、第3届可持续电力能源国际会议、第13届电力系统技术国际会议、第26届电机工程国际会议等9场大型国际学术会议。

2021年学会各项工作迈上了新台阶,实现了“十四五”良好开局。这些成绩的取得,根本在于习近平新时代中国特色社会主义思想的指

引,是中国科协有力指导的结果,是学会各理事单位、会员单位大力支持的结果,是能源电力行业广大院士专家和科技工作者积极参与、热情奉献的结果,也是学会各工作委员会、专委会、会

员中心、办事机构工作人员辛勤工作、拼搏付出的结果。在此,我谨代表中国电机工程学会,向大家致以诚挚的敬意和衷心的感谢!

贰 > 全力支撑高水平科技自立自强,加快建设中国特色一流学会

党中央对新时代学会创新发展提出新要求。当前,世界百年未有之大变局加速演进,全球疫情仍在持续,外部环境更趋复杂严峻和不确定。新一轮科技革命和产业变革深入推进,科技创新成为国际战略博弈的主要支撑。党的十九届六中全会强调要坚持实施创新驱动发展战略,把科技自立自强作为国家发展的战略支撑,加快建设创新型国家和世界科技强国。习近平总书记在中央人才工作会议上强调,要深入实施新时代人才强国战略,加快建设世界重要人才中心和创新高地。习近平总书记在两院院士大会和中国科协十次全国代表大会上提出,科协组织要肩负起党和政府联系科技工作者桥梁和纽带的职责,为全面建设社会主义现代化国家、推动构建人类命运共同体作出更大贡献。

中国科协对创建中国特色一流学会作出新部署。中国科协制定发布了“十四五”规划,提出实施一流学会创建工程,要求学会围绕新时代科技社团的使命和职责,增强围绕中心、服务大局的意识和能力,面向世界科技前沿、面向经济主战场、面向国家重大需求、面向人民生命健康,聚焦提升组织凝聚力、学术引领力、社会公信力和国际影响力“四个能力”,加快建设中国特色一流学会。中国科协在2022年度工作会强调,要准确定位在推动高水平科技自立自强中的坐标支点,深刻理解在服务构建新发展格局中的担当作为,以高水平科技自立自强破局突围,提升科技创新体系化动员效能。

深入推动能源革命对强化科技支撑提出新挑战。我国能源电力行业正以“四个革命、一个合作”能源安全新战略为指引,大力推动能源绿色低碳转型,加快建设能源强国,推动实现碳达峰碳中和目标。实现碳达峰碳中和是一项系统工程,是一场广泛而深刻的经济社会变革,不是轻轻松松能够实现的。解决碳达峰碳中和重大理论和实践问题,科技创新和产业升级将发挥关键作用。建立在化石能源消费基础上的经济结构、产业技术体系正在发生深刻变革,基础性、原创性科技创新成果将大量涌现。能源电力行业要立足国情,坚持先立后破,做好煤炭清洁高效利用这篇大文章,增加新能源消纳能力,狠抓绿色低碳技术攻关,加快实现能源电力行业高水平科技自立自强。

加快建设中国特色一流学会对学会发展提出新目标。学会作为党领导下的科技社团组织,是国家科技创新体系的重要组成部分。实现碳达峰碳中和,构建新型电力系统,对学会创新发展提出新的更高要求。学会必须充分发挥在科技创新体系中的独特作用,引导广大能源电力科技工作者加强科研攻关,努力取得更多引领性、战略性、创新性成果,在加快能源科技自主创新步伐,推动能源清洁低碳转型等方面展现更大作为。对照党中央的新要求、中国科协的新部署、能源行业的新挑战和建设一流学会的新目标,学会要树立品牌意识,按照补齐短板、锻造长板的思路,切实有效提升组织凝聚力、学术引领力、社会公信

力和国际影响力，加快建成中国特色一流学会。

一是着力提升组织凝聚力。要坚持党的全面领导，充分发挥党的政治引领作用，大力弘扬科学家精神，积极引领学术生态建设，不断增强价值引领作用；完善会员服务体系，创新服务模式，不断提升会员服务能力和水平；加强科技人才培养举荐力度，高度重视青年人才培养，打造能源电力行业科技奖项品牌。不断提升学会的组织凝聚力，努力在科技工作者政治引领和人才凝聚方面实现新跨越。

二是着力提升学术引领力。加快培育一流能源电力科技期刊，提升期刊学术影响力和国际化水平；持续提升学术交流质量，打造能源电力领域高端学术交流品牌；加强重大科学问题难题研判，发布学科领域的最新进展和趋势；建设能源电力科技高端智库，规范专家咨询团队建设，积极开展重大战略咨询研究；构建高质量科普工作体系，打造能源电力科普品牌；加强科技成果转移转化，搭建科技成果转移转化平台，积极促进科技与经济深度融合。不断提升学会的学术引

领力，努力在学术方向引领和科技创新支撑方面实现新提升。

三是着力提升社会公信力。不断拓展公共科技服务领域，提供一流公共服务产品，持续提升科技服务质量，努力提升价值创造能力；不断提升学会标准质量，树立学会标准品牌；做好工程教育认证和工程能力认证工作，积极服务工程人才培养。持续完善学会民主治理体系和治理结构，加强信息化建设，提升学会整体运营管理能力。不断提升学会的社会公信力，努力在咨询决策支撑和科技公共服务方面展现新作为。

四是着力提升国际影响力。深度参与国际标准治理，大力推动标准国际化，推动建立电力行业标准认证体系；提升海外分支机构运作水平，加强与海外科技组织与人才的合作；搭建高端国际学术交流平台，加大对外学术交流合作力度，强化国际化人才培养和举荐；培育具有国际影响力的科技奖项。不断提升学会的国际影响力，努力在国际人才培养和国家交流合作方面迈出新步伐。

叁 > 2022 年重点工作

2022 年学会工作总体要求是：坚持以习近平新时代中国特色社会主义思想为指导，全面贯彻党的十九大和十九届历次会议精神，以迎接学习宣传党的二十大为主线，深刻认识“两个确立”的决定性意义，切实增强“四个意识”、坚定“四个自信”、做到“两个维护”，认真落实中国科协十届三次全委会工作要求，履行“四个服务”职责，紧扣“四个面向”，大力提升“四个能力”，加快建设中国特色一流学会，全力支持能源电力科技高水平自立自强和绿色低碳转型，以实际行动迎接党的二十大胜利召开。重点

做好以下十个方面的工作。

（一）持续加强党的建设

强化政治思想引领。坚持把党的政治建设摆在首位，及时跟进学习习近平总书记重要讲话和指示批示精神，认真学习宣传贯彻党的二十大精神，推进党史学习教育常态化长效化，坚持不懈强化党的创新理论武装，持续提升政治能力，坚决捍卫“两个确立”，自觉做到“两个维护”。加强党的组织建设。健全理事会党委、办事机构党委、分支机构党的工作小组三层组织体系，探索分支机构党建工作新途径，建立完善理事会党



组织的工作体系。持续推进党支部标准化规范化建设，夯实党建工作基础。推进党建工作制度化规范化。深化党建与业务融合发展。深入实施“党建强会计划”项目，采用“党建+科普”、“党建+科技服务”、支部联创共建等形式，加强党建工作与学会业务深度融合，推动学会创新发展。加强党风廉政建设。深入开展党风廉政教育和警示教育，严格落实中央八项规定及实施细则，持续纠“四风”树新风，不断强化廉洁风险防控和日常监督，大力营造“干事干净”风清气正的良好氛围。严格落实意识形态工作责任制。加强学会所属期刊、网站、“三微一端”、研讨会、论坛等意识形态阵地的管理，守土负责抓落实，确保意识形态工作的正确方向。

（二）不断提升学术活动价值

打造高水平学术交流平台。加强学术工作的系统性，围绕碳达峰碳中和、构建新型电力系统，强化学术活动全链条策划，统筹学会、专委会和省级学会不同层面的学术交流活动，做好成果总结提炼，不断提升交流质量与传播效果。加强与其他行业学会的联合，积极开展多专业相融合的学术交流活动 and 专题研讨会。组织办好

2022 年年会、清洁能源消纳会议、清洁高效发电技术协作网会议、青年学术会议、海峡能源电力融合发展论坛、太阳能热发电大会等重要学术会议。大力促进行业科技创新。组织做好重大科学问题技术难题征集和研判，发布工程技术典型案例，编制专业发展报告和专题技术报告，积极引导技术发展方向，促进行业科技创新不断取得新突破。加强行业学术生态建设。大力弘扬科学家精神，加强行业科学道德和学风建设，开展多种形式的宣讲活动，积极引导学术生态建设，营造风清气正的科研环境和良好的学术环境。

（三）大力推动标准国际化

深度参与国际标准治理。深入开展国际标准化战略、政策和规则的跟踪研究，积极参与 IEC 战略规划制定。做好 IEC 国际标准促进中心（南京）建设工作，组织做好国际标准峰会、国际标准沙龙等重大活动。大力开展国际标准化工作。深化国际标准化领域的交流合作，积极开展国际标准制定与咨询服务，推动电力机器人、综合能源服务、多源固废耦合发电等新技术的国际标准制定。加快建立合格评定体系。跟踪国内外检测认证发展方向，聚焦电动汽车、海上风电

等重点领域开展认证,推动建立电力行业合格评定体系。加强国际化人才培养。加快国际标准化学科课程体系建设和教材开发,做好国际标准化高端培训等重大培训活动。

(四) 加快培育世界一流科技期刊

提升期刊质量和国际化水平。持续加强高品质学术期刊建设,做好期刊编委会换届工作,持续优化编委会团队,加大国际化力度,提高稿源质量。持续提升《中国电机工程学报》、英文刊《CSEE JPES》的学术水平和国际影响力,不断提高《高电压技术》《中国电力》《热力发电》等期刊质量,推动能源电力领域期刊集群化发展。提升学会两个内部出版物的质量,为会员提供信息服务。持续完善期刊评价体系。优化能源电力领域高质量科技期刊分级目录,加强宣传推广应用,探索构建权威的能源电力领域期刊评价体系,推动国内外期刊同质等效,进一步提高优秀论文评选活动的质量和影响力。

(五) 持续提升决策咨询支撑能力

加强战略决策咨询服务。紧密围绕能源电力领域重大问题和热点问题,开展战略决策咨询研究,及时为政府科学决策建言献策。建设能源电力高端科技智库,积极参与相关科技战略、规划、政策、法律法规的研究、咨询和制定,积极推动学术研究成果有效转化为重大咨询建议。积极承接重大科技咨询项目,组织做好重大课题研究工作。组织做好科技经济融合服务。依托中国科协“科创中国”平台,充分发挥省级学会地域优势和专委会专家资源优势,积极开展企业技术咨询、技术对接、成果转化、技能培训等服务工作。加强组织协调,做好“能源互联网产业科技服务团”工作。

(六) 做好科技奖励和人才举荐

继续做好科技奖励工作。不断完善优化科技奖励体系,努力打造与国际接轨的科技奖项品牌,吸引国际一流人才和科技成果参与国内科技奖励。做好中国电力科技奖和人物奖评选,以及

年度国家科技奖提名。完善人才举荐机制。多渠道向政府和社会举荐优秀人才,组织做好创新人才推进计划、中国青年科技奖、中国青年女科学家等奖项候选人提名推荐,助力科技工作者成长成才。加强青年人才培养。以“青年人才托举工程”为依托,通过学术研讨、科研课题资助、国际交流等形式,为青年人才成长提供良好条件,组织做好第七届“青年人才托举工程”项目。

(七) 持续深化对外交流合作

加大国际学术交流。举办第10届中国国际供电会议、国际供电会议组织上海技术研讨会、第6届能源互联网与能源系统集成国际会议、第4届可持续电力与能源国际会议等重要学术会议。组织国内科技人员参加CIGRE大会、电机工程国际会议等学术会议。加强国际人才培养。做好CIGRE、CIRED国家委员会秘书处工作,探索新的服务模式,大力支持我国科技工作者在国际组织担任重要职务。探索顾毓琇电机工程奖进一步国际化,鼓励提名外籍专家作为候选人。加大国际合作力度。提升海外分支机构运作水平,组织开展境外学术交流活动,加强对海外科技人才的联系,积极发展海外会员。加强与港澳台地区的学术交流合作。不断推进海峡两岸及港澳论坛的品牌化进程,促进海峡两岸暨港澳协同创新发展。

(八) 不断提升科技服务能力

持续提升科技服务质量。积极拓展科技成果评价服务,规范成果登记管理,加强科技查新管理。打造团体标准品牌。优化学会标准工作机制,加大标准宣贯和应用,不断提升标准质量,推动标准制定、技术创新、认证服务一体化发展。做好工程师资格国际互认。参与中国科协工程师资格国际互认行业试点,组织做好工程师资质国际认证,推进继续教育课件开发,积极为工程会员提供服务。继续做好工程教育认证。扎实推进能源动力类专业工程教育认证,做好材料评审和入校考察,完善秘书处工作机制,加强专家队伍建设。



（九）不断强化科普品牌效应

加强科普组织建设。持续聘任科学传播专家，培养建立优秀科普创作和宣传团队，继续开展电力科普教育基地授牌工作，积极向中国科协推荐全国科普教育基地，制定基地建设认定标准。积极开展科普活动。做好中国电力科普日、科普下乡、科普讲座等“电力之光”系列活动，积极参加全国科普日、科技周、防灾减灾等活动。加强科普创作和推广。创作并征集优秀科普图文和短视频，打造电力科普资源库，完善科普资源共建共享平台，形成网站、微信等多渠道广泛传播。

（十）加强学会治理体系建设

提升学会规范管理水平。持续完善理事会、常务理事会民主决策机制和监事会监督机制。加强专委会规范化管理，建立激励考核机制，充分调动专委会积极性主动性，支持专委会做好学术交流、科技服务等活动。密切与省级学会的联系，充分发挥省级学会地域优势，指导或联合开展重大活动。加强会员服务能力建设。梳理会员服务

需求，建立层级清晰、精准优质的会员服务体系。不断扩大会员发展领域和渠道，加强青年会员、企业会员和海外会员的吸纳。持续规范会员登记，优化会员发展、晋升的审批流程。进一步加大会员中心建设力度。加强办事机构能力建设。强化办事机构队伍建设，完善绩效考核办法和薪酬体系制度。加强财务预算管理，健全内部控制规范，增强业务拓展活力和支撑保障水平。加强信息化建设，优化升级信息系统，加大数字化图书馆信息资源建设，增强服务支撑能力。加强学会宣传工作的整体策划，加大宣传力度，不断提升学会活动的影响力。

征程凝聚力量，奋斗开创未来。让我们以习近平新时代中国特色社会主义思想为指导，紧密团结依靠广大能源电力科技工作者，开拓创新，奋勇拼搏，加快建设中国特色一流学会，以实际行动迎接党的二十大胜利召开，努力为建设世界科技强国、实现中华民族伟大复兴的中国梦作出新的更大贡献！🇨🇳

中国电机工程学会第十一届理事会第八次会议暨 2022 年工作会议在京召开

7月12日，中国电机工程学会第十一届理事会第八次会议暨2022年工作会议以“线上线下”结合的方式召开，会议主会场设在北京。中国电机工程学会理事长，IEC主席，中国华能集团有限公司党组书记、董事长，中国工程院院士舒印彪出席会议并作工作报告。中国电机工程学会名誉理事长郑宝森，副理事长贺锡强、金耀华、王良友、姚强、刘吉臻、林铭山，国家电网有限公司副总经理、党组成员陈国平，学会监事长欧阳昌裕，秘书长王刚，中国科学院院士周孝信、程时杰、何雅玲，中国工程院院士黄其励、李立涅、汤广福，以及各专业委员会、省级学会秘书长等260余人参加会议。会议由学会副理事长林铭山主持。

舒印彪理事长作了题为《凝聚科技创新力量，服务能源转型发展，加快建设中国特色一流学会》的工作报告。报告以习近平新时代中国特色社会主义思想为指导，全面贯彻党的十九大和十九届历次全会精神，认真落实中国科协十届三次全委会工作部署，全面总结了学会2021年工作，分析了当前发展面临的形势和任务，系统阐述了建设中国特色一流学会的总体思路和目标，提出了2022年工作重点任务。

舒印彪理事长在报告中指出，2021年，学会在习近平新时代中国特色社会主义思想指导下，认真落实中国科协工作部署和学会理事会工



作安排，切实履行“四个服务”职责，统筹推进疫情防控和学会发展，扎实开展党史学习教育，围绕建设中国特色一流学会战略目标，积极创新方式方法，着力提升服务能力，在加强党的领导、提升学术引领、服务行业创新、助力人才成长、推动科学普及、深化国际交流、完善治理体系等方面，开展了一系列工作并取得显著成效，学会的组织凝聚力、学术引领力、社会公信力和国际影响力都实现了新提升。

报告提出，当前，党中央对新时代学会创新发展提出了新要求，中国科协对创建中国特色一流学会作出了新部署，深入推动能源革命对强化科技支撑提出了新挑战，加快建设中国特色一流学会也对学会发展提出了新目标。这个任务重大而迫切，需要各位理事、各理事单位，能给予充分重视，齐心协力做好一流学会建设工作。对照这些要求、部署、挑战和目标，学会要树立品牌

意识，按照补齐短板、锻造长板的思路，切实有效提升组织凝聚力、学术引领力、社会公信力和国际影响力，加快建成中国特色一流学会。

报告要求，2022 年学会要认真落实中国科协十届三次全委会工作部署，履行“四个服务”职责，持续加强党的建设，不断提升学术活动价值，大力推动标准国际化，聚焦行业重点领域开展认证，加快培育世界一流科技期刊，持续提升决策咨询支撑能力，做好科技奖励和人才举荐，持续深化对外交流合作，不断提升科技服务能力，不断强化科普品牌效应，加强学会治理体系建设，全力支持能源电力科技高水平自立自强和绿色低碳转型，以实际行动迎接党的二十大胜利召开。

会上宣布了 2021 年度增选中国电机工程学会会士和外籍会士名单，以及 2021 年度中国电机工程学会先进集体、先进个人名单。

会议审议通过了舒印彪理事长所作的题为《凝聚科技创新力量，服务能源转型发展，加快建设中国特色一流学会》的工作报告，审议通过了《中国电机工程学会 2021 年财务决算和 2022 年预算安排报告》和《中国电机工程学会中国特色一流学会建设方案》。

会议审议通过了关于变更中国电机工程学会第十一届理事会理事、常务理事等人选的建议，胡海舰、顾济江、黄震当选学会第十一届理事会常务

理事；吴云喜等 13 位同志当选学会第十一届理事会理事；王鹤鸣当选副秘书长。

会上举行了中国电机工程学会 2021 年度“清洁低碳发电和新型电力系统”领域科技创新成果和问题难题发布仪式，发布科技成果 30 项和问题难题 10 项。会议还举行了中国电机工程学会标准发布仪式，舒印彪理事长和郑宝森名誉理事长为新发布的 52 项 CSEE 标准揭幕。截至目前，学会已发布标准 326 项。

林铭山在会议总结中指出，舒理事长所作的工作报告立足当前、主题鲜明，目标明确、措施具体，是学会做好今年和今后一个时期工作的行动指南。学会各工作委员会、专业委员会、省级学会、会员中心和办事机构各部门一是要做好会议精神的传达学习和贯彻落实，拿出具体的工作举措和行动方案，加强会议精神的宣传。二是要做好中国特色一流学会建设方案的落地实施，制订具体的实施方案，明确工作要求，分解细化工作任务，确保五年各项重点工作目标顺利完成和建设中国特色一流学会总体目标早日实现。三是要逐项梳理 2022 年重点工作，把任务落实到具体部门和人员，加大组织协调力度，加强任务考核，确保全面完成年度任务。要根据年度财务预算安排，制订各项活动经费使用方案，加强财务经费的规范化管理，支撑学会各项工作顺利开展。📌

中国电机工程学会召开 第十一届理事会党委第三次会议

7 月 12 日上午，中国电机工程学会第十一届理事会党委第三次会议在京召开。学会理事会党委书记、理事长舒印彪同志主持会议并讲话，党委委员金耀华、刘吉臻、林铭山、欧阳昌裕、王刚等 10 名

同志出席会议，学会副秘书长范建斌、吴云喜、申彦红同志列席会议。

会议审议了学会第十一届理事会第八次会议暨 2022 年工作会议工作报告、学会 2021 年度财务决

算和 2022 年预算安排报告、中国特色一流学会建设方案等事项；审议通过了关于变更学会第十一届理事会党委委员的建议；审议通过了学会 4 家专业委员会成立党建工作小组的建议。

舒印彪指出，2021 年，学会理事会党委坚持以习近平新时代中国特色社会主义思想为指导，强化政治思想引领，深入学习贯彻习近平总书记重要讲话和指示批示精神，健全完善理事会党委、办事机构党委、专委会党建工作小组三级组织架构，大力实施“党建强会计划”，党建工作在学会事业发展中的引领保障作用充分彰显。学会获得中国科协“党建工作先进学会”荣誉称号。

舒印彪强调，2022 年是党的二十大召开之年，党中央对推进党的建设新的伟大工程提出新的更高要求。学会各级党组织和广大党员要坚持把政治建设摆在首位，把迎接和学习宣传贯彻党的二十大精神作为重大政治任务，用党的创新理论凝心铸魂；要加强党的组织建设，完善党建工作制度，夯实党建工作基础；要深化党建与业务融合发展，大力弘扬科学家精神，紧密团结依靠广大能源电力科技工作者，开拓创新，奋勇拼搏，为加快建设中国特色一流学会，建设世界科技强国、实现中华民族伟大复兴贡献力量，以实际行动迎接党的二十大胜利召开。🚩

