



碳中和背景下数字技术赋能的中国新 型电力系统

China's new power system enabled by digital
technology under the background of carbon
neutralization

赛迪顾问股份有限公司

2022.9.30

CCID Consulting Company Limited

September 30, 2022

致谢

本研究由赛迪顾问双碳经济研究中心统筹撰写，由能源基金会提供资金支持。

本研究是【能源基金会低碳转型项目工作组的课题】

免责声明

- 若无特别声明，报告中陈述的观点仅代表作者个人意见，不代表能源基金会的观点。能源基金会不保证本报告中信息及数据的准确性，不对任何人使用本报告引起的后果承担责任。
- 凡提及某些公司、产品及服务时，并不意味着它们已为能源基金会所认可或推荐，或优于未提及的其他类似公司、产品及服务。

目 录

前 言	1
Abstract	3
第一章 数字技术与中国新型电力系统.....	5
一、数字经济成为中国经济社会高质量发展新引擎.....	5
（一）国家政策推动数字经济迈向成熟	5
（二）数字与实体融合引领高质量发展	6
（三）“新基建”夯实数字经济发展基础	7
（四）数字经济将助力高水平对外开放	7
二、数字化转型是中国电力系统面向未来的主旋律.....	8
（一）数字技术与电力系统融合日益加深	8
（二）技术进步带动电力系统阶段性变革	12
（三）电力数字化发展政策环境持续改善	15
（四）电力系统数字化未来重点逐渐明晰	21
三、构建新型电力系统是实现“双碳”目标的必经之路.....	24
（一）电力系统将面临多层次更大挑战	25
（二）数字技术赋能将发挥更关键作用	27
（三）数字基建将塑造电力供需新格局	27
四、报告的目的和框架.....	28
第二章 数字技术打造绿色低碳电力之“源”.....	31
一、内容概述.....	31

二、面临挑战	31
(一) 火电功能转换需要调峰能力进一步提升	31
(二) 新能源电力不确定性导致并网难度加大	32
(三) 新能源电源结构面临安全性稳定性挑战	33
三、数字化解决方案	34
(一) 火电灵活性深度改造	34
(二) 新能源电场高效运维	43
(三) “风光水火储”多能互补体系建设	51
四、措施建议	58
五、本章小结	59
第三章 数字技术编织坚强智能电力之“网”	62
一、内容概述	62
二、面临挑战	62
(一) 电力供需模式转变要求电网具备更强灵活性	62
(二) 新能源电力消纳需要大容量长距离输电保障	63
(三) 新能源电力集中式和