中国电机工程学会新增选 16 名会士

7 月 12 日，在中国电机工程学会第十一届理事会第八次会议暨 2022 年工作会议上公布了 2021 年度中国电机工程学会增选会士名单，新增选 8 名会士和 8 名外籍会士。

会士是会员在学会的最高学术荣誉。为表彰在电机工程科学技术领域有重大贡献、成绩卓著

的专家学者，自 2011 年起，学会开展了会士遴选工作，现有 148 人当选会士。为吸纳和表彰在电机工程科学技术领域作出卓越成就的知华友华外籍专家，自 2018 年起，学会开展了外籍会士遴选工作，现有 30 人当选外籍会士。🚩

2021 年度增选中国电机工程学会会士名单

高 翔	贺仁睦	姜培学	洪 潮
廖瑞金	罗剑波	孙宏斌	文卫兵

2021 年度增选中国电机工程学会外籍会士名单

An Ting	Xiuzhen Cheng
Antonio J. Conejo	Daniel Kirschen
Mark J. O'Malley	Sergio Amedeo Pignari
Tang, Wenhui	Richard Andrew Williams

中国电机工程学会 52 项标准发布

7月12日,中国电机工程学会在京发布了《电能质量现场测试技术规范》等52项标准。标准发布仪式在中国电机工程学会第十一届理事会第八次会议暨2022年工作会议期间举行。

中国电机工程学会理事长舒印彪、名誉理事长郑宝森为52项中国电机工程学会标准揭幕。

近年来,学会全面落实国家标准化战略,坚持遵循“质量第一、技术先进、面向需求、广泛认可、共同参与、合作共赢”的工作原则,充分发挥学会智力资源丰富优势,不断完善标准工作组织架构,优化标准工作流程,积极协调相关市场主体,组织制定了满足市场和创新需要的标准,填补电力相关领域标准空白,持续提升学会标准质量,大力促进行业科技进步,学会标准的影响力显著提升。

截至目前,学会共计39个专委会的2000余家单位参加标准工作,共立项标准575项,已发布标准326项。学会发布及立项的标准涵盖电网、火电、水电、新能源、环保等多个领域,涉及发、输、变、配、用、储各个环节。在电网技术领域,学会先后制订了《统一潮流控制器》《柔性直流输电》两个富有创新特色的系列标准,以及《特高压交流变压器风险评估导则》《电能质量现场测试技术规范》等先进标准,填补了相关技术领域的标准空白。在发电技术领域,先后制



舒印彪和郑宝森为新发布标准揭幕

订了《发电厂及变电站电气数字化设计技术规范》《火力发电机组自动快速甩负荷技术规程》等标准,促进火电技术不断转型升级。在新能源领域,先后制订了《海上风电场设备选型技术导则》《地面用晶体硅光伏组件选型技术导则》等标准,积极支撑可再生能源的大规模开发利用。在电力数字化领域,先后制订了《电力无线专网》《电力量子保密通信系统》等标准,积极引领电力行业数字化转型。

下一步,学会将持续加强团体标准工作,加强顶层设计,规范工作流程,严把质量关口,坚持“立”好标准、“编”好标准、“用”好标准,大力推进标准国际化,积极打造学会标准品牌。📌



中国电机工程学会发布 2021 年度 “清洁低碳发电和新型电力系统” 领域科技创新成果和问题难题

7月12日，中国电机工程学会在第十一届理事会第八次会议暨2022年工作会议上正式发布了2021年度“清洁低碳发电和新型电力系统”领域科技创新成果和问题难题。

围绕“双碳”目标，为助力构建以新能源为主体的新型电力系统，促进学术交流，中国电机工程学会于2021年9月面向电力行业广大科技工作者开展了“清洁低碳发电”和“新型电力系统”领域的科技创新成果和问题难题征集活动。本次活动共收到科技成果和问题难题投稿140余项，经评审委员会多轮审议和推荐，共精选出“千万千瓦级海上风电友好并网与消纳关键技术及装备”等30项科技成果和“大规模新能源供电能力预测技术”等10项问题难题并汇编成集。其中，

工程技术难题“大型可变速抽水蓄能机组”经学会推荐，成功入选中国科协2022年十大产业技术问题。

《2021年“清洁低碳发电和新型电力系统”领域科技创新成果和问题难题汇编》展现了当前电力系统转型背景下电力行业重点领域的科技进展情况，提出了应对“双碳”目标所面临的若干挑战，旨在为推动我国电力行业高质量发展提供参考和启发。

2018年起，学会定期面向全行业广泛征集电力领域科技问题难题，已形成常态化工作机制。希望广大电力科技工作者持续关注学会的问题难题征集活动，踊跃投稿，共同促进我国电力行业发展和科技事业进步。📌

➤ 30 项科技成果：

- 1、千万千瓦级海上风电友好并网与消纳关键技术及装备
- 2、新能源发电并网认证关键技术及应用
- 3、农林废弃物类生物质循环流化床气化耦合燃煤发电技术研发及应用
- 4、1000MW 超超临界机组双机回热耦合发电技术
- 5、复杂工况下燃气轮机进气温度运行控制与集成优化关键技术及其应用
- 6、300Mvar 大容量全空冷新型调相机组
- 7、二次再热超超临界机组性能深度诊断关键技术研发及应用
- 8、高效钙钛矿太阳能电池制备技术开发

- 9、国 - 分 - 省 - 地协同的分布式光伏广域监测及分析评估关键技术研究及应用
- 10、海上风电一体化监控平台
- 11、海上风电场智慧运维关键技术研究及应用
- 12、国网新能源云关键技术研究与应用
- 13、大规模新能源送出直流短时扰动冲击运行控制关键技术及应用
- 14、应对高比例可再生能源强不确定性的电力系统规划和运行基础理论
- 15、超多电平柔性直流仿真的基础理论、关键试验技术及工程应用
- 16、基于数字孪生的新型电力系统稳定规定数字化和实时限额智能监视系统
- 17、人工智能驱动的电网态势感知与自主调度控制关键技术及应用
- 18、面向大规模复杂网络的电网图计算关键技术、支撑平台及示范应用
- 19、含高比例可再生能源的电力市场仿真模拟平台研发及应用
- 20、分布式可再生能源多路由高效集成与协调优化关键技术、设备及应用
- 21、高比例新能源电力系统与大型城市供热系统联合优化调控关键技术应用与示范
- 22、数字电网配用电大数据关键技术研究、装备研发及工程应用
- 23、基于数字孪生的高效综合能源系统关键技术及应用
- 24、面向电力物联网数字化感知的智能传感关键技术、装置及应用
- 25、电力系统源 - 网 - 荷全链碳计量方法及碳表系统
- 26、融合光伏发电、无人驾驶的电动汽车无线充电道路关键技术及应用
- 27、高压电力电子装备用毫秒级机械开关研制及应用
- 28、特高压高效输电变电装备用超低损耗取向硅钢开发与应用
- 29、特高压柔性直流输电核心装备
- 30、国产化高压直流换流阀模块检测装置研制及应用

10 项问题难题：

- 1、大规模新能源供电能力预测技术
- 2、主动支撑型新能源发电及组网运行技术
- 3、超临界 CO₂ 循环新型发电技术
- 4、提升现有煤电机组调峰潜力
- 5、大型可变速抽水蓄能机组
- 6、市场化环境下提升电力系统供需平衡能力的需求侧资源潜力评估与协调优化
- 7、新型电力系统碳排放一体化评估体系
- 8、服务新型电力系统构建的电力市场设计技术
- 9、基于人工智能的新型电力系统智能调控技术
- 10、面向新型电力系统的继电保护应对策略



目标下能源动力与发电技术领域研究新进展

本期策划组稿 《热力发电》编辑部

2020年9月22日，在第75届联合国大会期间，中国提出将提高国家自主贡献力度，采取更加有力的政策和措施，二氧化碳排放力争于2030年前达到峰值，努力争取2060年前实现碳中和。这意味着，我国在持续为减缓气候变化影响作贡献的基础上，按下了减碳的加速键。

当前，我国300 MW及以上等级煤电机组平均供电煤耗约为305 g/(kW·h)。按照2020年燃煤机组发电量为4.8万亿kW·h，则全年消耗标准煤约14.6亿t，CO₂排放约为42亿t。根据相关预测，到2030年，煤电CO₂排放约为40亿t，与目前水平接近，基本可实现行业碳达峰。但是，发电本质上是一个碳排放行业，而且排放量占比很大。发电行业的技术进步，尤其是低碳化技术的突破是实现我国“30·60碳达峰碳中和”目标的关键支撑。

火力发电，尤其是燃煤发电，是目前综合经济性最好、技术成熟度最高的发电形式。理论上讲，相对于核电、水电、风电等，火力发电受资源制约较小，布局更加灵活，装机容量可以根据实际需求决定。

煤电的发展，一方面取决于我国经济发展水平、资源禀赋、环境保护、碳减排等对电力行业的整体需求，另一方面取决于煤电的技术特点、技术成熟度、经济性等。因此，要深入研究煤电的发展趋势，获得“碳达峰、碳中和”背景下的煤电合理占比和结构，就必须从电力需求和发电技术发展两方面综合考量，需要考虑存量机组的节能降耗和新建机组的高效率。同时，煤电机组需要智能灵活，满足新能源电力的大规模接入。因此，应重点研究高效煤电技术、煤电机组灵活调峰技术和碳捕集及利用技术。

另一方面，为实现“碳达峰、碳中和”目标，我国风电、太阳能发电装机容量将不断增加，而可再生能源发电具有间歇性、波动性和随机性，导致电力系统的灵活调节能力面临更高的要求，电能质量面临更大的挑战。此外，负荷的多样性和随机性也造成了电力系统实时功率平衡难度的增加。而“两个一体化”（“风光水火储一体化”“源网荷储一体化”）对提高电力系统运行的灵活性、提高电能质量具有重要意义，储能由于其灵活调节作用将在“两个一体化”下得到更广泛的应用。

01 煤电的低碳化技术

1.1 煤电的发展研究

1.1.1 煤电的特点和定位

经过近几十年的发展,燃煤发电污染物排放得到有效控制。截至2020年底,我国煤电机组几乎全部达到超低排放水平。但是,火力发电机组在碳排放方面劣势明显。目前,我国燃煤机组单位发电量碳排放(CO_2)高达 $879\text{ g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$,即使最先进的煤电机组单位发电量碳排放也达到 $756\text{ g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$,远高于实现碳中和所需的近零排放标准(单位发电量碳排放量低于 $100\text{ g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$),所以燃煤发电是我国电力行业减碳的主要领域。

新中国成立70年以来,我国电力工业快速发展,实现了从小到大、从弱到强、从追赶到引领的巨大飞跃,为我国经济社会发展作出了突出贡献。在此背景下,煤电快速发展,在国家持续投入和支持下,煤电技术取得了长足进步,单机容量、机组参数、机组数量、能效指标均跃居世界前列。长期以来,燃煤发电呈现出占比高、体量大的特点,实际承担我国主力电源和基础电源的角色。

近年来我国对能源利用多元化、清洁化、低碳化的需求日益迫切,尤其是习近平总书记提出“30·60碳达峰碳中和”的目标后,能源行业尤其是电力行业的转型势在必行。未来燃煤发电必将担负新的历史使命。

首先,新能源电力波动大、间歇性强,在大规模、低成本储能技术成熟应用之前,适当比例的燃煤发电可为电力系统的稳定运行提供足够的转动惯量,平抑大比例新能源发电并网带来的波动,保障电网系统的安全。电力系统需要火力发电尤其是燃煤发电充分发挥“兜底保障”的重要作用。

其次,煤电要积极转变角色,由传统提供电力、电量的主体性电源,向提供可靠电力、调峰调频能力的基础性电源转变,积极参与调峰、调频、调压、备用等辅助服务,提升电力系统对新能源发电的消纳能力,将更多的电量市场让给低碳电力。

最后,热电联产的燃煤发电机组是满足我国居民采暖需求的重要保障。尽管目前热电联产机组已占火电机组比重的41%,仍不能满足我国日益增长的热力需求。低成本的燃煤发电是全社会低成本用电、用热的基础,是我国保障民生和社会经济活动用能的重要支撑,对促进经济社会发展、提升人民幸福感具有重要意义。

1.1.2 煤电在总装机中的合理占比

我国煤电投资规模逐年下降,“十一五”时期的平均煤电年新增装机规模是6862万kW,到“十三五”期间已降至3538万kW。煤电新增装机容量规模在2016年被新能源超越,2020年新能源发电年新增装机是煤电的近3倍,煤电装机容量比重历史性降至50%以下。随着“双碳”目标的提出,煤电装机比例进一步降低的趋势不可逆转。

但是合理的电源结构和发电量组成,要取决于各类发电机组的技术发展水平和经济性,同时也要与经济发展水平、资源禀赋、环保要求等整体需求相适应。

根据我国经济发展和全社会用电需求的预测,2030年全国电源总装机约28.74亿kW,全年发电总量约8.94万亿 $\text{kW}\cdot\text{h}$ 。根据碳达峰的需求,发电行业需在2025年前后率先达峰。发电行业2030年全年碳排放总量控制在38亿t左右,单位发电量碳排放降至 $425\text{ g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 。

在此条件下进行测算,2030年,燃煤发电装机12.13亿kW,占总装机的42.20%。燃煤发电的发电量4.85万亿 $\text{kW}\cdot\text{h}$,占总发电量的54.27%。燃煤发电的单位发电量碳排放降至 $750\text{ g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 左右。全年燃煤发电碳排放量约为36.3亿t,发电行业碳排放总量约为38亿t。

2060年,根据我国经济发展和全社会用电需求的预测,全国电源总装机约70.92亿kW,全年发电总量约16.5万亿 $\text{kW}\cdot\text{h}$ 。单纯考虑碳中和的需求,发电行业需在2060年将单位发电量碳排放降至低于 $50\text{ g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 的水平,发电行业2060年全年碳排放总量控制在8亿~9亿t。但是,到2060年我国仍需维持7亿kW左右

的燃煤发电机组,以保障我国能源电力供应安全和调峰、供暖需求,发电行业 2060 年实际碳排放总量存在很大的不确定性。

可以预见,未来煤电的装机占比及发电量将主要受到碳减排目标、电力供应安全的双重约束。从碳减排目标出发,煤电应不断缩减规模;但从电力供应安全角度出发,则需要煤电在较长时期内继续承担兜底保障、应急备用、调峰调频、消纳新能源、乃至工业供热与采暖供热等作用。因此,煤电将在满足电力供应安全的前提下不断降低发电量,以实现更少的碳排放。而其装机和发电量下调的进度安排除应满足“30·60”目标要求外,还受到供电经济性、环保要求等影响,并与灵活性提升水平、高效技术发展成熟度、碳捕集成本、碳运输及封存的经济性和安全性等因素密切相关。

1.2 存量机组节能提效

1.2.1 煤电低碳化节能提效综合技术

影响我国大型煤电机组能耗特性的因素,既有运行负荷、燃料特性及环境温度等外部条件,也有机组本身的性能缺陷及运行管理水平等内部因素。为实现煤电机组全工况运行优化,需要对系统进行节能诊断,查清全工况下各热力设备的性能,获得热力系统的能耗特性。

节能诊断基于全面系统的能耗分析和诊断,针对机组所有的主、辅机系统,从设备选型、运行方式、存在问题等各个方面入手;结合煤质、环境边界条件、运行方式、运行参数等,对机组各项能耗指标进行详细的分析、核算,得出机组的能耗水平及节能潜力;并在此基础上,为发电企业指明节能改造方向,采用针对性强的综合节能提效技术降低机组煤耗。

煤电低碳化节能提效综合改造技术是将煤电机组看作一个整体,在燃煤发电系统中采取技术上可行、经济上合理以及环境和社会可以承受的技术措施,以强化传热传质、热量梯级利用、能量合理利用、辅机提效及调速改造以及其他优化运行手段为技术导向对煤电机组进行整体节能提效改造。

目前,成熟的节能技术如图 1 所示。可以针对具体的电厂,因地制宜,一厂一策,采用不同的技术组合,达到技术经济性最好的效果。



图1 火电机组一体化节能技术体系

1.2.2 机组延寿综合提效技术

煤电机组提升参数延寿技术是提高煤电机组整体能耗水平、节能减碳的重要手段。

我国“十四五”期间达设计期限的 20 万 kW 及以上煤电机组有 87 台,合计容量约 0.26 亿 kW。未来 10 年(2021—2030)我国有 252 台容量 20 万 kW 及以上煤电机组陆续达到设计期限,总容量约为 0.82 亿 kW,约占目前煤电总容量(按 2020 年底 10.8 亿 kW 计)的 7.6%。其中亚临界 300 MW 及以上机组 205 台,占 10 年内设计期满机组容量的 88%。

根据国外煤电机组的运行经验,全球范围内煤电机组平均服役 30 年以上的超过 24%。日本近 50% 的煤电机组服役年限为 30~39 年,25% 的煤电机组服役年限超过 40 年。美国煤电机组的平均使用年限为 42 年,有 11% 的机组运行年限超过 60 年。我国煤电机组构成中,300 MW 等级亚临界机组服役年限在 20 年以内的占比达到 82.8%。

对于达到设计使用寿命的机组,通过机组延寿改造并同步实施提升参数改造可大幅提升机组的经济性。

针对亚临界机组,仅提升蒸汽温度,而主蒸汽压力基本保持不变,既可以降低机组煤耗水平、又可以有效减少改造工程量。蒸汽参数提升的幅度与方案的难易程度和投资规模成比例。

1.3 高效燃煤发电技术

1.3.1 超高参数超超临界燃煤发电技术

超高参数超超临界燃煤发电是指将燃煤发电机组参数从现在的 600 ℃等级进一步提升至 650 ℃等级乃至

700℃等级,从而达到提升发电效率的目的。

过去的几十年里,煤电机组一直都在向大容量、高参数发展。目前,全世界煤电机组的蒸汽参数稳定在600℃等级,部分机组提高到620℃。机组容量基本上以600 MW和1000 MW为主。目前,中国已投产600 MW等级超临界和超超临界机组已超过600台,已投产超超临界1000 MW机组达到137台。2016年,成功投运了最先进的1000 MW等级600℃/620℃/620℃超超临界二次再热机组,净效率已达47%。在国家持续投入和支持下,煤炭的先进清洁高效发电技术取得了显著进步,机组参数、数量、能效指标均跃居世界首位。

在700℃发电技术领域,尤其是高温镍基合金材料方面,国外已经开发出了几种适用于700℃机组的镍基合金材料,完成了700℃电厂的概念设计,基本为700℃机组的建设做好了技术储备。我国700℃发电技术的研究也紧跟世界步伐。相关科研单位筛选和开发了一批高温合金材料,在华能南京电厂建成了700℃部件验证平台,完成了25 000 h关键高温部件的验证,运行情况良好。同时也正在瑞金电厂二期开展试验性应用。另外,已开发了主蒸汽大管道、高中压转子合金,目前正在进行产业化试制和部件性能验证。

初步预计:2025年,实现650℃等级超超临界燃煤发电机组的工程示范,净效率不低于47%;2035年实现650℃等级超超临界燃煤发电机组的大规模商用;2035年实现700℃等级超超临界燃煤发电机组的工程示范,净效率不低于50%;2045年实现700℃等级超超临界燃煤发电机组的大规模商用。

在700℃超超临界蒸汽发电技术的基础上进一步提升温度参数,发电系统效率提升有限,即便温度到达800℃,净效率也很难突破55%,且随着温度的提升,高温合金材料的开发成本和制造成本均成倍增加,材料瓶颈问题突显。因此在实现700℃等级超超临界燃煤发电机组商用后,不建议向更高参数发展。

1.3.2 超临界CO₂循环高效燃煤发电

超临界CO₂循环高效燃煤发电技术是通过采用超临界CO₂代替水作为循环工质,采用布雷顿循环代替朗肯循环作为动力循环的一种新型燃煤发电技术。在600℃

等级,超临界CO₂循环燃煤发电机组供电效率可比传统水循环发电机组提高3%~5%;700℃等级,超临界CO₂循环燃煤发电机组供电效率可比传统水循环发电机组提高5%~8%。

2004年,美国能源部(DOE)开始超临界CO₂循环发电技术的研发,目标是为核电站、太阳能光热发电、余热利用等研发下一代动力设备。2011年美国能源部开始实施“Sunshot”计划,旨在将超临界CO₂布雷顿循环系统付诸商业化。该研发项目主要进行10 MW超临界CO₂发电机组研发和测试,实验测试在美国Sandia国家实验室下属的核能系统实验室(NESL)进行。2014年起美国能源部实施了化石燃料超临界CO₂循环发电研究计划,其目标是使超临界CO₂闭式循环比高参数水工质朗肯循环效率高5%以上。

2005—2011年,美国Sandia国家实验室在美国能源部的资助下,首先搭建了热功率1.0 MW的超临界CO₂布雷顿循环实验回路装置,设计压力为15.2 MPa,温度为538℃,电功率为125 kW。

欧洲和日本也在加紧研究超临界CO₂循环。法国电力公司(EDF)开展了燃煤闭式超临界CO₂循环研究,东京工业大学、俄罗斯科学院、比利时列日大学开展了半闭式超临界CO₂循环研究等。总体上看,对于煤基超临界CO₂循环的研究,国外仍处于起步阶段。

我国在该领域的研究与国外的研究基本同步。西安热工研究院有限公司(西安热工院)、中国科学院、中国核动力研究院、清华大学、西安交通大学等单位相继开展了超临界CO₂循环的相关研究。国家科技部相继支持了“超临界CO₂太阳能热发电关键基础问题研究”“超高参数高效CO₂燃煤发电基础理论与关键技术研究”“兆瓦级高效紧凑新型海洋核动力装置基础理论与关键技术研究”等重点研发计划项目。经过不懈的努力,国内在超临界CO₂循环构建、超临界CO₂流动传热机理等方向上的部分成果达到了国际先进水平。

西安热工院的5 MW超临界CO₂循环发电验证平台(图2),已于2020年12月建设完成。该平台最高压力为21.5 MPa,最高温度为600℃,最大流量为306 t/h,是目前世界上容量最大、参数最高的超临界CO₂循环验

证平台。该平台的建成投运将极大地推动新型高效发电技术的发展和工程应用。

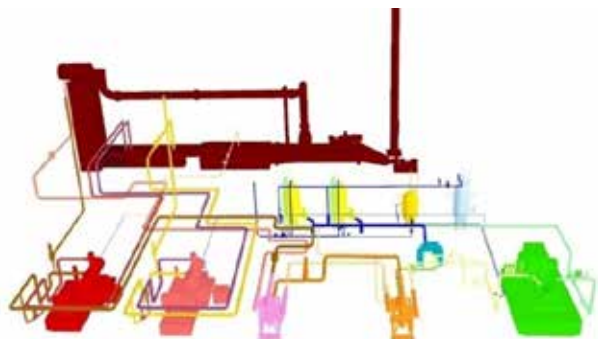


图2 5 MW超临界CO₂循环发电验证平台

目前,随着5 MW 超临界 CO₂ 发电平台的投运,关键技术和关键设备逐步得到验证和完善,该技术工程应用研究已经全面展开。西安热工院和相关单位正在进行50 MW 超临界 CO₂ 光热发电可行性研究和初步设计,预计在2030年左右实现300 MW 超临界 CO₂ 煤电机组工程示范,净效率不低于50%;2040年实现700℃等级大型超临界 CO₂ 燃煤发电机组的工程示范,净效率不低于55%。

1.4 煤电机组灵活性技术

为了解决新能源消纳的问题,煤电运行需要更加灵活,调峰能力更加突出可靠。煤电机组调峰技术需要重点研究或突破的地方主要包括两方面:一是调峰的深度,二是调峰的速度。火电正由传统的提供电力、电量的主体电源,逐步转变为提供电力、电量的同时,向电力系统提供可靠容量、调峰调频等辅助服务的基础性、调节性电源。

随着新能源比例的增加,电网对于瞬间大幅甩负荷的响应能力要大幅提升,迫切需要从技术上提高煤电负荷快速升降的能力。

1.4.1 锅炉深度调峰技术

根据炉型、煤质、燃烧设备的不同,目前国内大部分燃煤锅炉低负荷稳燃能力在40%~50%额定负荷,通过改造下探至20%~30%额定负荷。

锅炉深度调峰主要面临低负荷稳燃和环保达标2个问题。

提高锅炉低负荷稳燃能力的主要技术措施有:锅炉精细化运行调整,基于强化燃烧的锅炉燃烧器改造,锅炉制粉系统改造,掺烧高挥发分煤质改造,以及等离子体、微油、富氧等助燃改造等。

目前,绝大部分煤电机组脱硝装置的工作温度为300~420℃。当机组深度调峰时,随着锅炉负荷的降低,脱硝装置入口烟温将降至300℃以下。为避免脱硝催化剂失去活性,脱硝装置需要退出运行,导致氮氧化物排放超标,机组调峰中止。因此,针对深度调峰期间,脱硝装置无法投入的机组,需要进行提高脱硝装置入口烟温改造。主要的低负荷选择性催化还原(SCR)脱硝入口烟温提升技术有省煤器烟气旁路、省煤器水侧旁路、省煤器分级布置、回热抽汽补充给水、热水再循环等技术。

上述技术措施都是常规手段,需要针对不同的机组采用不同的组合。

1.4.2 控制系统调峰适应性技术

我国火电机组在50%额定负荷以下普遍以启停机过程控制为主,分散控制系统(DCS)控制逻辑未能在50%额定负荷以下进行连续运行甚至响应调峰调频的调试。

火电机组深度调峰运行负荷范围一般目标为30%~100%额定负荷。这不仅是简单的运行负荷范围变宽,从自动调节和控制角度,汽动给水泵、变频泵、调节阀等大量对象的非线性特性随工况范围的变宽而变得不可忽视。很多控制回路匹配30%~100%额定负荷范围工况变得异常困难,导致机组常常表现在某些工况下自动控制运行的异常,给进一步提高变负荷速率指标给机组的安全稳定运行带来极大的挑战。

机组深度调峰运行时,大量设备接近极限工况运行,辅机跳闸、主燃料跳闸等保护和切除自动等功能回路如有误动或切手动都极易威胁整个系统的安全稳定运行。若要实现更进一步深度调峰,需要针对锅炉燃烧进行控制优化,修改逻辑(图3)。

目前,已经可以实现工程应用的是高温熔盐储热耦合火电机组调峰技术,其系统结构如图6所示。

在机组参与电网调峰需要降低出力时,保持锅炉负荷不变,通过抽取部分主蒸汽和再热蒸汽进入储热模块,换热后根据参数匹配返回机组的相应热力系统接口,实现机组出力降低的同时将部分热量存储于储热模块;在机组参与电网调峰需要增加出力时,仍然保持锅炉负荷不变,根据参数匹配从机组的相应热力系统接口抽出部分蒸汽或给水进入储热模块,换热后根据参数与相应的热力系统接口蒸汽或给水混合,返回机组,实现机组出力的升高。

在机组要求低负荷运行时,锅炉燃烧量不变,汽轮机负荷降低,利用储热介质将高品位能量储存,负荷变化不受锅炉最低稳燃负荷影响,增加机组调峰负荷范围和灵活性,可以实现深度调峰的需求,调峰深度降低至18%额定负荷。

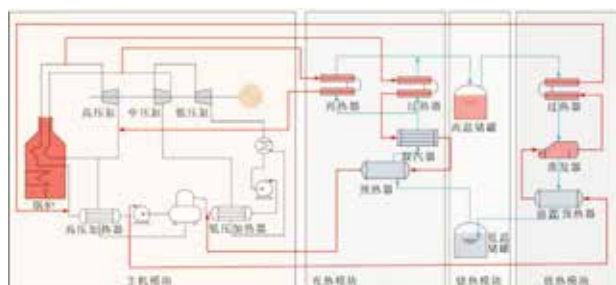


图6 高温熔盐储热耦合火电机组调峰技术

在机组要求高负荷运行时,锅炉燃烧量不变,利用储热介质放热提升汽轮机负荷,提高能量利用效率。汽轮机组不做其他改造情况下可实现机组峰值时间段内持续扩容5%。

1.5 煤电机组调峰政策建议

2020年煤电发电量约4.8万亿kW·h,占全社会总发电量的65%,年利用小时为4400h,负荷率约为50%。若负荷率降至30%,年利用小时将为2600h,年发电量将减少至2.8万亿kW·h,可为新能源上网腾出空间,且保持煤电的调峰备用功能。

煤电调峰备用后,整个行业的燃煤量减少约为53400万t/a,合计减排CO₂15.3亿t/a。建议用减排量弥

补费用缺口,对腾出上网空间的调峰备用煤电机组,进行碳交易补偿。对于在极端情况下,能及时满足电力系统特殊要求的机组,给予特殊的资金奖励,以保证煤电机组调峰备用功能不被荒废,确保整个电力系统的稳定。

02 碳捕集及应用技术

碳捕集、利用与封存(carbon capture, utilization and storage, CCUS)在我国的发展从2000年后正式启程,被认为是解决我国以煤为主能源体系低碳化发展的重要战略性技术之一。经过近20年的发展,我国已初步形成了CCUS发展的技术体系。碳中和目标的提出给CCUS这一重大技术的发展提供了新的动力,同时也提出了新的要求,如何在新的目标下发展CCUS成为当下业界热议的话题和研究方向。

2.1 碳中和目标下CCUS发展的新形势与需求

2.1.1 碳中和目标的提出明确了CCUS在未来气候经济下的关键作用

2060碳中和目标的提出将引领中国进入气候经济时代。碳中和目标不仅意味着40年后我国将实现CO₂的零排放,同时也意味着这40年间我国需要在经济产业、能源消费、基础设施等领域全方位作出改革和调整,构建一个清洁绿色的高质量发展经济体。例如在电力生产方面,目前仍然以化石燃料为主,燃煤电厂比例超过70%,转型不仅需要强大决心和政策支持,还需要庞大的资金投入和先进的技术。

在我国提出碳中和目标之前,国际能源署(IEA)已经明确了CCUS技术对于实现全球气候目标的重要性。IEA在《能源技术展望报告2017》中指出,按照《巴黎协定》下各国的自主贡献减排目标(NDCs),到2060年碳排放不能高于90亿t,需要提高能源效率、规模化开发可再生能源、发展CCUS等各类技术共同实现减排目标。

CCUS可以捕集发电和工业过程中使用化石燃料所产生的多达90%的CO₂,防止CO₂进入大气,而当前尚无其他成熟技术可以达到如此之高的脱碳水平。IEA

的研究结果表明,要达到巴黎 2℃的气候目标,到 2060 年,累计减排量的 14% 来自于 CCUS,且任何额外减排量的 37% 也来自于 CCUS。IPCC 等许多其他国际机构也证实没有 CCUS 就无法实现国际气候变化目标。

IPCC 于 2018 年发布的《全球升温 1.5℃特别报告》指出,不使用或者使用有限对冲项目的 1.5℃路径模型,都需要在本世纪内利用碳清除技术去除 1000 亿~10 000 亿 t 二氧化碳。

报告指出 CCUS 是未来应该气候变化、实现巴黎协定目标的重要减排技术,推荐对包括 CCUS 在内的一系列的技术进行投资,建议未来大力部署 CCUS。

因此,作为当前仍旧以煤炭为主要消费能源的世界第一碳排放国家,我国在未来实现碳达峰和碳中和目标的进程中,CCUS 至关重要,不可或缺。

2.1.2 CCUS 能够帮助我国构建兼具韧性和弹性的能源系统

未来气候经济下的能源系统需要满足高效稳定、绿色低碳和灵活便捷的需求,这就使得能源系统具备多元化和低碳化的特征。一个能够保障能源安全和气候安全的能源系统在中国迈向气候经济的发展阶段尤为重要。韧性的能源系统能够提供可持续的稳定能源供应,保证中国在未来经济发展过程中的能源安全。弹性的能源系统则能够满足不同地区和资源禀赋对于低碳能源的需求,保障中国高质量发展中的气候效益。

CCUS 技术是中国能源系统韧性和弹性化进程中不可或缺的关键技术之一。无论是韧性还是弹性,多元化和低碳化的能源供应结构都需要传统化石能源在逐步减少的进程中实现低碳化。作为长期主导我国能源领域的煤炭,还有多个工业领域不可替代的油气资源,其脱碳过程都需要 CCUS 技术的配合才能够实现。

化石能源燃烧占我国 CO₂ 排放量的 80% 以上,其中煤炭占 75%。从煤基工业和燃煤发电行业中减排 CO₂ 是当前我国减排的关键,而 CCUS 是目前唯一能够实现这种减排的技术手段。

此外,CO₂ 利用技术在减排的同时可以形成具有可观经济社会效益的新业态,促进发展并增加就业,尤其适用于我国所处的发展阶段。

另外,CCUS 在一定程度上可以弥补传统减排手段可能存在的诸多局限,如提高能效的潜力有限、可再生能源发电不稳定、天然气供应不足等会限制其减排潜力。

2.2 我国 CCUS 发展现状与挑战

2.2.1 我国积极推进 CCUS 的研究和发展

中国高度重视 CCUS 发展,在多项相关政策规划考虑和推动 CCUS 技术的发展。

2006 年以来,国家发展和改革委员会、科学技术部、财政部、外交部、工业和信息化部、国土资源部等多达 16 个国家部委先后参与制定并发布了 10 多项国家政策和发展规划,如《中国应对气候变化国家方案》《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020 年)》《中国应对气候变化科技专项行动》《工业领域应对气候变化行动方案(2012—2020 年)》等,都提出了鼓励和支持发展 CCUS。

我国研发与示范项目进展迅速。2006 年以来,CCUS 被列为中国中长期技术发展规划的前沿技术,CCUS 开始受到国家科研资金的大力支持。2006 年至今,中国政府给予 CCUS 的研发资金支持从未中断;支持资金面向自由探索、基础研究、技术开发和工程示范多个阶段;覆盖包括捕集、运输、利用和封存全流程技术链条;形成了比较广泛和稳定的 CCUS 研究队伍。

积极研究 CCUS 发展路线图。2015 年,在亚洲开发银行的支持下,国家发展和改革委员会气候变化司制定了中国 CCUS 示范和部署路线图,并进一步强调中国政府重视 CCUS 系统在履行国家气候变化承诺方面的贡献。

2011 年科技部社会发展科技司和中国 21 世纪议程管理中心发布《中国碳捕集、利用与封存(CCUS)技术发展路线图研究》,明确了中国发展 CCUS 的愿景:为应对气候变化提供技术可行和经济可承受的技术选择。针对捕集、运输、利用、封存以及全系统分别提出了开展研发和示范的规模、技术和成本等阶段性目标。2019 年科技部更新了 CCUS 技术发展路线图,总体愿景是构建低成本、低能耗、安全可靠的 CCUS 技术体系和产业集群,为化石能源低碳化利用提供技术选择,为应对气候变化提供技术保障,为经济社会可持续发展

提供技术支撑。

2.2.2 CCUS 发展面临资金、技术、法律和政策等挑战

首先, CCUS 产业发展需要长期和庞大的资金投入, 而当前产业融资风险依旧偏高, 以政府扶持为主。

CCUS 产业是一个复杂的过程, 涉及 CO₂ 的捕获、运输、封存、利用四个环节, 涵盖电力、石油、运输、煤炭、化工、钢铁、食品等众多行业, 具有较长的产业链, 对资金的需求量大, 资金交叉普遍, 资金关联度高, 融资关系复杂, 且资金使用期限较长。

同时, 碳捕集、运输和封存阶段所需高昂的投资成本, 在气候效益没有实现内部化之前, 企业对其能否获取利润产生担心, 造成企业投资的动力不足, 甚至不愿投资。目前, 我国 CCUS 项目资金主要源于国家科技计划、央企自筹款、国际合作项目资金, 存在资金来源少、总量小、渠道窄的现象。

其次, 技术选择的不确定性和法律法规缺失是 CCUS 进一步发展的重要阻碍。

CCUS 技术是捕集、利用、运输与封存等与之相关的各项技术高度集成, 需要有序、平衡地推进各环节发展。在捕集环节的额外能耗不可避免的情况下, 封存环节的地质勘察是 CCUS 技术发展最大的不确定性。中国地质条件复杂, 地质勘探工作较为薄弱, 对 CO₂ 地质封存的信息支持不够, 企业也无法对地层结构、储存潜力、封存风险和检测方案等问题做全面评估, 增加了企业经营风险。

CCUS 的有序发展需要制定一系列法律法规来明确各参与方的职责, 提出对 CCUS 项目的审核和监测方案, 确定灾害发生时的应急措施后续处理方式, 法律法规的真空对企业意味着财务上、声誉上的多重风险, 直接阻碍了企业参与 CCUS 项目的积极性。

再次, 缺乏市场化的激励机制和商业模式, CO₂ 没有形成稳定的市场化去除或封存需求。

考虑到 CCUS 高昂的成本以及技术的不确定性, 企业往往不愿意独自承担投入 CCUS 研发和示范的风险。由于投融资机制在很大程度上与政策设计直接相关, 所以缺少有效的政策激励成为企业开展 CCUS 研究和示范项目的重要障碍。

我国没有形成规模化的 CO₂ 需求, 商业化发展的基础较弱。CCUS 当前在国际上的主要发展方式分为政策驱动和市场驱动, 分别以欧洲和北美作为代表。现在阶段看来, 由 EOR 引领的市场驱动发展模式更加具有可持续性。EOR 长时间的发展积累已经促使北美形成较为成熟的 CO₂ 需求市场, CO₂ 捕集方例如燃煤电厂, 相对石油公司等 CO₂ 需求方, 具备一定的议价能力。例如加拿大的边界坝项目, 其从燃煤电厂捕集 CO₂ 后直接出售给有 EOR 需求的石油企业。EOR 在国内的开展起步较晚, 还没有形成稳定的 CO₂ 需求, 买方和卖方数量有限, 根本上削弱了 CCUS 商业化发展的可能性。另一方面, CCUS 产业链上几乎囊括了能源生产和消费的各个环节, 甚至还关系到化工生产, 随之而来的就是庞杂的利益链条之上的多个企业间的合作问题。在现有的市场环境和政策框架下, 煤炭、石油、电力、化工等企业之间存在明显的利益分配问题, 如果不能合理解决该问题, 将极大的阻碍企业参与的积极性, 而环环相扣的产业链上的任何一个环节企业的消极对待, 都将直接影响 CCUS 的发展进程。

最后, CCUS 项目缺乏明确的产业政策支持, 在低碳技术竞争中被看作是“预备役”。由于缺乏明确的政策支撑等以上障碍和空白, 企业部署 CCUS 设施面临较高的成本和风险, 流入资金的匮乏又反过来拖后了 CCUS 项目部署的进度和技术的发展。碳中和目标提出之后, 国内顺应国际社会应对气候变化而禁煤的呼声和趋势渐长, 国内控煤措施趋紧, 对于电力和工业部门提出大力发展可再生能源以替代煤炭的目标, 进而认为 CCUS 技术可以发挥的空间也将随着煤炭的逐步替代而减少。这种观点将 CCUS 技术看作众多低碳减排手段中的“预备役”, 忽视了能源结构调整过程中的煤炭也将释放大量 CO₂ 所可能产生的累计排放也需要 CCUS 技术予以捕集。

2.3 近期 CCUS 发展的几个任务

2.3.1 构建面向碳中和目标的 CCUS 技术体系

过去我们定义 CCUS 技术往往因为减排目标难以定量, 大多从科学角度进行分类, 而且分类的角度也比较多元化, 有的从碳循环的角度进行分类, 有的从减排的

效果进行分类,如负排放技术,还有部分的将 CCUS 与地球工程合并讨论。

CCUS 技术在不同领域的结合会产生出新的技术组合,主要是在捕集端有所不同,捕集之后在运输、利用和封存等环节上则基本一致,那么可以从捕集的 CO₂ 源来进行分类。

一是对化石能源燃烧过程产生的 CO₂ 排放作为捕集的碳源,面向人类活动特别是能源活动产生的 CO₂ 排放,可称之为化石能源与碳捕获和储存 (fossil energy with carbon capture and storage, FECCS)。

二是对生物质能源使用产生的 CO₂ 排放作为捕集的碳源,对这个碳源的捕集开始介入自然界的碳循环过程,即生物质吸收的大气中的 CO₂,开始具有负排放的特征,此即已经所熟知的生物能源与碳捕获和储存 (biomass energy and carbon capture and storage, BECCS)。

三是直接将大气作为捕集的碳源,是典型的负排放技术,可称之为直接空气碳捕获和储存 (direct air carbon capture and storage, DACCS)。

对 CCUS 技术体系讨论的意义主要在于以下两个方面:

一方面,完整的面向碳中和的 CCUS 技术体系的勾勒和构建对后续整个 CCUS 的发展非常重要,有助于形成系统化的能更好支撑碳中和目标实现的体系。

另一方面,当前不仅要讨论实现碳中和目标时 CCUS 要发挥的作用,更重要的,还需要考虑从当前迈向碳中和目标过程中 CCUS 的发展路径,这对于当下来说至关重要。

2.3.2 明晰面向碳中和目标的 CCUS 发展路径

2060 碳中和目标提出后,CCUS 发展需要迫切解决的问题就是发展路径。一方面,由于 CCUS 技术链条比较长,应用的领域范围比较宽,技术路径应如何配置;另一方面,既要紧密结合碳中和目标下我国煤炭、电力、工业等领域能源结构的变化,可能还需要考虑非二氧化碳温室气体排放中和的问题。

需要明确的一些问题包括:

1) 碳中和目标要求实现高比例的可再生能源配置,随着煤炭比例的下降,CCUS 在煤炭领域和工业难减排

领域哪个应是重点。

2) 我国当前还有较多煤电等高碳基础设施尚在服役生命周期,虽然在 2050、2060 年绝大部分将被可再生电力替代,但其生命周期中的碳排放要不要解决。

3) CCUS 对于我国构建安全低碳的能源体系可以应该发挥什么作用。

4) CCUS 的近零排放作用和负排放作用的发挥在时间空间上如何配置。

5) 封存技术当前尚没有得到特别的重视,尤其是其作为重要的基础设施对未来排放源的空间布置可能会产生重要影响。

6) 另外,一些技术方向可能也需要调整方向,比如对于二氧化碳强化驱油,过去在油价较高的时期会有一些的收益,也被视为推动 CCUS 起飞的重要着力点,随着高油价时代一去不复返,未来二氧化碳驱油的技术目标也应该由经济效益为主,转向低碳生态效益为主。

以上这些关于发展路径探讨的问题,还需要综合性的 CCUS 发展战略和路径予以探讨明晰。

2.3.3 完善 CCUS 发展支撑环境

1) 支持政策。一是近中期应细化 CCUS 的支持政策体系,碳中和目标的提出已经明确了 CCUS 未来的作用和定位,接下来需要在相关的支持政策中明确和细化如何为 CCUS 发展提供稳定的政策支持,特别是找准政策发力点。二是加速推动 CCUS 投融资以加速 CCUS 商业化步伐,将 CCUS 纳入产业和技术发展目录,打通金融融资渠道,提供优先授信和优惠贷款,探索碳市场机制支持 CCUS 发展的政策等。三是稳定持续的科技创新政策支持,特别是先进技术的研发示范和具备负排放效益的 CCUS 技术。

2) 商业模式。过去对 CCUS 商业模式的讨论,一般局限在 CCUS 项目链条内部,主要考虑如何通过一体化降低交易成本,如何通过利用技术产生的效益完善整体的技术经济效益等。未来 CCUS 商业模式的探讨应该予以扩展,一方面,综合考虑多捕集源与管网和封存基础设施的集群模式,不仅可以解决 CO₂ 的捕集和封存在数量上不匹配造成的技术问题,而且可以发挥规模效应,有效降低成本;另一方面,商业模式的探讨应考虑与其

他能源系统的结合以及引入气候投融资,通过引入公共资金和社会资本共同推动 CCUS 发展。

3) 标准规范。CCUS 项目实施目前缺乏行政审批与监管体系,企业在上马新项目时推进比较困难,同时,没有统一的规范与标准。针对 CO₂ 运输与储存等相关标准和规范若套用已有的有关规范标准,会由于管理标准对于 CO₂ 管理来讲较为严苛,增加商业化成本,因此需要创建或更新相关标准规范以支撑 CCUS 的快速发展。

2.3.4 培育 CCUS 新技术经济范式

沙特作为 2020 年 G20 主席国,在今年的 G20 能源可持续性议题上联合国际能源署、国际可再生能源署、全球碳捕集与封存研究院等有关国际组织出台了循环碳经济(circular carbon economy)的指导文件,提出了通过减量(reduce)、再利用(reuse)、再循环(recycle)和去除(remove)为主的 4R 模式构建低碳可持续的能源系统,其中 CCUS 在诸多能源系统中都将发挥重要的减排去碳的作用。在当前很多国家都提出了碳中和目标后,CCUS 与相关能源系统的结合成为关注的热点之一,有可能培育出 CCUS 发展的新技术经济范式。

首先,集成 CCUS 技术与氢能生产技术系统。氢作为零污染的高校能源与工业原料,在未来有良好的发展趋势。化石能源制氢技术不仅能将高碳能源转化为零排放的氢能,还可以在转化过程中集成低功能耗、低成本的 CCUS 技术,实现燃料源头节能减排。阐述 CCUS 技术在氢能生产、运输与利用环节的集成潜力与减排效益,探索氢能技术与 CCUS 技术结合的新技术系统。

同时,探索 CCUS 与可再生能源和储能系统集成可行性与发展潜力。未来多元供能体系的稳定性与持续性要求对储能与多能互补技术提出要求,探索我国可再生能源+CCUS,储能+CCUS 的集成技术新方向,构建低碳多元功能体系。

2.3.5 开展大规模 CCUS 示范

我国已经开展的 CCUS 示范工程规模较小,一般在

万吨到十万吨级,面对未来碳中和目标需要百万吨甚至千万吨级的规模,亟需开展大规模的 CCUS 示范工程。

虽然通过当前十万吨级 CCUS 设备并联可以实现规模化,例如 10 个十万吨级的设备并联可以形成百万吨级的效果,但这种并联应用的经济性较差,会加大 CCUS 成本,降低 CCUS 在低碳技术中的竞争力,对其商业化发展形成经济阻碍。

当前的技术水平与设备规模可满足百万吨级的需求,但是技术参数与经济参数上需要进一步突破。规模放大后可能还会面临 CO₂ 捕集率低、CO₂ 大规模多级压缩,相带分布与区域构造对 CO₂ 迁移的控制作用等技术难题。同时,百万吨级项目的风险并非是非是十万吨级项目的简单扩大,需要制定适应于百万吨级项目的对应监测和风险评估方法,开发适宜于百万吨级 CCUS 项目的风险管控技术及性能评估与优化方法等。

特别地,应该启动考虑在利用封存条件好,同时又有较多排放源的区域,首先开展 CCUS 集群建设,通过管网和封存基础设施的复用共用,降低成本、提升规模效应。

2.4 小 结

1) 我国碳中和目标的提出为 CCUS 发展提供了根本的指引,未来 CCUS 在我国低碳发展战略中的定位基本明确。

3) 当前,对碳中和目标下我国能源和经济系统应如何发展的研究尚在起步阶段,还需要进一步深入的研究来明确我国实现碳中和目标的路线图。

3) 对于 CCUS 的发展也是一样,我们需要在全新的目标下,在新的起点上进一步加快 CCUS 技术的发展,研究明确未来 CCUS 发展的战略和路径。

4) 本文仅是对碳中和目标下 CCUS 发展部分问题的初步考虑,下一步需要跟学术界、企业界和政府部门不断研讨交流,共同推动我国 CCUS 的发展,为碳达峰和碳中和目标作贡献。

03 新能源及储能发展

国家发展改革委、国家能源局在2020年8月发布的《关于开展“风光水火储一体化”“源网荷储一体化”的指导意见（征求意见稿）》中，强调统筹协调各类电源开发、适度配置储能设施、充分发挥负荷侧调节能力等，以提升电力系统综合效率，促进能源转型。储能对电能应用具有时序调节作用，能够提高电能质量，促进能源转型，在“两个一体化”下，储能的灵活调节作用将得到更高水平的发挥，储能有望迎来更广阔的发展空间。2020年12月召开的2021年全国能源工作会议提到，要大力提升新能源消纳和储存能力，加快推进“两个一体化”发展。之后，国家发展改革委、国家能源局发布了《关于推进电力源网荷储一体化和多能互补发展的指导意见》，进一步探索源网荷储一体化和多能互补的实施路径，再次提到适度配置储能设施，可以看出国家重视储能对提高电力系统建设运行效益的支撑作用，这有利于促进储能的发展进程。

近年来，电力系统综合效率仍然具有提高空间，源—网—荷等环节协调有待进一步加强，各类电源互补互济有待进一步完善。为实现“碳达峰、碳中和”的目标，我国风电、太阳能发电装机容量将不断增加，而可再生能源发电具有间歇性、波动性和随机性，导致电力系统的灵活调节能力面临更高的要求，电能质量面临更大的挑战。此外，负荷的多样性和随机性也造成了电力系统实时功率平衡难度的增加。而“两个一体化”对提高电力系统运行的灵活性、提高电能质量具有重要意义，储能由于其灵活调节作用将在“两个一体化”下得到更广泛的应用。

随着我国能源转型的不断深入，新能源具有广阔的发展空间。2021年3月召开的中央财经委员会第九次会议指出，构建以新能源为主体的新型电力系统。因此，本文主要梳理新能源领域相关政策以及“两个一体化”的建设规划概况，分析“两个一体化”下储能的灵活性以及经济性，在研究储能规划的同时，对储能应用也进行总结并给出相应的建议。

3.1 相关政策及建设规划

2020年（截至12月底），全国并网风电装机2.81亿kW，同比增长33.1%；全国光伏并网装机2.53亿kW，同比增长23.9%。具有间歇性、波动性和随机性的可再生能源大规模并网会给电力系统带来重大挑战，而储能技术的发展有利于解决上述问题，并在“两个一体化”中将发挥重要作用。

3.1.1 新能源领域相关政策

2020年（截至12月底），全国风电、光伏装机约5.34亿kW，相较2020年12月在气候雄心峰会上提到的到2030年风电、太阳能发电将达到12亿kW以上的总装机容量，还有6亿kW以上的装机差额。储能在缓解调峰压力、促进可再生能源消纳、可再生能源平滑输出等方面发挥着重要的作用。目前我国已有多个省份提出可再生能源配储能，部分省份可再生能源配备储能政策汇总见表1。表1中各省份均按10%左右或不低于10%配备储能设施。因此，假设从2021年开始测算，在每年风电、光伏装机为60GW的情况下，如果按10%的容量配置储能，大概每年需要新增6GW储能。由此可见，储能有望迎来广阔的发展空间。

表1 我国部分省份可再生能源配备储能政策汇总

时间	省份	政策文件	主要内容
2020.09	河北	《关于推进风电、光伏发电科学有序发展的实施方案（征求意见稿）》	支持风电、光伏发电项目按10%左右比例配套建设储能设施
2020.11	贵州	《关于上报2021年光伏发电项目计划的通知》	在送出消纳受限区域，计划项目需配备10%的储能设施
2021.03	陕西	《关于促进陕西省可再生能源高质量发展的意见（征求意见稿）》	2021年起，关中、陕北新增10万kW（含）以上集中式风电、光伏发电项目按照不低于装机容量10%配置储能设施
2021.03	海南	《关于开展2021年度海南省集中式光伏发电平价上网项目工作的通知》	每个申报项目规模不得超过10万kW，且同步配套建设设备规模10%的储能装置

3.1.2 建设规划概况

《国家能源局综合司关于做好可再生能源发展“十四五”规划编制工作有关事项的通知》中提到，结合储能提升可再生能源在区域能源供应中的比重。在各

可再生能源并网比例的增加,会导致电力系统不确定性增加,当存在不确定性因素使得系统电力供应大于需求或者需求大于供应时,电力系统的灵活性主要体现在系统可以减少或者增加出力,恢复供需平衡。在电力系统的电源侧、电网侧、负荷侧以及储能侧均有灵活性资源存在,其中储能可以应用于电源侧、电网侧和负荷侧。

随着储能技术的不断发展,储能应用场景逐渐多元,调节性能好、调节速度快、安装位置灵活的储能也是电力系统重要的灵活性来源,“风光水火储一体化”侧重于电源基地开发,充分发挥具有调节性能的水电站、火电机组以及储能设施的调节能力,来促进可再生能源消纳,减少弃风弃光、提高电力系统的灵活性。随着可再生能源装机规模不断增加,需求侧响应技术的不断发展,电力系统的运行环境更加复杂多变,在电力系统灵活调节能力面临更高要求的情况下,充分挖掘“源网荷储”的灵活性潜力,促进“源网荷储一体化”就显得尤为重要。储能在发、输、配、用环节均具有重要的作用,因此,在“源网荷储一体化”下,储能在电源侧、电网侧和负荷侧的协调发展以及应用应得到足够的重视。

总而言之,储能在“两个一体化”中均占据重要的地位,并且,储能技术在逐步完善,储能的成本也在逐渐下降。因此,“两个一体化”为储能的广泛应用提供了良好的机遇,促进了储能的发展。

3.2.2 储能经济性

储能的应用服务类型众多,如图 11 所示,不同服务类型使得储能具有不同盈利模式。发电侧储能需要搭配其他电源共同参与电力市场交易,储能与风电、光伏等新能源搭配,具有减少弃电量带来的收益以及平滑可再生能源出力带来的效益,而储能与火电、水电等常规能源搭配,可使得调频等辅助服务更加优质高效,“风光水火储一体化”因地制宜采取多能源品种发电互相补充,实现电源侧的优化。电网侧储能具有对电网调峰的显性收益以及缓解线路阻塞、延缓输配电扩容等隐性收益。用户侧储能具有峰谷价差套利以及减少容量电费成本等商业模式。“源网荷储一体化”通过协调优化源网荷储各方面主体,提高电力系统的运行效率,提高电能质量。经济性是影响储能发展的重要因素,研究“两个

一体化”下储能的经济性具有重要意义。

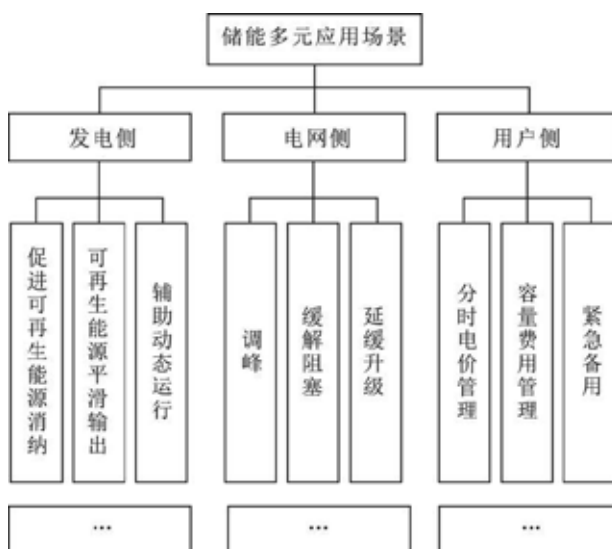


图11 储能多元应用场景

已有文献或者在源-储-荷经济指标中有关储能的收益仅考虑了储能电池延缓配电网未来升级改造的收益,未能考虑储能多种应用服务的收益;或者考虑了风/光/储微网中的储能装置及其变流器年等值成本,但是没有直接考虑储能的收益,储能的收益通过提升可再生能源的收益并降低上级电网购电成本和停电惩罚成本间接体现;或者在风光储多能互补系统中考虑了储能电池运行成本,但是也没有直接考虑储能的收益,而是通过储能参与后系统总成本降低来体现储能的经济效益;或者在源网荷储互动的直流配电网中运行成本考虑了储能成本,而储能的价值是通过总运行成本的降低以及光伏消纳率的提高来体现;或者在风光水火储多能系统中考虑储能系统运行电量收益、充放电成本建立收益模型、成本模型,没有综合考虑储能应用于多种服务的收益。

综上所述,对“两个一体化”的经济性研究中,对储能的经济性研究大多数没有直接考虑储能的收益,而是通过间接提升系统的经济效益来体现,或者有关储能的收益只考虑了很少几个方面,甚至是只考虑了某一方面的收益。

3.3 储能商业化进程

“风光水火储一体化”侧重于电源基地开发,因地

制宜采取多能源品种发电互相补充；而“源网荷储一体化”则侧重于围绕负荷需求展开，促使电网与电源、负荷协同发展。“两个一体化”包括不同的模式，如图 12 所示。

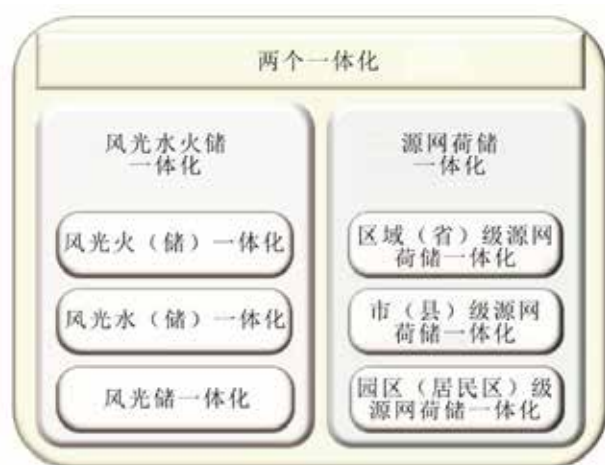


图12 “两个一体化”具体模式

“风光水火储一体化”主要包括“风光火（储）一体化”“风光水（储）一体化”“风光储一体化”等具体模式；而“源网荷储一体化”主要包括区域（省）级、市（县）级、园区（居民区）级“源网荷储一体化”等具体模式。“两个一体化”都需对储能进行合理配置，有利于解决电力系统的灵活性问题，有利于用能系统动态供需平衡，因此，迎来了市场机遇。多家企业进军“两个一体化”项目，配置一定比例的储能，促进了储能的商业化进程。

3.3.1 储能规划

虽然储能有利于促进能源转型，但是在传统的电力体制下储能的定位并不明确，储能为电力系统带来的收益体现在多个环节，在目前的电力体制下，储能系统无法获得其发挥的多种功能的补偿。并且，我国源网荷等环节的协调还有待进一步加强，国家电力投资集团有限公司（国电投）、中国华能集团有限公司（华能）、中国华电集团有限公司（华电）等大型发电集团基本只涉足发电领域，电网则覆盖输配电以及售电领域，电源侧和电网侧存在着一定界限，“源网荷储一体化”通过源网荷储各方面主体进行协调，储能的作用将得到更充分

的发挥。此外，国电投、华能、华电等大型发电集团的清洁能源装机规模不断增加，而储能是调节清洁能源并网波动性的重要手段。因此，“风光水火储一体化”可通过多能互补以及合理配置储能，促进清洁能源的进一步发展。

“两个一体化”能够促进储能的商业化进程，加快建立更加适合储能的商业模式。在“两个一体化”下，储能作为其中的一部分，对其进行统一规划，不仅对电力行业具有引导作用，也会促进储能产业进一步发展。其中，储能的配置对电力系统的灵活性、稳定性和经济性都具有重要的影响，因此对储能配置进行研究具有重要意义。已有文献或者在考虑碳交易的基础上，以区域电网的总成本最低为目标，提出区域电网风光储容量的最优配置比例；或者考虑风-光-储的收入及成本计算收益，以风-光-储各投资商的收益最优为目标进行容量优化配置；或者兼顾系统的稳定性和经济性，基于双层决策模型对风光储联合发电系统提出一种储能容量的优化配置方法；或者考虑电池健康状态、系统经济性等，建立双层模型对光储容量的协同配置进行了研究；或者建立的“源-荷-储”协调双层规划模型中的上层规划模型以年综合费用最小为目标函数，确定分布式电源、储能系统的安装位置和容量。

综上所述，在多能互补下储能配置的研究中，对3种电源进行容量优化配置的研究相对较多，而以“风光水储”“风光火储”“风光水火储”等4种及以上电源



作为研究对象的相对较少。此外,应综合考虑储能的经济性、灵活性以及安全性等因素,因地制宜配置储能设施。

3.3.2 商业化应用

就电源侧而言,随着清洁能源装机规模不断增加,因地制宜采取多能源品种发电互相补充显然更加灵活;就电网侧而言,“源网荷储一体化”围绕负荷需求展开,促使电网与电源、负荷高度融合,协同发展。不少发电公司响应国家“碳达峰、碳中和”的号召,纷纷进行清洁能源装机占比的统筹规划,发展结构向以清洁能源为主转变,国电投、中国大唐集团有限公司(大唐)、华能、华电以及国家能源投资集团有限责任公司(国家能源集团)五大发电集团清洁能源装机占比及达峰规划见表2。由表2可以看出,国电投的清洁能源占比最高,因此有望最早达峰。同时,国家电网有限公司(国家电网)也采取相应措施,促进清洁能源大规模开发利用,促进全社会能效的提高,促进“源网荷储”协调互动,助力实现“碳达峰、碳中和”目标。

表2 五大发电集团清洁能源装机占比及达峰规划

企业名称	2019年清洁能源占比/%	2020年清洁能源占比/%	达峰年份	2025年清洁能源占比/%
国电投	50.50	56.09	2023年	60
大唐	32.51	38.20	2025年	50
华能	34.00	36.50	2025年	50
华电	40.40	43.00	2025年	60
国家能源集团	24.90			

“十四五”期间,我国新能源消纳、电网安全运行等方面将面临越来越大的挑战,并且负荷的多样性和随机性也增加了电力系统实时功率平衡难度。“两个一体化”有利于解决电力系统的灵活性以及用能系统动态供需平衡问题,因此迎来了市场机遇。多家企业进军“两个一体化”项目,并配置了一定比例的储能,具体见表3。

在“两个一体化”下,储能迎来了商业化的机遇。在此背景下,为支持储能产业健康可持续发展,仍然需要系统规划设计储能,不断发展和完善储能技术,为储能将来更广泛、更长久的发展做好铺垫。

表3 部分“两个一体化”项目

项目	装机规模 / MW	储能功效 / MW	总投资 / 亿元
通辽市现代能源“火风光储制研一体化”示范项目	2 000	320	137.5
中电工程广西覃塘区200万kW风光储一体化项目	2 000	200	120
乌兰察布市“源网荷储一体化”综合应用示范基地	3 000	880	
鄂尔多斯“风光火储氢”一体化项目	4 130	480	
二连浩特可再生能源微电网470 MW示范项目	470	90	

3.4 总结及建议

光伏、风电等可再生能源具有间歇性、波动性和随机性,且其与用电负荷不匹配,可用储能来灵活调节。“碳达峰、碳中和”目标的提出必将推动光伏、风电等可再生能源装机规模的增加,使得电力系统对灵活性的要求更高,也给储能的发展带来了新的机遇。此外,“两个一体化”的部署对新能源消纳具有促进作用,有利于提高电力系统的综合效率以及灵活性。储能在“两个一体化”当中占有非常重要的地位,分析新能源领域相关政策以及“两个一体化”的建设规划概况、研究“两个一体化”下的储能技术、进而探究储能的商业化进程,具有重要现实意义,具体建议如下:

1) 储能系统具有选址灵活、建设周期与风/光相匹配、调节速度快等优点,在“风光水火储一体化”和“源网荷储一体化”中是促进新能源发展的一个重要手段。

2) 几大发电集团给出了实现“碳达峰、碳中和”目标下,清洁能源装机占比、达峰年份、具体装机规模等,与之相匹配的储能也应给出。

3) 我国多地要求可再生能源项目配置5%~20%的储能项目,“两个一体化”下,应综合考虑储能的经济性、灵活性以及安全性等因素,科学论证,因地制宜配置储能设施。

4) 储能技术应用场景众多,可以提供平滑可再生能源波动、调峰、调频、黑启动等诸多服务,收益也应多元。

5) “两个一体化”下,应进一步探索储能的商业模式,完善电力市场机制,提高电力系统的运行效率。

04 结论

1) 煤电是我国电力安全的战略力量,我国建设社会主义现代化国家和满足人民对美好生活的向往都需要保留一定比例的煤电份额。而煤燃烧是 CO_2 排放的主要来源。因此,煤电将在满足电力供应安全的前提下不断降低发电量,以实现更少的碳排放。据预测:到 2030 年,我国需要保留燃煤发电装机 12.13 亿 kW;到 2060 年仍需维持 7 亿 kW 左右,以保障我国能源电力供应安全和调峰、供暖需求。

2) 煤电的低碳化发展对我国“双碳”目标的实现至关重要。对于存量的煤电机组,需要大力进行节能提效改造,把煤耗降到 $300 \text{ g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ 以下。对于达到设计使用寿命的机组,通过机组延寿改造并同步实施提升参数改造以大幅提升机组的经济性。另外,需要推进科技创新,大力发展高参数超超临界技术和超临界 CO_2 循环等新型高效动力系统,把新建煤电机组的煤耗降到 $250 \text{ g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ 以下。

3) 同时,全面提升煤电机组的自身灵活性,大力

发展锅炉深度调峰、热电解耦以及储能耦合调峰等技术和提高控制系统调峰适应性,制定调峰鼓励政策,为可再生电力大规模接入提供支撑。

4) 另外,需要储备碳捕集与封存技术,开发低成本 CCUS 技术,加强政策引导,应因地制宜配置储能设施,储能收益多元,完善储能商业模式,为 2060 年碳中和目标的实现提供保障。🔥

本文支撑论文:

1. “两个一体化”战略下储能应用前景分析(《热力发电》2021 年第 8 期),作者:李建林,崔宜琳,熊俊杰,马速良

2. 超临界二氧化碳动力循环研究进展及展望(《热力发电》2020 年第 10 期),作者:徐进良,刘超,孙恩慧,朱兵国,谢剑

3. 煤电的低碳化发展路径研究(《热力发电》2022 年第 1 期),作者:王月明,姚明宇,张一帆,黄嘉骐

4. 面向碳中和目标的碳捕集、利用与封存发展初步探讨(《热力发电》2021 年第 1 期),作者:张九天,张璐



2022 年顾毓琇电机工程奖在 IEEE PES 年会上颁发

2022 年 7 月 17~21 日, 电气电子工程师学会电力与能源分会 (IEEE PES) 年会在美国丹佛召开, 由中国电机工程学会和 IEEE PES 共同设立的“顾毓琇电机工程奖”在颁奖仪式上颁发。

中国电机工程学会理事长舒印彪, IEEE PES 前主席、IEEE 候任主席 Saifur Rahman 分别致颁奖辞。2022 年顾毓琇电机工程奖的获奖者是清华大学教授吴维韩, 以表彰他在电磁暂态数值计算和电力系统防雷保护方面的开拓性贡献。

舒印彪理事长在致辞中提出, 顾毓琇电机工程奖设立十多年来, 在业界和社会上引起了广泛关注。他对吴维韩教授获奖表示热烈祝贺, 感谢国际遴选委员会的出色工作, 感谢 IEEE PES 共同设立这个奖项, 希望顾毓琇电机工程奖在建立中美两国电力和能源界友好关系中发挥更大的作用, 为国际合作树立良好榜样。

吴维韩教授在获奖感言中表示, 获得顾毓琇电

机工程奖是非常重要的荣誉。他回顾了电磁暂态数值分析、过电压保护和绝缘配合方面的科研工作, 并借此机会感谢所有同事共同开展了相关研究。

“顾毓琇电机工程奖”每年评选一位对推动电机工程领域科技进步作出重要贡献的科技工作者。经过多年的培育和发展, 以其“高含金量”和“珍稀性”而备受业界认可。

吴维韩教授 1955~1959 年在莫斯科动力学院高电压技术专业攻读研究生, 获苏联科学技术副博士学位。曾任清华大学电机系主任、电工研究所所长、系学位委员会主任。完成多项国家自然科学基金、教委博士点基金和国家重点科技攻关项目。专著有《电力系统过电压数值计算》, 发表科技论文 60 余篇。享受政府特殊津贴。吴维韩教授是我国电磁暂态数值计算领域的开拓者之一, 毕生致力于此领域的研究。

第二十八届电机工程国际会议 (ICEE2022) 召开

6 月 29 日, 第二十八届电机工程国际会议 (ICEE2022) 通过线上和线下相结合的形式在韩国首尔召开。本次会议由韩国电气学会主办, 中国电机工程学会、日本电气学会和香港工程师学会联合主办。会议主题为“电气工程助力弹性和零碳的未来”。

大会主席、韩国电气学会会长金在彦致开幕辞。他在致辞中提出, 气候变化给人类社会、生态系统

和经济带来重大影响, 新冠肺炎疫情也为我们带来了严峻挑战。同时, 随着电力领域可再生能源、人工智能、5G 技术及先进材料等迅速发展, 电力应在未来弹性和可持续社会建设中发挥重要作用。ICEE 在促进国家间、文化间和组织间的合作, 促进共同价值建设中发挥着重要作用。

中国电机工程学会副理事长林铭山、日本电气学会会长胜野哲、香港工程师学会会长钟国辉出席

会议开幕式。

在主旨报告环节, IEEE 候任主席 Saifur Rahman、香港工程师学会前会长陈清泉院士、中国电力科学研究院总工程师兼新能源研究中心主任王伟胜、日本神户大学教授 Hisashi Tamaki、美国可再生能源实验室总监 Ben Kroposki 分别作了题为《全球电力聚焦净零碳的未来》、《智能助推智慧能源与碳中和》、《大规模新能源经高压直流送出的技术挑战与思考》、《基于直流供电和可再生能源利用的原型研究结果》和《大规模风电光伏发电接入电网》的主旨报告。

会议还组织了 3 个超级专题论坛、5 个普通专

题论坛、3 个特别论坛、1 个技术讲座和 1 个工业论坛。同时, 会议还围绕 6 个专题组织了 24 场论坛交流及在线论文张贴。

电机工程国际会议(The International Conference on Electrical Engineering, 缩写为 ICEE) 由中国电机工程学会、日本电气学会、韩国电气学会和香港工程师学会于 1995 年共同发起, 根据 4 个学会的定期交流计划, 每年 7 月由一方在本国或地区主办 ICEE 年会, 各方学会主要领导率团参加, 会议包括主旨报告、专题研讨、论文交流、工作组会议等内容。近年来, ICEE 已成为具有一定影响力的区域性国际学术会议。📺

2022 年海峡两岸能源电力融合发展论坛在厦门举行

为进一步推动新型电力系统建设, 服务能源转型发展, 7 月 15 日, 2022 海峡科技专家论坛分会场——海峡两岸能源电力融合发展论坛以“线上 + 线下”相结合的方式在厦门举行。论坛由中国电机工程学会、国网福建省电力有限公司、台湾电力发展协会、台湾科技产业协会、台湾智慧型电网产业协会联合主办, 福建省科学技术协会指导, 福建省电机工程学会、厦门大学、福州大学、清华海峡研究院、国网厦门供电公司共同承办。

论坛以“建设新型电力系统 服务能源转型发展”为主题, 聚焦“双碳”目标和“新型电力系统建设”, 150 位海峡两岸从事能源电力研究和管理工作的学会协会、科研机构、能源电力企业等单位的专家学者和科技工作者进行主题报告、学术交流和研讨, 携手共话新型电力系统建设, 服务能源转型发展。

在主论坛开幕式上, 国网福建电力总经理蔡鸿贤致欢迎辞, 福建省科学技术协会副主席林学理、中国电机工程学会秘书长王刚、台湾科技产业协会副理事长王春源、台湾电力发展协会理事长萧金益



等致辞, 福建省电机工程学会理事长、福建电力公司副总经理李功新主持开幕式。

王刚在致辞中认为, 实现碳达峰、碳中和目标要以技术创新为重要支撑, 以清洁化、电气化、数字化、标准化为实施路径。能源与电力融合发展愈来愈密切, 影响并推动电力系统的转型升级, 使其具有广泛互联、智能互动、灵活柔性、安全可控、开放共享为基本特征的新型电力系统。清洁低碳转型、构建新型电力系统是海峡两岸面临的共同挑战, 需

要产学研用更加广泛的合作，充分发挥科技创新的引领作用。希望大家充分利用这个平台，为推进海峡两岸能源电力融合发展，促进构建新型电力系统，助力实现碳达峰、碳中和目标，积极交流，共谋进步。

在主论坛专家主旨报告会上，中国工程院院士汤广福作《加快能源低碳转型，构建新型电力系统》主旨报告，华北电力大学校长杨勇平作《燃煤发电是建设新型电力系统的重要支撑》主旨报告，长沙理工大学校长曹一家作《多源信息融合的智能配电网自愈调控关键技术及其工程应用》主旨报告，福建电力公司总经理蔡鸿贤作《加快构建新型电力系统，推动两岸能源融合发展》主旨报告，台湾经济研究院研一所研究员兼任所长陈彦豪博士作《建设分布式电网 服务能源转型发展》主旨报告，台湾科技大学东南区校友会会长曾月春作《石墨烯新材料在电力系统的应用》主旨报告，厦门大学能源学院

副院长赵英汝作《智慧综合能源赋能新型电力系统》主旨报告。

论坛上，福建省电机工程学会与台湾电力发展协会签订了《海峡两岸能源发展学术交流合作协议书》。台湾科技产业协会副理事长王春源与台湾中华画院协会理事长、中山大学教授黄小萍一起，将“加强两岸文化交流 促进祖国和平统一”等书法作品，赠予中国电机工程学会、福建省科学技术协会和国网福建省电力有限公司，希望海峡两岸进一步加强交流合作，促进共同繁荣。

本次论坛还分别组织海峡两岸电力新产品新技术新材料交流展示、海峡两岸优秀电力科技论文交流、在闽台商电力营商环境优化暨能效服务座谈会等三场分会场活动，互通电力科技产业信息、分享电力科研新成果，凝聚电力科技新共识，有力推动海峡两岸能源电力融合发展。

中国电机工程学会获评中国科协 “重大科技问题难题征集发布优秀推荐单位”

6月27日，在第二十四届中国科协年会闭幕式上，中国科协隆重发布10个对科学发展具有导向作用的前沿科学问题、10个对工程技术创新具有关键作用的工程技术难题和10个对产业发展具有引领作用的产业技术问题。

由中国电机工程学会推荐的《如何研制大型可变速抽水蓄能机组？》入选2022年度中国科协产业技术问题，该问题的提交单位为哈尔滨电机厂有限

责任公司。

发布仪式后，中国科协表彰了在该项工作中成绩优异的单位。中国电机工程学会荣获“重大科技问题难题征集发布2022年度优秀推荐单位”，秘书长王刚代表学会上台领取奖牌。2018年以来，中国电机工程学会连续5年组织征集评选重大科技问题难题，并连续多次入选。



舒印彪理事长主编的《新型电力系统导论》图书在2022年全国科技工作者日主场活动上发布

5月30日，在2022年全国科技工作者日主场活动上，由中国电机工程学会组织编写的中国科协“双碳”系列丛书之一——《新型电力系统导论》正式发布。中国科协党组书记、分管日常工作副主席、书记处第一书记，丛书编委会主任张玉卓，该书主编中国电机工程学会理事长舒印彪院士见证发布并寄语。

《新型电力系统导论》是中国科协“双碳”系列丛书首批发布的三本图书之一，主编由中国电机工程学会理事长舒印彪院士担任，执行主编由清华大学电机系主任康重庆教授担任，清华大学能源互联网创新研究院、国网能源研究院等单位参编。图书定位于助力“双碳”人才培养，深度服务“双碳”目标，从构建新型电力系统对实现“双碳”目标的重大战略意义出发，系统阐述了新型电力系统的科学内涵、基本特征、演进路径和系统构建，从源、网、荷、储各个环节全面介绍了新型电力系统的重大核心技术。该图书为我国开展新型电力系统专业培训和人才培养提供了必要的教材支持，也为我国构建新型电力系统提供了重要的技术参考。

与该书一起作为首批发布的图书还有《清洁能源与智慧能源导论》《煤炭清洁低碳转型导论》，中国工程院院士刘吉臻、彭苏萍，以及中国科协清洁能源学会联合体副理事长史玉波共同见证发布并寄语。



中国科协“双碳”系列丛书是中国科协全面落实党中央、国务院关于“双碳”工作有关部署，充分发挥组织与人才优势，由清洁能源学会联合会同有关全国学会具体负责编写的专题丛书。丛书旨在助力“双碳”科技与产业发展，加快“双碳”人才培养，内容涵盖全球气候变化、能源、交通、钢铁与有色金属、石化与化工、建筑建材、碳汇与碳中和等多个重点领域，对实现“双碳”目标的技术创新和产业应用具有重要参考作用。整套丛书计划在2023年底前完成。

中国电机工程学会副秘书长范建斌当选国际大电网委员会会士 (CIGRE Fellow)

近日，国际大电网委员会 (International Council on Large Electric systems, CIGRE) 来函，中国电机工程学会副秘书长范建斌当选 CIGRE 会士 (CIGRE Fellow)，成为首位获得该荣誉的中国专家。

为表彰在 CIGRE 专业委员会及技术工作中做

出杰出贡献的专家，CIGRE 于 2014 年启动会士评选，每双数年评选一次，目前全球仅有 25 名专家获此殊荣。候选人经提名后，由 CIGRE 奖励委员会通过初评提出建议名单，经指导委员会审议，最终由 CIGRE 理事会确定。

中国电机工程学会副秘书长范建斌多年来积极参与CIGRE相关活动,作为CIGRE指导委员会成员、B3(电站及电气设备)专委会委员以及多个工作组的召集人、秘书,为提升我国电力技术国际影响力作出了杰出贡献。此次当选标志着我国专家在电工

技术领域的贡献得到国际组织的高度认可。

中国电机工程学会作为国内领先的能源电力核心学术机构,将通过IEC、CIGRE等国际组织平台,积极推广我国在新能源、碳中和、综合能源等领域的科研创新成果,推动中国领先技术走向国际。🇨🇳

学会主办英文期刊《CSEE Journal of Power and Energy Systems》国际影响力再创新高

近日,《期刊引用报告》(Journal Citation Reports,简称JCR)公布,学会主办英文期刊《中国电机工程学会电力与能源系统学报(英文)》(《CSEE Journal of Power and Energy Systems》,简称CSEE JPES)最新影响因子达到6.014(较上年度增长52.7%,2021年公布影响因子为3.938),在JCR电气与电子工程学科(ENGINEERING, ELECTRICAL & ELECTRONIC)中排名42/276,与上年度(62/273)相比提升20位,继续稳居该领域Q1分区。作为交叉领域期刊,CSEE JPES在JCR能源与燃料学科(ENERGY & FUELS)中排名47/119,与上年度(57/114)相比排名提升10位,持续位于该领域Q2分区。JCR是美国科学情报研究所(Institute

for Scientific Information,简称ISI)出版的一种期刊评价工具,通过提供期刊影响因子和学科分区反映期刊影响力。

《CSEE JPES》创刊于2015年,在中国科技期刊登峰行动计划、中国科技期刊卓越行动计划支持下,以建设世界一流科技期刊为目标,持续向国际一流刊物看齐,在学术质量建设、专家团队建设、行业热点追踪、国际宣传推广、品牌会议举办、服务质量提升等方面久久为功,学术传播力、人才凝聚力、创新引领力、国际影响力持续提升,已入选《能源电力领域高质量科技期刊分级目录》能源与电力综合专业T1级,被SCI、EI、Scopus、CSAD、INSPEC、CSTPCD、DOAJ、ProQuest等数据库收录,影响因子不断增长,并蝉联“中国最具国际影响力学术期刊”。🇨🇳

2022年中国电机工程学会直流输电与电力电子专业委员会技术研讨会在新疆昌吉召开

6月23~25日,中国电机工程学会直流输电与电力电子专业委员会主办的技术研讨会采用“线上+线下”相结合形式在新疆昌吉召开,专委会与会委员和来自国内外高等院校、科研院所,电力运行、设计及规划企业,电力装备制造企业等单位的110

余名代表线下参加了会议。受疫情影响未能到会的委员和所在单位的专家80多人线上参会。观看会议直播的人数超过2.3万人。

中国电机工程学会秘书长王刚代表学会对会议的召开表示祝贺,希望直流输电与电力电子专委会

将学术研讨会办成研讨学术的交流平台，成为电力行业有影响力的学术会议，成为学会广泛联系直流输电与电力电子领域工作者和企业的纽带。专委会主任委员李立浯院士致开幕辞。会议承办单位特变电工集团有限公司党委书记、特变电工股份有限公司党委书记、董事长张新致欢迎辞。

直流输电与电力电子专委会技术研讨会是畅谈学术、交流技术的重要阵地，时刻紧扣领域最前沿。专委会依托该平台和行业的科技工作者们一起思考当前技术研发、应用，探索未来发展规划，思考需要解决的问题，推动电力电子技术、设备与器件在直流输电中的发展与应用，探讨直流输电与电力电子技术的发展与应用。

会议邀请了8位国内外专家作主旨报告，交流学术成果。国家电网经济技术研究院有限公司直流技术咨询中心主任李明作了题为《白鹤滩—江苏±800千伏混联级联直流工程系统设计》的主旨报告。英国皇家工程院院士、伦敦帝国理工学院电力工程学院 Tim Green 教授作了题为《Inverter-Dominated Electricity Grids》的主旨报告。华南理工大学张波教授作了题为《无线电能传输发展及问题和前景》的主旨报告。中国三峡集团副总经理吴启仁作了题为《江苏如东海上风电关键技术交流》的主旨报告。南方电网周月宾博士代表许树

楷专家作了题为《超远距离大规模新能源特高压柔性直流输电关键技术研究》的主旨报告。西安交通大学刘进军教授作了题为《新时代电力电子技术的发展趋势》的主旨报告。特变电工先柔性输配电有限公司副总经理盛俊毅作了题为《特高压柔直换流阀研制交付实践及未来工程技术展望》的主旨报告。中电普瑞执行董事查鲲鹏博士作了题为《适用于欧洲远海风电送出的柔性直流输电技术》的主旨报告。南方电网特级专业技术专家、南网科研院副院长郭琦作了题为《直流输电工程实时仿真建模方法及应用（CIGRE TB 864）》的主旨报告。

李立浯主任委员以《新型电力系统需要电力电子技术》为题进行会议总结，指出实现双碳目标，建设新型电力系统是国家坚决要落实的工作任务，直流输电和电力电子技术作为电力领域的重要技术，要适应新型电力系统的需求，直流输电和电力电子技术要努力创新，在新型电力系统建创业展厅中发挥技术支持作用，为实现新型电力系统的数字化信息化智能化、为国家的能源电力事业发展作出贡献。

会议期间，与会代表考察了特变电工科技研发基地及输变电产业园和±1100kV特高压直流输电工程昌吉换流站。

粤港电气工程师资格互认推介会广受关注 香港工程师学会逾150名会员踊跃参加

7月9日，香港工程师学会在香港举办电气工程师资格互认推介会，来自香港政府部门、公营机构、工程顾问公司和工程承包商的逾150名香港工程师学会会员参加本次推介会。广东省电机工程学会粤港互认工作专班以远程会议形式参加。

继5月13日广东省电机学会与香港工程师学会合作举办粤港电气工程师资格互认培训会取得良好反响

后，本次推介会首次面向香港工程师学会会员，得到香港会员踊跃参加。广东省电机工程学会粤港互认工作专班杨旭、何杰在会上分享内地工程师评价体系与香港的对比，重点梳理了香港工程师学会会员申请广东电气工程师的步骤。会上还就“证书的社会认可度”“如何申请成为中国电机工程学会会员”等香港工程师学会会员提出的问题进行了在线交流和解答。

氢气转化可规避氢能事故， 开辟应用新途径

中国工程院院士 杨裕生

氢气易燃易爆，众所周知。防止氢气燃爆，广受关注。

近日，国家能源局综合司发布《防止电力生产事故的二十五项重点要求（2022年版）》（征求意见稿），其中第2项“防止火灾事故”的第6条是“防止氢气系统爆炸事故”，提出发电机氢气冷却系统、氢站或氢气系统在运行、维修、氢气纯度、排放等方面的8项要求。

这是电力生产中用鲜血换来的宝贵经验，价值极大，应该推广执行，也值得其他涉氢部门学习借鉴。

能源用氢比工业用氢更危险

氢气可以用作工业原料，我国年产氢气超过2500万吨，80%用于合成氨。

这些工业部门已经建立起完善的安全操作规程，再加上氢气从生产、传送到使用都在企业

内部的密封管道和容器中，除非泄漏、破裂会造成事故外，正常生产中的事故很少，安全是有保障的。

现今，氢气作为能量的载体进入能源领域，一方面是由于可再生能源电解水制得的氢气可以长时间存放，这一点胜过储能电池；另一方面，燃料电池技术的进步使得氢气有了用武之地。于是，发展氢能和氢燃料电池电动汽车呼声很高。

但是，以相同用氢量预计，能源氢气的事故概率将远高于工业氢气，主要有如下理由。

首先，我国氢能生产地与使用地距离遥远，不仅高压管线建设耗资巨大，而且管材的氢脆容易引起安全问题。例如，用管状高压容器运输，短途可行，长途的能耗过高，经济上不可行。而工业用氢是就地生产、就地使用。

其次，能源氢气从生产到终

端使用要经过产地储存、压缩、运输、用地储存、再行压缩分装等许多环节，要在不同容器间发生多次转移，引发安全问题的可能性增加，而工业用氢多在一个密闭的管线系统中完成。

最后，加氢站高度分散，点多面广；燃料电池电动汽车更是星罗棋布，发生事故的概率要比工业集中用氢大得多。

能源氢气现在用量尚少，但国内外已经多次出现事故。北京大学教授李星国新出版的《氢与氢能》一书以43页的篇幅详细讲述了“氢气的安全性”，介绍事故、分析原因、列举措施，内容丰富，值得研读。

氢气转化有利于提高安全性

能源氢气的储存、运输、分发等环节难题多，安全性差。将氢气转换为液态能源主要有体积缩小、体积能量密度提高等

优势，但是还需综合对比安全性、生产成本，以及全过程的能量转换效率。

液氢的密度比常温氢气约高780倍，显然有利于储运。但是，液氢需在20K的低温下保存，压缩—液化耗能很高，容器要用极好的低温绝热材料，每天还会蒸发产生约1%气态氢。

因此，其除具有氢气所有的安全隐患外，还有超低温引起的一系列问题，如金属延展性降低、连接部失去密封性、对人体的冻伤等。

因此，除航天等不计工本的特种用途外，液氢并不适于作为普遍使用的氢能。日本目前正在尝试从海外运回液氢，其后效当拭目以待。

将氢气转化为能源液氨，可以工业化规模生产，工艺成熟，设备齐全，可实现较高密度储存、运输。

但是，液氨的储存、运输也需加压，而且使用时分解放氢既要吸热又有毒，弊大利小。

数据显示，乙醇的体积能量密度高。乙醇可从二氧化碳经光合作用转化生成的生物质转化而来，是可再生的能源。

遗憾的是，它至今还难以简易地从氢气转化而成。

相比之下，在高温和催化剂作用下，可以一步将氢气转化为二氧化碳制甲醇，能量转换效率现已大于50%。

其体积能量密度不低，又易

于储存运输，安全性远高于氢气。

不仅如此，此举还消除了本要排放到大气中的二氧化碳，为碳中和作贡献。这种甲醇可称之为“绿氢甲醇”。

迄今为止，冰岛已实现年产4000吨的甲醇生产。中国科学院上海高等研究院与两家企业合作，开展了二氧化碳加氢制甲醇技术及中试放大研究，于2020年7月建成5000吨/年的工业试验装置。

由此可见，此“绿氢甲醇”之路已通。

“绿氢甲醇”开辟电动汽车新路径

甲醇作为能源，可通过多种燃料电池发电，也可重整为氢气用于质子交换膜燃料电池。

但是，燃料电池发电的全寿命能量转换效率未必高过内燃机。

现在，国内用煤制甲醇（可称为“灰氢甲醇”）的内燃机汽车技术已经成熟，制作成本和使

用方便性远胜过燃料电池。

“绿氢甲醇”当然也可这样使用，这就成就了零排放的“绿氢甲醇汽车”。

为了大幅度节约“绿氢甲醇”，应该发展“绿氢甲醇增程式电动车”，其装量较少的电池由风力或光伏发电提供充电电能；用内燃机作增程器，不烧油而用“绿氢甲醇”；车上蓄电与发电并联，节省燃料50%；不必常充电即可行长里程。

这种复合动力系统堪称珠联璧合，是氢能汽车的升级，也是未来纯电动车的发展方向。

氢气转化为甲醇，开辟了氢能应用和增程式电动车的美好应用新途径，亟待政府布局。上海市具备条件率先发展“绿氢甲醇增程式电动车”，可将其列入相关发展规划，与氢燃料电池电动车发展并行不悖，为全国开路。

如此，则用了氢能而回避了滥用氢气的风险，且实现了汽车的碳中和。👍

（转自《中国科学报》）



紧紧牵住科技创新“牛鼻子”， 引领新型储能高质量发展

——《“十四五”能源领域科技创新规划》新型储能技术解读

电力规划设计总院党委书记、院长 杜忠明

目前，国家能源局、科技部已联合印发《“十四五”能源领域科技创新规划》（以下简称《规划》），明确了“十四五”能源领域科技创新发展目标、重点任务和保障措施。作为支撑新型电力系统构建的关键技术，《规划》对储能技术进行专章部署，从5个方面提出储能技术发展路线图，重点明确新型储能从集中攻关、试验示范到推广应用的重点技术方向。《规划》的印发实施将为新型储能技术创新指明路径，有力推动新型储能高质量发展。

一、科技创新是破解新型储能高质量发展瓶颈的重要抓手

进入“十四五”，我国新型储能从研发示范阶段迈向商业化发展初期，2021年底全国新型储能装机规模超过400万千瓦，各类储能技术创新发展呈现“百花齐放”的良好态势。锂离子电池储能技术在高效率、低成本、长寿命等方面取得长足进步，国内产业链持续完善，初步具备商业化发展条件；先进压缩空气储能、全钒液流电池等技术基本处于领跑、并跑阶段，有力带动了产业发展；新型储能智慧调控、系统集成等技术发

展迅速，相关示范工程核心技术指标达到国际先进水平。

“十四五”时期是我国实现碳达峰目标的关键期和窗口期，也是新型储能发展的重要战略机遇期。新型储能是新型电力系统的重要标志，为推进新型电力系统建设，有必要加快新型储能的规模化发展。随着新能源规模不断增大，电力系统对调节能力需求大幅提升，新型储能建设周期短、选址简单灵活、调节能力强等优势逐渐凸显，加快推进先进储能技术规模化应用势在必行。但我们也要清醒认识到，我国新型储能发展仍面临成本疏导机制不明朗、标准体系不完善、安全事故偶有发生等问题，在不同程度上制约我国新型储能行业发展。而新型储能技术发展仍然不够成熟是造成上述问题的重要原因之一，当前部分新型储能技术尚在跟跑、少数核心部件仍依赖进口，对新型电力系统中新型储能规划设计和调度运行机理的研究有待深入，部分新型储能技术仍存在亟待突破的瓶颈。

因此，强化新型储能科技创新，是不断推动各类新型储能技术成熟的必由之路，也是破解新型储能发展制约的重要抓手。《规划》在对

“十四五”我国能源领域科技创新工作进行全面部署的同时，准确把握新型储能等各领域技术创新在实现碳达峰、碳中和目标中的作用和定位，聚焦新型储能技术重点前沿方向，有力通过推动新型储能技术创新引领新型储能高质量发展。

二、《规划》紧扣新型储能功能定位进行系统性研发部署

《规划》着眼新型储能构建新型电力系统的全方位作用，紧扣典型场景下新型储能的功能定位，远近统筹、多管齐下，对新型储能技术创新进行了系统性部署，着力提升新型储能对于电力系统调节能力、综合效率和安全保障能力的支撑能力。

《规划》聚焦电网调峰、新能源消纳等应用场景，重点部署能量型储能技术装备及系统集成的攻关任务。对于锂离子电池，重点突破长寿命、低成本、高安全的本体技术；对于铅碳电池，重点突破能量管理技术；对于液流电池，重点突破关键材料、电堆设计及系统集成技术；着力推进钠离子电池、液态金属电池、固态锂离子电池、锂硫电池、水系电池等新一代高性能电化学储能技术，及储热蓄冷、储氢、机械储能等多元化储能技术的集中攻关。同时，重点开展 GWh 级锂离子电池、大规模压缩空气储能电站和高功率液流电池储能电站技术示范。

《规划》聚焦电力系统调频、平滑新能源功率波动等应用场景，重点部署功率型储能技术装备与系统集成研究。对于飞轮储能，重点研发大功率飞轮材料、高速轴承以及系统集成等关键技术；对于功率型电化学储能，重点研发电化学超级电容器、高倍率锂离子电池等功率型储能器件；对于电磁储能，集中攻关超导、电介质电容器等电磁储能技术。同时，推动 10MW 级超级电容器、高功率锂离子电池、兆瓦级飞轮储能系统示范。

《规划》聚焦分布式储能应用的新业态、新

模式，重点部署分布式储能与分布式电源协同聚合技术研究。重点开展分布式储能系统聚合方法，储能系统聚合调峰、调频及紧急控制等理论研究；集中攻关广域布局的分布式储能、储能电站规模化集群协同的成套技术，以及岛屿可再生能源开发与智能微网关键技术；推动基于区块链技术在分布式储能参与市场化交易中的应用。

三、《规划》聚焦新型储能共性技术开展针对性重点攻关

《规划》聚焦当前新型储能技术发展和应用中的共性问题，着眼于大规模电化学储能状态评估、安全防护、回收利用等全生命周期的关键环节，针对性部署共性技术攻关任务，着力破解提升新型储能效率、寿命、安全、经济性水平的关键问题。

《规划》对于新型储能共性关键技术提出具体的集中攻关任务，重点开展基于储能电池单体和模组短时间测试数据预测长日历寿命的实验验证和模拟仿真研究，实现储能电池 25 年以上的循环寿命及健康状态的监测和评价；要求开展低成本可修复再生的新型储能电池技术研究，研发退役电池剩余价值评估、单体电池自动化拆解和材料分选技术，实现电池修复、梯次利用、回收与再生；明确推动储能单体和系统的智能传感技术研究，以及推动储能电池全寿命周期的安全性检测、预警和防护研究；提出基于正向设计，开展适合梯次利用的动力电池设计与制造，以及梯次利用场景分析、快速分选、系统集成和运维等关键技术研究。

此外，《规划》在新型储能共性技术的示范试验方面，提出开展电化学储能系统安全预警、系统多级防护结构及材料等关键技术研究，示范大型锂电池储能电站的整体安全性设计、能量智能管控及运维、先进冷却及消防等关键技术。



彭士禄： 中国核动力事业的拓荒牛

彭士禄（1925.11.18—2021.3.22）

无产阶级革命家彭湃之子，1945年加入中国共产党，中国工程院院士，我国著名的核动力专家，中国核动力事业的开拓者和奠基者之一，中国第一任核潜艇总设计师，中国工程院首批及资深院士，被誉为“中国核潜艇之父”。1951年因成绩优异被选派到苏联留学，1956年在莫斯科化工机械学院毕业后，因国家发展需要改行学习核动力专业。1958年学成归国后一直从事核动力的研究设计工作，先后被任命为中国造船工业部副部长兼总工程师、中国水电部副部长兼总工程师、中国广东大亚湾核电站总指挥、中国国防科工委核潜艇技术顾问、中国核工业部总工程师兼科技委第二主任、中国秦山二期核电站联营公司首任董事长。曾获得全国科学大会奖、为国防科技事业做出突出贡献的荣誉状、何梁何利基金科学与技术进步奖、何梁何利基金科学与技术成就奖等奖项。2021年5月26日，被追授为“时代楷模”。2022年3月3日，被评为“感动中国2021年度人物”。

“历经磨难，初心不改。在深山中倾听，于花甲年重启。两代人为理想澎湃，一辈子为国家深潜。你，如同你的作品，无声无息，但蕴含巨大的威力。”这是《感动中国》组委会授予彭士禄的颁奖词，也是彭士禄一生的写照。

我虽姓“彭”，但心中永远属姓“百家姓”

1925年11月18日，彭士禄出生于广东省海丰县，父亲彭湃和母亲蔡素屏都是中国革命事业的奋斗者，为中华民族的解放事业披肝沥胆、殒身不恤。1928年，在国民党的迫害下，彭士禄的母亲蔡素屏在海丰英勇就义，次年父亲彭湃也因叛徒出卖被捕，在上海壮烈牺牲，年仅4岁的彭士禄成为一名孤儿。感恩于彭士禄父亲烧毁田契，还地于民的恩情，广东潮州的众多贫苦老百姓为了保护

这位革命烈士的后代，冒着杀头的风险凝心聚力，舍命相救，护佑小士禄的生命安全。

1940年，几经辗转，彭士禄和其他一些烈士子女在周恩来的安排下，一同前往延安生活学习，在延安受到了党的精心培养。1941年，彭士禄到延安青年干部学院学习，后就读于延安中学。在延安中学，彭士禄勤学好问，发愤图强，因其学习、劳动上表现出色，被评为模范生。1944年，彭士禄在延安大学自然科学学院化工系就读。1945年，因其学习和劳动等方面的优异表现，破例免去预备期，一入党便成为中国共产党正式党员。

彭士禄童年两次被捕入狱，虽颠沛流离、困苦艰难，但党和人民养育培养、无私佑护的经历，在彭士禄年幼的心灵留下了深刻的印记，这些经历成为铸就彭士禄一生挚爱祖国、拳拳为民的初心之源。彭士禄曾经说：“坎坷的童年经历，磨炼了我不怕困难艰险的性格。几十位‘母亲’给我的爱抚，感染了我热爱百姓的本能。父母亲把家产无私分配给了农民，直至不惜生命，给了我为人民、为祖国奉献一切的热血。延安圣地培育了我自力更生、艰苦拼搏、直率坦诚的习性。总之，我虽姓‘彭’，但心中永远属姓‘百家姓’。”

为国改换专业，延迟归国路

1951年彭士禄因成绩优异获取留学苏联的机会。在苏联学习期间，他饱含着对养育他的党和人民的热爱和感激，怀揣着学成归国报国的信念，废寝忘食，最终以全优的成绩在莫斯科化工机械学院获得了“优秀化工机械工程师”的证书。

1956年，即将以全优成绩毕业回国的彭士禄，受到了彼时正在苏联访问的陈赓大将的接见。在大使馆，陈赓大将问他说：“中央已决定选一批优秀留学生改行学原子能核动力专业，你愿意改行吗？”凭借心中竭诚报国的信念，彭士禄毅然决然地服从国家发展核动力事业之需，斩钉截铁地回答：“只要祖国需要，我当然愿意。”从此，彭士禄便在莫斯科动力学院开始孜孜不怠地学习核动力专业。为了不辜负党和国家的辛勤栽培和殷切期望，在苏联学习期间，彭士禄和其他留学生勤勉刻苦，奋勇拼搏，每天争分夺秒地汲取知识。彭士禄曾经感慨良深道：“留苏期间，我们从未在晚上12点以前就寝过，我们要学的东西太多太多了，一头扎进去，就像是沙漠中的行人看见了湖泊那样。当时，那种奋进不息，为祖国夺取知识制高点的心情是难以用语言描述的。”

热忱报效祖国，核潜艇从无到有

1958年，彭士禄终于学成回到了魂牵梦绕，深深爱恋的祖国，从此与祖国的核动力事业紧紧相依。1965年核潜艇研制项目重启后，彭士禄来到茅封草长、冷僻荒凉的四川大山深处。面对新中国一片空白的核潜艇事业，他日以继夜地躬耕，在无人问津的山坳里耕耘不辍，带领团队闯过了核潜艇事业中遇到的一个又一个暗礁险滩，完成了一项又一项试验设计工作。1970年，在核潜艇核动力装置陆上模式堆的满功率试验中，面对试验最后攻坚阶段中暴



露的问题，彭士禄在千钧一发之际挺身而出，凭借扎实的专业功底和对项目主要参数、数据的精准把握，他提出了增加功率的大胆想法，最终带领团队成功化解了困境，取得了满功率试验的圆满成功。在核潜艇研制过程中，因为彭士禄一次次大胆的拍板，他被美誉为“彭大胆”“彭拍板”。“大胆”的背后展现的是一个共产党员敢为人先的责任担当，“拍板”的背后折射的是中国科学家的科学精神。

1970年12月26日，中国第一艘鱼雷攻击型核潜艇成功下水，彭士禄带领科研人员实现了新中国核潜艇事业从无到有的突破，创造了中国核潜艇事业从1965年重新上马到1970年首航诞生的奇迹，实现了毛泽东“核潜艇，一万年也要搞出来！”的宏伟誓言。奇迹的背后依靠的是什么？彭士禄曾感慨道：“靠的是什么？除了中央的决心和领导的支持外，靠的是共产主义的爱国之心、群体的智慧和合力、一股犟劲精神。”



欣然挂帅再出征，呕心沥血为核电

20世纪80年代，国家决定在广东发展核电。1983年，当时已经58岁的彭士禄被国务院任命为广东大亚湾核电站总指挥。面对当时大亚湾核电建设资金、技术人才的匮乏，彭士禄欣然受命，带领团队在艰苦的条件下日夜奋战。而面对同事对其身体的担忧，让其多注意休息的关切之语，彭士禄则会爽朗一笑道：“这辛苦算什么？如果核电站早日建成，那就太值了！”最终，彭士禄带领团队高效率地完成了选址、招标、技术谈判等核电站筹建前期的繁琐工作，对大亚湾核电站建设工作的快速开展起到了关键的奠基作用。

1986年，彭士禄被调离广东核电，被委任为核电秦山二期联营公司董事长，负责秦山二期的筹建工作。尽管筹建之路举步维艰，但是，彭士禄终不负祖国和人民的期许。2004年5月3日，中国首座自主设计建设的大型商用核电站——秦山核电二期工程在钱塘江边拔地而起，成为彰显中国核电技术威力的重要见证。

由于长年累月的高负荷工作，彭士禄49岁时因突发急性胃穿孔，胃被切除了3/4，术后不久便马不停蹄地投身于祖国的核动力事业。晚年的彭士禄基本丧失了胃功能，即使重病缠身，但他念念不忘的还是祖国的核动力事业。“现如今，老朽已木讷，但有三个心愿：一是盼望祖国早日拥有更加强大的核潜艇力量；二是盼望祖国早日成为核电强国；三是盼望祖国早日实现中华民族的伟大复兴，早日圆了老百姓过上幸福生活的中国梦！”他在自述中这样写道。

他将一生的热血融入祖国的核动力事业，“只要祖国需要，我愿意贡献一切”的忠贞诺言，点燃了祖国核潜艇和核电事业之光，成为“中国核动力事业的拓荒牛”。

2021年3月22日，彭士禄走完了他96年厚重辉煌的人生，他的骨灰撒进了祖国的大海，澎湃不息、波澜壮阔的大海见证了他一生的辗转沉浮，见证了他勇担重任、为国奉献的赤子忠诚，见证了他热爱祖国、竭诚报国的赤子丹心。🇨🇳

（稿件来源：中国科协）

阎洁：

为风电预测插上人工智能的翅膀



阎洁工作照

在“双碳”战略目标下，我国面临着包括能源结构转型在内的多重挑战，清洁能源的高效利用在其中发挥着重要的作用。华北电力大学新能源学院副教授、新能源电力系统国家重点实验室固定研究人员阎洁，从事着与此紧密相关的工作。

阎洁所从事的研究是风光功率预测、风电场运行控制等可再生能源相关的大数据与人工智能研究。她通俗地解释，“也就是利用大数据与人工智能，更精准地预测什么时候会刮来多大的风、能够发出多少电，帮助电网接收更多的风力发电”。

毕业十年，回归大学母校

2006年，华北电力大学对学校学科专业布局进行深度调整，通过顶层设计和前瞻性布局，在原有学科基础上，进行了一系列新能源学科专业建设，国际上首个风能与动力工程本科专业在此

背景下诞生。也正是那一年，高考后填报志愿的阎洁，第一次看到这个专业，她感觉这个专业就是自己的理想专业，当时这个新专业在每个地方只招一个学生，她很幸运地成为首批学生。

随着学习的深入，阎洁感到这个专业所需要的知识体系非常全，是一个典型的多学科交叉专业，包括空气动力学、电机、电路、自动控制、机械制造等，因此能够从事的工作领域也很宽。

在硕士阶段，阎洁跟着老师们学习做研究、做项目，也渐渐体会到发现问题和解决问题的乐趣。“这个阶段我做的更多的是功率预测项目，给不同的风电场分析预测误差发生的原因，并找到解决方案，那时候的电脑设备没有现在这么先进，为了加快建模速度，有时候要在半夜征用实验室其他同学的电脑，进行‘人工并行计算’和‘人工超算’”阎洁打趣道。博士期间，她在自己的研究领域经验愈发成熟，视野更加开阔，也更加

坚定了未来的事业发展方向。

本科毕业 10 年后，阎洁以教研人员的身份再次回到华北电力大学。不仅承担着科研工作，还带起了学生，真心、耐心、同理心对待每一位学生是她的教学原则。教学与科研是相辅相成的，对于工科专业来说更是如此。阎洁利用科研中的先进技术和项目经验获得更多案例，并告诉学生们行业的痛点、如何让理论结合实际以及国际前沿研究是什么，通过这些让课程变得更加鲜活、更贴近实际。

创新系统，提高能源效能

以往的风电功率预测是针对一个场站的数据来预测这个场站的情况，通常面临预测结果不准确、人力成本高、系统使用复杂等问题。

阎洁创新性地将人工智能技术运用在风电预测领域中，利用人工智能算法将所有场站的数据融合到一个模型，运用更多的数据来提高预测精准性。而这些数据也正是她在科研攻关中面临的主要难题，怎样让人工智能找出大量数据之间的关系、进行精准计算。

阎洁介绍，这些数据之间的关系实际上就是不同电站之间这些风速、辐照度，这些天气参量之间的关系，相当于用人工智能方法模拟出气象参数间的联系。

最终，阎洁自主研发出“风光一体化发电功率预测系统”，使预测精度得到了提高，同时可以单独输出每个场站的预测结果，并将原来众多分散的系统功能聚集在一个系统中，让管理人员的工作变得更轻松、高效，目前这一系统在我国 30 多个场站进行推广应用。

带着自信，瞄准国家需求

阎洁回忆，求学期间，自己的两位导师（华北电力大学刘永前教授、英国巴斯大学李芙蓉教授）为自己提供了很多帮助、对自己的影响最大，主要

体现在一些理念的言传身教上，比如，治学和做事的态度以及要学会享受，而这些也是她在工作中持续坚持的力量源泉。

在从事风电领域研究的几年间，阎洁已先后主持国家自然科学基金等 6 项国家级或省部级项目，并担任 IEA Wind Task 36 的课题负责人（唯一担任负责人的中国人）和专业领域部分期刊的编委，积极参加国际交流合作，为我国风电领域的发展注入青春活力。

2020 年，阎洁入选中国科协青年人才托举工程。在她看来，这既是一个新的头衔，也增添了一份自信。

“中国科协为我们提供了一个与同时代科研工作者交流沟通的机会，并且通过资金支持，让我们在科研创新上有了更多发挥空间。”阎洁说。

在与阎洁交流的过程中，她始终流露出一种乐观与自信的心态，在她看来，科研人员理应如此。

“每一个科研工作者在自己的细微科研领域深耕多年，应该有一份坚信没有人比你更熟悉这个研究领域的自信”，阎洁说，带着这份自信，充分发挥自己的专业能力，瞄准国家的未来需求，坚持做下去，困难会有、瓶颈也会有，只有经历了这些，才能体会到那来之不易的满足感。👍

（稿件来源：中国科协科学技术传播中心）



学生对阎洁的评价



国务院印发《关于印发扎实稳住经济一揽子政策措施的通知》

5月31日，国务院印发《关于印发扎实稳住经济一揽子政策措施的通知》（国发〔2022〕12号）。通知指出，要最大限度减少疫情对经济社会发展的影响，统筹发展和安全，努力实现全年经济社会发展预期目标。其中与能源相关的措施包括：抓紧推动实施一批能源项目。推动能源领域基本具备条件今年可开工的重大

项目尽快实施。积极稳妥推进金沙江龙盘等水电项目前期研究论证和设计优化工作。加快推动以沙漠、戈壁、荒漠地区为重点的大型风电光伏基地建设，近期抓紧启动第二批项目，统筹安排大型风光电基地建设项目用地用林草用水，按程序核准和开工建设基地项目、煤电项目和特高压输电通道。🔥

（政策原文 http://www.gov.cn/zhengce/content/2022-05/31/content_5693159.htm）



国务院：在有条件的地区推进屋顶分布式光伏

5月6日，中共中央办公厅、国务院办公厅印发了《关于推进以县城为重要载体的城镇化建设的意见》，并发出通知，要求各地区各部门结合实际认真贯彻落实。文件提出：推进生产生活

低碳化。推动能源清洁低碳安全高效利用，引导非化石能源消费和分布式能源发展，在有条件的地区推进屋顶分布式光伏发电。坚决遏制“两高”项目盲目发展，深入推进产业园区循环化改造。🔥

（政策原文 http://www.gov.cn/zhengce/2022-05/06/content_5688895.htm）



九部委发布“十四五”可再生能源发展规划

6月1日，国家发改委等九部委正式印发《“十四五”可再生能源发展规划》（发改能源〔2021〕1445号）。

《规划》锚定碳达峰、碳中和目标，紧紧围绕2025年非化石能源消费比重达到20%左右的

要求，设置了4个方面的主要目标。一是总量目标，2025年可再生能源消费总量达到10亿吨标准煤左右，“十四五”期间可再生能源消费增量在一次能源消费增量中的占比超过50%。二是发电目标，2025年可再生能源年发电量达到3.3万

亿千瓦时左右,“十四五”期间发电量增量在全社会用电量增量中的占比超过 50%,风电和太阳能发电量实现翻倍。三是消纳目标,2025 年全国可再生能源电力总量和非水电消纳责任权重分别达到 33% 和 18% 左右,利用率保持在合理水平。四是非电利用目标,2025 年太阳能热利用、地热能供暖、生物质供热、生物质燃料等非电利用规模达到 6000 万吨标准煤以上。

在推动大型风电光伏等可再生能源基地建设方面,《规划》明确提出以沙漠、戈壁、荒漠地区为重点,加快建设黄河上游、河西走廊、黄河几字弯、冀北、松辽、新疆、黄河下游等七大陆上新能源基地;科学有序推进大型水电基地建设;依托西南水电基地调节能力和外送通道,统筹推

进川滇黔桂、藏东南二大水风光综合基地开发建设;优化近海海上风电布局,开展深远海海上风电规划,推动近海规模化开发和深远海示范化开发,重点建设山东半岛、长三角、闽南、粤东、北部湾五大海上风电基地集群。

围绕可再生能源发展与生态文明建设、新型城镇化、乡村振兴、新基建、新技术等深度融合,《规划》重点部署了九大行动,即城镇屋顶光伏行动、“光伏+”综合利用行动、千乡万村驭风行动、千家万户沐光行动、新能源电站升级改造行动、抽水蓄能资源调查行动、可再生能源规模化供热行动、乡村能源站行动以及农村电网巩固提升行动,以扎实有效的行动保障规划全面落地。📌

(政策原文 https://www.ndrc.gov.cn/xwdt/tzgg/202206/t20220601_1326720.html?code=&state=123)



17 部委联合印发《国家适应气候变化战略 2035》

6月7日,生态环境部、发改委、能源局等 17 部委联合印发《国家适应气候变化战略 2035》(环气候〔2022〕41 号)。文件提出:要提高能源行业气候韧性。推动储能、智能电网

和数字化等技术应用,完善应急预案体系,提高电力基础设施安全风险预测预警、防御应对和快速恢复能力。📌

(政策原文 https://www.mec.gov.cn/xxgk/xxgk03/202206/t20220613_985261.html)



教育部印发碳达峰碳中和人才培养工作方案

5月7日,教育部印发《加强碳达峰碳中和高等教育人才培养体系建设工作方案》的通知(教高函〔2022〕3 号)。《方案》要求,将绿色低碳理念纳入教育教学体系,广泛开展绿色低碳教

育和科普活动。充分发挥大学生组织和志愿者队伍的积极作用,开展系列实践活动,增强社会公众绿色低碳意识,积极引导全社会绿色低碳生活方式。加快储能和氢能相关学科专业建设,进一

步加强风电、光伏、水电和核电等人才培养，加大碳达峰碳中和领域课程、教材等教学资源建设力度等。

教育部指出，此次《方案》出台是为贯彻《中共中央 国务院关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见》和《国务院关于印发 2030 年前碳达峰行动方案的通知》精神，推进高等教育高质量体系建设，提高碳达峰碳中和相关专业人才培养质量。《方案》提出，加快储能和氢能相关学科专业建设。以大规模可再生能源消纳为目标，推动高校加快储能和

氢能领域人才培养，服务大容量、长周期储能需求，实现全链条覆盖；加快碳捕集、利用与封存相关人才培养。针对碳捕集、利用与封存技术未来产业发展需求，推动高校尽快开设相关学科专业，促进低碳、零碳、负碳技术的开发、应用和推广；加快碳金融和碳交易教学资源建设。鼓励相关院校加快建设碳金融、碳管理和碳市场等紧缺教学资源，在共建共管共享优质资源基础上，充分发展现有专业人才培养体系作用，完善课程体系、强化专业实践、深化产学研协同，加快培养专门人才。📌

（政策原文 http://www.moe.gov.cn/srcsite/A08/s7056/202205/t20220506_625229.html）

6

发改委等六部门：加大煤炭清洁高效利用市场调节和督促落实力度

5月10日，国家发改委等部门发布《煤炭清洁高效利用重点领域标杆水平和基准水平（2022年版）》（发改运行〔2022〕559号），提出：整合已有政策工具，加大煤炭清洁高效利用市场

调节和督促落实力度；加大财政资金支持力度，重点向实施标杆水平改造的企业进行倾斜，培育煤炭清洁高效利用领军企业。📌

（政策原文 https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/202205/t20220510_1324482.html?code=&state=123）

7

发改委印发《“十四五”生物经济发展规划》

5月10日，国家发改委印发《“十四五”生物经济发展规划》（发改高技〔2021〕1850号）。《规划》提到有序发展生物质发电，推动向热电联产转型升级。优选和改良中高温厌氧发酵菌种，提高生物质厌氧处理工艺及厌氧发酵成

套装备研制水平，加快生物天然气、纤维素乙醇、藻类生物燃料等关键技术研发和设备制造。积极推进先进生物燃料在市政、交通等重点领域替代推广应用，推动化石能源向绿色低碳可再生能源转型。📌

（政策原文 https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghwb/202205/t20220510_1324436.html?code=&state=123）



8 发改委、能源局发文推动新型储能参与电力市场

5月24日,国家发改委、国家能源局发布《关于进一步推动新型储能参与电力市场和调度运用的通知》(发改办运行〔2022〕475号)。

《通知》指出,新型储能具有响应快、配置灵活、建设周期短等优势,可在电力运行中发挥顶峰、调峰、调频、爬坡、黑启动等多种作用,是构建新型电力系统的重要组成部分。

《通知》提出,要建立完善适应储能参与的市场机制,鼓励新型储能自主选择参与电力市场,坚持以市场化方式形成价格,持续完善调度运行机制,发挥储能技术优势,提升储能总体利用水平,保障储能合理收益,促进行业健康发展。

根据《通知》,新型储能可作为独立储能参

与电力市场。具备独立计量、控制等技术条件,接入调度自动化系统可被电网监控和调度,符合相关标准规范和电力市场运营机构等有关方面要求,具有法人资格的新型储能项目,可转为独立储能,作为独立主体参与电力市场。

《通知》还强调,要加强技术支持。储能项目要完善站内技术支持系统,向电网企业上传实时充放电功率、荷电状态等运行信息,参与电力市场和调度运行的项目还需具备接受调度指令的能力。电力交易机构要完善适应储能参与交易的电力市场交易系统。电力企业要建立技术支持平台,实现独立储能电站荷电状态全面监控和充放电精准调控。🔥

(政策原文 https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/202206/t20220607_1326854.html?code=&state=123)



9 能源局印发《全国电力安全生产大检查工作方案》

5月20日,能源局印发《全国电力安全生产大检查工作方案》(国能发安全〔2022〕44号),决定在全国范围内开展电力安全生产大检查。方案指出,严格落实全国安全生产电视电话会议统一部署,统筹发展和安全,按照“四个安全”治

理理念要求,深入排查整治电力安全风险隐患和薄弱环节,推动电力安全生产形势持续稳定向好,不发生重特大人身伤亡事故和设备事故,不发生电力系统水电站大坝溃坝漫坝责任事故,不发生大面积停电等对社会造成重大影响的事件。🔥

(政策原文 http://zfxgk.nea.gov.cn/2022-04/07/c_1310599415.htm)



能源局印发《2022 年电力行业班组安全建设专项监管工作方案》

6月2日,国家能源局印发《2022 年电力行业班组安全建设专项监管工作方案》(国能综通安全〔2022〕54号)。方案指出,为进一步加强电力行业班组安全建设,提升电网、发电、施工等班组人员的安全意识和履职能力,夯实安全生产工作基础,国家能源局

决定2022年继续在电力行业组织开展班组安全建设专项监管工作。《方案》制定了加强班组安全技术建设,加强班组安全管理,加强班组安全文化建设,强化班组安全责任落实四个方面的重点工作内容。并给出了具体工作阶段安排和工作要求。📄

(政策原文 http://www.nea.gov.cn/2022-06/02/c_1310612529.htm)



能源局出台 30 项措施防止电力安全事故

6月18日,国家能源局印发关于《防止电力建设工程施工安全事故三十项重点要求》(国能发安全〔2022〕55号)的通知。文件提出:建设单位不得对工程总承包单位、施工单位等提出违反安全生产法律法规

和强制性标准的要求,严禁擅自压缩合同约定的工期。严禁工程总承包单位、施工单位超资质、超经营范围承揽工程项目。📄

(政策原文 http://zfxgk.nea.gov.cn/2022-06/18/c_1310630868.htm)



国家能源局批准《智能风电场技术导则》等 209 项能源行业标准

6月7日,国家能源局发布公告2022年第4号。公告显示,根据《中华人民共和国标准化法》《能源标准化管理办法》,国家能源局批准《智能风电场技术导则》等209项能源行业标准、《Specification for Preparation of Feasibility Study Report for Photovoltaic Power Projects》等23项能源行业标准外文版、《水电工程天然建筑材料勘察规程》和《风电机组检修提升机技术规范》2项能源行业标准修改通知单。

行业标准目录中,包括《智能风电场技术导则》、《风电场无人值守技术规范》、《风电场工程风电机组基础安全监测设计规范》等12项风电行标。行业标准外文版目录提到2项风电相关标准,为风电机组检修提升机技术规范 and 海上风电场工程规划报告编制规程。相关标准将于2022年11月13日起实施。此外,本次还通知了《风电机组检修提升机技术规范》中的8条标准修改。📄

(政策原文 http://www.nea.gov.cn/2022-06/07/c_1310616244.htm)

01

世界首个配置抽背式 9F 级燃气 - 蒸汽联合循环发电机组工程全面建成投产

5月24日,由中国能建广东院 EPC 总承包、安徽电建二公司承建的东莞市中堂燃气热电联产项目二期工程全面建成投产,为粤港澳大湾区建设再添强大动能。该项目位于广东省东莞市中堂镇,是广东省、东莞市重大项目,由东莞市粤明新能源热电有限公司投资建设,项目采取“煤改气”的方式,减少污染物排放,提高生产效能和安全性,该项目是世界首个配置抽背式 9F 级燃气 - 蒸汽联合循环发电机组的项目,9F 级燃机是目前

世界上单套装机容量最大的新型燃气机组。

项目建成后,年供电量 46 亿千瓦时,年供热量高达 142 亿兆焦,对促进当地能源供给侧结构性改革,助力东莞市打赢蓝天保卫战、粤港澳大湾区建设清洁低碳安全高效的能源供给体系具有重要意义。

据介绍,抽背式蒸汽轮机具有热效率高、热电比高、机组效率高等明显优势,可以实现能源的梯级利用,提升机组热效率。与抽凝式汽轮机搭配使用,运行

方式也更灵活。

据测算,中堂项目的年平均供热效率为 87.78%,平均热电比高达 85.1%,全厂供热指标达到世界同类机组最优水平。项目建成后,可替代中堂镇 4 家造纸企业 3 台自备发电机组和 10 台燃煤锅炉,为北海产业园区提供集中稳定的供热和充足的电力保障。

巧妙的空间利用是中堂项目的另一大特色。项目占地面积仅 4.18 公顷,为国内同类型 9F 级燃机项目最小。■

(摘自 国资委网站)

02

我国首座梯级水光蓄互补联合电站正式投运

5月初,我国首座梯级水光蓄互补联合电站——四川春厂坝抽水蓄能电站正式投运。由哈电集团哈尔滨电机厂有限责任公司为该工程研制的中国首台全功率变速恒频抽蓄机组也实现了全功率稳定运行。

该机组为高转速、卧式结构,对转子结构及运行稳定性设计要求高。在项目的研究过程中,电机技术人员针对要求,反复优化

电磁负荷、绝缘系统、冷却系统及结构强度等,以达到最优匹配设计,完成了中国首台全功率变速恒频抽蓄机组的研制。

四川春厂坝抽水蓄能电站位于已投产的四川春厂坝水电站,利用上游已有的春厂坝水库及其引水系统、下游已有的三关桥水库新建抽水蓄能电站,安装 1 台变速恒频可逆式抽水蓄能发电机组,装机容量 0.5 万千瓦,建成

后年发电量 1265 万千瓦时,装机年利用小时 2530 小时。

作为国家级重点科研示范项目,该项目攻克了我国梯级水光蓄互补电站容量优化配置及接入技术的世界性难题,配套研发了全球第一个梯级水光蓄互补电站联合运行控制与智能调度系统,对建设清洁低碳、安全高效的现代能源体系具有重要的现实价值和深远的战略意义。■

(摘自 中国新闻网)

03

全国首座光伏直供换电站投运

5月20日，国家能源集团宁夏电力宁东公司“换电重卡绿色通道（物流）示范项目”顺利竣工并正式投入使用，该项目是全国首座光伏直供换电站，为在“双碳”背景下探索交通领域移动能源的应用场景具有重要示范意义。

该项目由宁东公司与上海启源芯动力科技有限公司联合建设，一期共建成投运2座换电站，占地600平方米，可服务100台

换电重卡。

项目利用厂区场地建设换电站，厂内分布式光伏所发绿电提供换电站电量补给，换电站实行无人化值守，车辆可在3~5分钟内实现全自动能源补给，可为运输方提供电车分离、电池租用、可换可升级等服务，解决了区域短倒、专线运输等场景柴油重卡污染物排放问题，实现零污染、零排放的“绿电交通”。

据介绍，在“十四五”期

间，宁东公司规划扩建换电站并将为该公司提供服务的运输柴油重卡、工程机械（煤场装载机等）约200台全部替换为新能源汽车，届时，每年较传统燃料汽车节省运输成本约11%，可消纳绿电约3000万千瓦时，减少二氧化碳排放约27400吨及其他污染物排放346吨，按照电价0.361元每千瓦时计算，年均可实现用电创收千万元以上。

（摘自 新华网）

04

全球首条 35kV 低频海底电缆入海

5月6日，全国首条35kV低频海底电缆在浙江台州上大陈岛顺利入海，本次海缆敷设从上大陈岛开始，到路桥金清为止。台州35kV柔性低频输电示范工程是国家重点科技项目，顺利投运后将成为中国首个柔性低频输电工程，对大规模海上风电中远距离低频送出具有开创性的指导作用。

台州柔性低频输电示范工程新建35kV换频站1座，35kV

大陈变电站扩建低频配电装置，新建大陈变—盐场换频站35kV海缆线路及配套线路，由浙江院承担工程设计。

台州柔性低频输电示范工程首创海岛低频互联技术，并结合了风机低频接入技术。项目建成后，可以实现大陆侧电网和大陈岛间的电能高效互济，改善风电经海缆送出存在的充电无功大、损耗高等问题，减少风电资源的浪费，是一次积极的科技探索和

仿真实践，对大陈岛推进“零碳岛”建设，打造共同富裕海岛样板，都有积极作用。

据介绍，柔性低频输电是以全控型电力电子器件为基础的一种新型高效的交流输电技术，通过高压大容量交交流换器将50Hz工频降至约20Hz低频，减小线路阻抗，减少电缆线路充电无功，通过对频率维度的潜力挖掘，实现系统功率传输能力和柔性调控能力的提升。

（摘自 国资委网站）

05

全国首个大规模“以大换小”增容改造风电项目并网发电

5月初,随着最后一台风机并网调试成功,全国首个实施的大规模“以大代小”增容改造风电项目——大唐重庆四眼坪风电场改扩建项目提前62天实现全容量并网发电。

重庆四眼坪风电场改扩建项目于2021年5月正式开工建设,通过采取“以大代小”方式,退出老旧机组,进行增容改造。拆除原海装风力发电机组35台,

安装明阳风力发电机组21台,其中改建工程拆除9台原机组并新安装6台3.6MW、2台4.0MW风力发电机组;二期项目拆除26台原机组并新安装9台4.0MW、4台5.0MW风力发电机组,新安装机组容量85.6MW。

该项目实施改扩建后,四眼坪风电场总装机容量达到102.6MW瓦,投产后年上网电量2.5亿度,可供20多万户居

民1年用电。年产值约1.5亿元,年缴纳税费1950万元,将进一步促进地方经济建设,同时风电场的建成发电,每年节约标煤7.8万吨,减排二氧化碳23.6万吨,相当于植物1300万株,对助力国家“双碳”事业蓬勃发展,助推当地环境协调发展、可再生能源电力保供具有深远意义。■

(摘自北极星风力发电网)

06

我国首个深远海浮式风电国产化研制及示范项目正式进入工程实施阶段

5月11日,文昌深远海浮式风电平台浮体在中国海油海油工程青岛建造场地正式开工建设,标志着我国首个深远海浮式风电国产化研制及示范项目正式进入工程实施阶段。

文昌深远海浮式风电国产化研制及示范项目位于南海北部海域,由中国海油有限公司北京新能源分公司所属中海油融风能源有限公司(简称融风公司)投资开发,该项目的特殊之处在于其设计水深120m,离岸直线距离

136km,创水深、离岸距离之最,是我国首个水深过百、离岸距离超百公里的“双百”深远海浮式风电项目。

文昌深远海浮式风电平台由中国海油联合国内数家企业共同研发设计,在单位千瓦投资、单位兆瓦用钢量单机容量等多个指标上均处于国内领先、国际先进水平。

该项目投产后,预计年发电量达2200余万千瓦时,全生命周期可实现碳减排51.97

万~59.32万吨,让文昌油田群用上更清洁高效的绿电成为中国海油海上风电与油气田融合发展的新样板。该风电平台风机建成后,其首创的海上微网燃气轮机和风电自耦合技术,将有助于实现风电全容量利用以及设备的全自动智能运行控制,达到绿色电力100%消纳的目标,项目还将打破我国海上风电通常在60米内浅海开发的水深限制,为我国深远海海上风电规模化效益化发展提供有力支撑。■

(摘自国资委网站)

中国电力科学技术奖（以下简称电力奖）是国家科技奖励工作改革后首批批准的 26 个社会力量设奖奖项之一。电力奖的受理范围面向社会、面向电力行业，奖励对中国电力工业科技进步具有重要作用的科技项目和在中国电力科学技术进步活动中作出重要贡献的单位和个人。电力奖已经成为中国电力领域最具影响力和权威性的奖项，其一、二等奖项目获准可经由承办机构直接推荐参评国家级科学技术奖励。

2021 年度中国电力科学技术奖共受理了来自 33 个单位推荐的 460 个项目，经过严格评审，评选出获奖项目 145 项，其中中国电力技术发明奖授奖项目 7 项，包括一等奖 2 项，二等奖 1 项，三等奖 4 项；中国电力科学技术进步奖授奖项目 138 项，包括一等奖 18 项，二等奖 36 项，三等奖 84 项。

2021 年度中国电力科学技术进步奖 一等奖获奖项目介绍（三）

多时序、多品种、泛主体的电力市场机制设计、关键技术与交易平台

获奖单位：广东电网有限责任公司、清华大学、
广东电力交易中心有限责任公司、
中国南方电网电力调度控制中心、
国电南瑞科技股份有限公司、北京清能互联科技有限公司

获奖人：陈启鑫、张 昆、郑建平、卢 恩、刘思捷、曾智健、
林庆标、夏 清、王 宁、白 杨、昌 力、蔡秋娜、
谭伟聪、董 锴、周 睿

建立电力市场，发挥市场在资源优化配置中的基础性作用，是保障能源安全供应、提高能源利用效率，实现能源高质量发展，从而推

动我国经济结构转型升级的重要举措。2015 年 3 月，中共中央、国务院发布《关于进一步深化电力体制改革的若干意见》（中发〔2015〕9

号），拉开了我国新一轮电力体制改革的帷幕。

我国电力市场建设面临着机制设计、出清计算、风险管控及工程建设四大挑战，亟待攻关突破。一是机制挑战，计划—市场双轨制、能源结构转型、能耗双控等多属于中国特有难题，如何落实并协同以上多重目标，国际上尚无成熟经验；二是技术挑战，我国省级电网规模大、拓扑复杂、对市场出清求解效果和计算效率提出更高要求，广东作为全国用电量最大的省份，该问题尤为突出；三是管控挑战，国内

缺乏电力市场运营经验,市场主体交易意识薄弱、竞争方式不规范,市场运营机构缺乏科学的管控方法,都会影响市场健康发展;四是工程挑战,电力市场运营属于新兴业务,涉及多部门、跨系统协同,与调度深度融合,与用户即时高频交互,研发难度极大。

项目团队在国家自然科学基金、南方电网公司科技项目的资助下,组建了产学研一体化合作团队,倾多年之功、合众家所长,建立了一套涵盖多时序、多品种、泛主体的电力市场体系,突破了出清计算、风险管控、平台研发等关键技术,解决了我国电力工业由计划经济到市场经济转变过程中所产生的一系列技术难题。

主要科技创新

1. 提出了国内首套面向多时序协同、多标的耦合、多类型主体广泛参与互动的电力市场体系的机制设计理论,设计了涵盖完整交易流程、兼顾公平公正与高效性的市场规则体系。创新性提出了搁浅成本补偿机制、需求侧交易机制、价格多成分辨识方法与市场力抑制方法,保障了市场交易的有序、高效。通过搁浅成本补偿机制,对不同成本结构、不同碳排放类型机组的成本补贴进行了科学决策,激励低碳发电主体参与市场;通过需求侧交易机制,测算各用户对社会总福利的价值度量,极大降低了用户交易成本和复杂度;通过价格多成分辨识方法,厘清多交易品种相互耦合对出清价格的叠加式影响,保障市场

公平准确结算;通过市场力抑制方法,消解寡头对市场价格的控制能力,降低市场力风险等。

2. 提出了适应交直流混联复杂大电网的现货市场精炼建模、耦合出清、高效求解一整套出清技术体系,实现了面向我国最大规模省级电力市场出清问题的精细化建模,精简约束及变量规模达 70%。提出多交易品种顺序出清、闭环协同机制,满足了西电东送大规模清洁能源消纳和电网频率秒级控制的即时需要;提出了提升寻优搜索有效性的 0-1 混合整数规划求解算法,将日前市场出清计算控制在 20 分钟以内,提升计算效率 50% 以上,满足了现货市场快速、高频、精准计算的严苛要求。

3. 构建了兼顾交易效率与风险管控、批发-零售协同市场交易体系与管控方法,实现了数千亿电量规模电力交易的帕累托改进,促进了中长期交易与现货市场的高效衔接。提出了不对称信息下面向多交易时序的电力市场机制设计方法,实现了多轮博弈的动态趋优,广东 2020 年 8 月结算试运行偏差考核电量减少 36.6%;提出了基于期货保证金原理的交易风险动态管控机制,形成多交易联动的行为跟踪与风险评估,支撑了市场 100% 履约;提出了零售合约范式提炼技术,自适应辨识表达交易空间的基本范式,提升零售市场结算效率 50%。

4. 研发了基于分布式服务的业务协同平台架构及高并发访问的集群加速技术,支撑多家市场运营机构、多

个业务系统无缝集成、数据贯通共享与服务互调用,实现电力系统数据穿透正反向物理隔离并发同步传输,解决了 10 万以上海量用户高并发访问与交易场景快速回溯等技术难题。构建了系统安全防护体系,包括基于国密算法的数据加密技术、区块链的数据防篡改技术、数字水印的防截图技术等;研发了动态多场景数据可追溯管控技术,支持任意时刻案例数据回溯 5 秒内完成。

项目主编电力市场交易规则 14 份,发表论文 124 篇,其中 SCI 收录 54 篇,成果被国内外权威专家高度肯定,累计引用 2000 余次。发表专利 82 项,其中授权 9 项,发表软著 8 项。

应用领域与推广前景

项目成果整体应用于广东电力市场,编制了国内首套“1+N”模式的电力市场交易规则体系,研发了适用于国情省情的电力现货市场出清及批发零售一体化结算的核心技术,建成了国内首套具有自主知识产权的电力现货市场运营智能化决策系统平台,支撑广东成为全国首个结算试运行试点。2019 年 5 月至今,广东现货试点经历了按日、按周、按月结算试运行的多场景考验,充分发挥了效能,在全国发挥了重要的示范作用。

项目成果为广东电力市场稳定、有序和高效运营奠定了基础,为 2.6 万余家市场主体提供了良好的市场环境。近两年市场交易电量 4452 亿度,减排 CO₂455 万吨,取得了显著的经济效益和绿色效益。■

电力

工控系统本体安全防护与攻击检测关键技术及应用

获奖单位：南京南瑞信息通信科技有限公司、
北京科东电力控制系统有限责任公司、浙江大学、
中国科学院信息工程研究所、国网江苏省电力有限公司、
国网浙江省电力有限公司、南瑞集团有限公司

获奖人：杨维永、周劭英、刘 苇、陶洪铸、汪 明、霍雪松、
蒋元晨、詹 雄、马 骁、徐文渊、孙利民、祁龙云、
朱世顺、姚一杨、刘 寅、高明慧

当前，国家间网络安全对抗愈加激烈，近年来乌克兰大停电、震网病毒、SolarWinds 等事件表明电力系统作为网络战的主要攻击目标，始终处在打击破坏的前沿。我国电力工控系统现有安全防护主要侧重边界防护，工控系统本体安全防护手段不足，已难以应对“跨网、信息物理系统、供应链”等新型网络攻击，而物联网等新技术的应用又使攻击面进一步扩大。同时，网络安全法、等级保护 2.0 对自主可控、安全可信、攻击检测提出了新的要求。因此，亟需开展适应电力工控系统的本体安全防护技术研究，并进一步提升系统本体应对高级安全威胁的攻击检测和响应能力。

依托国家重点研发计划《工业

控制系统安全保护技术应用示范》、工信部工业转型升级《电力行业工业控制系统核心技术能力提升》等重大项目，针对嵌入式工控终端资源受限下可信根和信任链构建技术、实时性约束下安全防护等级要求高、漏洞更新与可靠运行矛盾、高级威胁攻击与检测响应手段不对等

方法，工控软件细粒度访问控制机制、工控系统安全威胁响应体系等技术难题，项目团队历时 7 年开展产学研联合攻关，按照“硬件可信、系统免疫、业务可控、威胁响应”的研究思路，提出了“轻量化硬件可信方法、微内核工控实时安全操作系统、工控业务软件基本颗粒保护框架、多级协同防御体系”等创新方案，研制了可信硬件模块、安全操作系统、工控软件保护组件、威胁响应装置等安全装备。

主要科技创新

本项目针对电力工控系统在 本体安全防护和攻击检测方面的突出问题，从国产化自主可控硬件出



图1 项目研究路线图

1. 针对工控终端硬件资源受限下可信根和信任链构建难题,提出了基于硬件熔断机制及 TPCM 模块的可信根构建方法,研制了轻量化且支持异构指令架构的可信模块,保护了嵌入式工控终端的可信启动、可信引导,降低工控终端固件逆向及代码注入等风险。可信软件基轻量化程度从 MB 级别优化至 KB 级别,并且性能影响均控制在 5% 以内。

3. 针对工控软件动态运行细粒度控制机制实现难题, 提出了基于最小运行权域和可信控制流约束的业务软件保护框架, 研制了工控软件基本颗粒保护组件, 降低了工控

4. 针对工控系统安全威胁响应体系不完备的难题, 参照电力系统三道防线理念, 提出了基于操作系统和业务软件本体行为的多级协同防御方法, 研制了威胁检测响应装置以及网络安全管理平台, 构建了“会话-设备-区域”协同防御体系, 实现了电力系统安防体系由静态布防提升为全面实时管控的转变。项目获授权发明专利 30 项, 登记软件著作权 14 项; 发表论文 45 篇(含 SCI/EI28 篇); 出版专著 4 部; 制定标准 7 项(含国标 4 项)。项目成果多项技术指标超越国内外现有水平, 攻克了面向工控本体的可信硬件模块、安全操作系统、软件基本颗粒保护、多级协同防御等核心技术, 提出多项可工程化的创新解

应用领域与推广前景

该项目对国家关键信息基础设施的安全可靠技术的研究、应用与发展起到很好的示范作用，践行了基础软件自主可控发展战略，有力保障了大电网安全稳定运行。



图2 基于控制流完整性跨区可信传输框架

特高

坝低热水泥混凝土性能
与施工关键技术

获奖单位：中国长江三峡集团有限公司、中国三峡建工（集团）有限公司、清华大学、中国水利水电科学研究院、中国葛洲坝集团三峡建设工程有限公司、中国水利水电建设工程咨询西北有限公司、中国水利水电第四工程局有限公司、中国水利水电第八工程局有限公司、

获奖人：李文伟、杨宗立、汪志林、陈文夫、杨宁、牟荣峰、胡昱、王振红、乔雨、陆超、高小峰、谭尧升、牛旭婧、辛建达、张建山

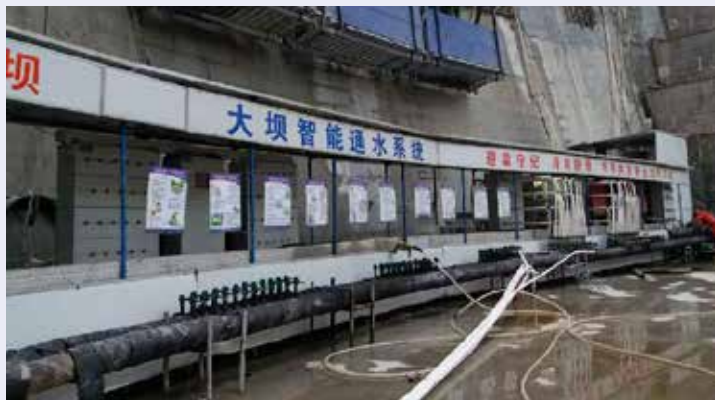
温控防裂一直是水工大体积混凝土亟待解决的世界级难题。我国通过三峡、溪洛渡、锦屏 I 级等水电工程建设，形成“中热水泥 + 掺合料 + 预冷骨料 + 坝内埋管 + 适时保温”等措施及分缝分块、薄层浇筑方案，引领世界坝工建设进入 300m 级时代。然而，上述方案仍无法解决温控防裂世界难题并制约坝体高效施工。三峡集团致力于无缝大坝建设，在三峡、溪洛渡、向家坝等工程部分结构开展了低热水泥混凝土现场浇筑试验，对低热水泥混凝土材料性能及其施工工艺有了一定的认识。

乌东德、白鹤滩是“十三五”西电东送国家重大工程。两座世界级特高拱坝（坝高 270m、289m）地处干热河谷，气温高、辐射强、温差大、湿度低、风速大，技术难

度与施工强度位居世界前列。为达成无缝大坝建设目标，高质量建造国之重器，两座特高坝全球首次全坝浇筑低热硅酸盐水泥（以下简称低热水泥）混凝土。

干热河谷复杂环境特高坝低热水泥混凝土真实服役性能、温控防裂措施和高效施工方案尚无成熟经验可供借鉴。项目历经 20 余年科技攻关实践改进，依托国家重大工程乌东德和白鹤滩水电站，在温控防裂理论和方法、层间性能弱化机理及缺陷控制方法和高效施工装备、技术进行自主创新，形成复杂环境特高坝低热水泥混凝土性能提升及高效施工关键技术。

主要科技创新



乌东德大坝智能通水控制系统

1. 提出低热水泥混凝土抗裂特性、开裂机理和温控防裂理论

(1) 探明全龄期热学、力学、变形性能时变规律, 探明复杂环境强度 / 韧度 - 温度、强度 / 韧度 - 湿度时变规律, 揭示温度 - 湿度 - 约束耦合作用条件真实抗裂性。

(2) 揭示低热水泥混凝土开裂机理, 提出“控流量、快升温, 小温差、严控温, 早保护、长养护”防裂理念。

(3) 提出温控指标时 - 空联调精细防裂方法, 形成适应多工况多结构温控模型、指标体系和控制策略, 实现骨料由二次预冷到一次突破。

2. 复杂环境低热水泥混凝土层间弱化、初始缺陷产生机理和调控技术创新

(1) 探明复杂环境层间性能演变规律, 揭示层间性能弱化机理。

(2) 研发高分辨率全景荧光显微成像, 揭示复杂环境内部初始缺陷产生微观机理, 建立缺陷 - 强度 - 龄期模型, 提出复杂环境低热水泥混凝土最佳养护龄期标准。

(3) 提出复杂环境低热水泥混凝土层间结合质量控制指标体系和

措施, 研发快速测定水化放热、凝结时间和水分状态装置, 开发层间实时监测、即时预警、联动控制系统。

3. 复杂环境低热水泥混凝土性能预判、精细温控和高效施工技术创新

(1) 探明复杂环境低热水泥混凝土全级配时变特性和尺寸效应, 基于成熟度理论创建全级配真实性能预测模型更加真实评价抗裂安全系数。

(2) 发明成套集成智能控温装备和软件系统, 创建精细化温控执行评价指标体系和全时空梯度控制预警系统。

(3) 构建大规模厚升层及特殊

部位同步成型技术体系, 实现升层由 3m 到 4.5m、6m 跨越。

应用领域与推广前景

成果成功应用于乌东德、白鹤滩水电站两座特高拱坝、洞室衬砌混凝土, 并建成首座百米级低热水泥碾压混凝土重力坝, 坝体工作性态优良, 质量监督总站评价工程质量优良。行业机构、国内外学者和专家、主流媒体相关报道对项目成果充分肯定, 认为成果“立足千秋、攻坚克难”、打造产业链支撑超级工程。

项目经济效益巨大, 推广应用前景广阔。部分成果已在海外工程及其他行业(铁路工程、中科院中微子实验室建设)推广应用, 并受到同类工程和其他工程领域、“一带一路”等海外项目关注, 促进了水电建设行业低热水泥混凝土筑坝技术进步, 开辟了大体积温控防裂新途径, 有效降低水电工程混凝土施工能耗和 CO₂ 排放量, 有利支撑了资源节约型、环境友好型社会的创建。



乌东德特高拱坝4.5m厚升层



低热水泥混凝土施工现场

超（超）

临界空冷机组超长距离大温差 高效协同供热重大工程

获奖单位：中国华电集团有限公司宁夏分公司、中国华电集团有限公司、
华电宁夏灵武发电有限公司、宁夏华电供热有限公司、
中国铁建大桥工程局集团有限公司、
东方电气集团东方汽轮机有限公司、
中国电力工程顾问集团西北电力设计院有限公司、
北京华源泰盟节能设备有限公司、
华电郑州机械设计研究院有限公司、
中国船舶集团有限公司第七〇三研究所

获奖人：厉古文、赵晓东、薄其明、王立波、徐剑晖、韩克珍、
王 军、王明生、梁增同、沈 亭、朱建华、肖常磊、
梁新磊、曾 娅、姚福锋

多年来银川市一直沿用分散式小锅炉供暖，供暖质量差，污染严重，居民意见很大，中央环保督导组多次督导。为彻底改变银川市空气质量，打赢蓝天保卫战，银川市和华电集团决定政企联手实施“东热西送”集中供热工程。

2015年11月起，经对1060MW空冷机组、600MW空冷机组抽汽和高背压供热、穿黄盾构工程、超长距离大温差供热等专题研究论证，2017年8月灵武电厂向银川市集中供热工程获得批复，工程总投资约75亿元。

其中一期项目2018年9月建

成，已运行三个完整采暖季，运行稳定，整体供热质量良好；在总结一期工程项目经验的基础上，2020年9月建成并投运二期项目。供热工程中，热源侧完成了2台百万千瓦超（超）临界空冷机组和2台60万千瓦亚临界直接空冷机组抽汽及高背压改造，单台机组最大抽汽量1200t/h，热网供水温度130℃，总供热负荷3269MW。配置6台12MW背压发电机组，实现了能源梯级利用。热网侧采用四级热网三级换热的配置方案，新建两供两回DN1400mm供热管网，主管网最

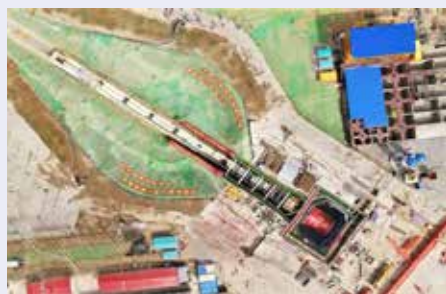
远距离达70km，建设一座穿越黄河的专用供热管廊，长度1838m；配置368台低温驱动吸收式热泵机组，实现热网回水温度30℃，供回水温差达到100℃，供热面积达7500万m²。

主要科技创新

1. 结合1060MW机组供热改造的通流部分分析，设计了低压模块结构及低压叶片，实现首个百万千瓦直接空冷机组的供热应用，基于能量梯级利用原理，构建了集成1060MW机组抽汽供热、1060MW机组与600MW机组高背压串联供热、背压机组梯级供热和蒸汽疏水余热回收等技术的发电耦合供热系统。厂内供电煤耗下降15.1g/kWh，厂用电率下降1.2%，疏水余热回收节约15%供热抽汽量，实现电厂的能源高效利用与供热能力大幅提升。

2. 针对黄河段复杂地层等施工因素，利用吸收式大温差换热技术，创新设计了“初心号”泥水盾构机，建设了穿越黄河的专用供热管廊，开发了低温驱动全工况运行的吸收式大温差换热技术，实现首次穿越

黄河建设长距离大温差供热工程。供热一次网长度达 70km，一次网回水温度最低降至 24℃，供回水温差达 100℃以上，一次网温降 $\leq 0.025^{\circ}\text{C}/\text{km}$ ，实现低品位能深度利用与热网输送能力大幅提升。



专门设计定做了直径为9.05米的“初心号”泥水盾构机



先进的热泵机组，供水温度130℃，回水低至30℃

3. 针对超长距离热网输送问题，创新设计了四

级串联、三级换热的长输热网系统，并针对长距离管网的输送延迟问题，提出了分阶段定温度量调节的热网高效调节方法，解决了长距离热网的调节滞后问题，实现热负荷快速响应，满足了居民舒适取暖的需求。消除了一次网 13 小时延迟，用户室温波动控制在 1℃内。

4. 针对超高温水的腐蚀与结垢等难题，研制了适用于 130℃热网水的缓蚀阻垢剂，确定了超高温热网水的最佳 pH 值，解决了热网系统各类设备的腐蚀和结垢问题。利用缓蚀阻垢剂，热网水 pH 值调至 9.2，耐氯离子腐蚀临界值提高至 53.25mg/L。工程投运后，针对长输四级管网优化调节技术、高温热网水质控制技术开展了研究与攻关。2020 年 5 月完成科技项目验收，并经宁夏回族自治区科学技术发展战

略和信息研究所科技成果评价、中国电力企业联合会科技成果鉴定：项目整体达到国际先进水平，其中百万千瓦空冷机组供热、100℃大温差供热等技术达到国际领先水平。科技项目形成发明专利 17 件（授权 6 件和实质审查中 11 件），授权实用新型专利 20 件，获软件著作权 9 件，发表论文 17 篇。为大容量机组长距离大温差供热提供借鉴意义。

应用领域与推广前景

在“东热西送”集中供热工程中，构建了集成 1060MW 机组和 600MW 机组抽汽及高背压供热、背压机组梯级供热和蒸汽疏水余热回收等技术的发电耦合供热系统，完成了穿越黄河建设长距离大温差供热工程，建设了四级管网、三级换热的长输热网系统，应用了分阶段定温度量调节的热网高效调节方

法等建设内容。项目完成建设后，实现单机抽汽量达 1200t/h，新增供热能力达 3269MW，可满足供热面积 7500 万平方米的采暖需求，解决银川市 100 多万居民的清洁取暖问题，可替代城区燃煤小锅炉 155 台套，年减少城区燃煤量约 130 万吨，对保障民生与改善生态环境具有重大的现实意义。

2018 年银川市空气优良天数达到 296 天，2019 年优良天数 5 年来首次突破 300 天，达到了 324 天，较投运前增加 49 天，PM_{2.5} 下降 21%，SO₂ 下降 43.8%。2020 年 10 月，亚洲清洁空气中心对全国 168 个重点城市在 2019 年大气污染治理努力程度和治理效果进行评比，银川市位列“2020 中国蓝天百强城市榜”第一名，对保障民生与改善生态环境作出巨大贡献。📍

更正

上期“现代电力系统仿真技术及工程化应用”项目所用图片“工控系统信息安全解决方案示意图”系误用其他项目图片，正确图片见右图。

特此更正。



现代电力系统仿真平台总体架构



中国电机工程学会
CHINESE SOCIETY FOR ELECTRICAL ENGINEERING





中国电机工程学会
CHINESE SOCIETY FOR ELECTRICAL ENGINEERING

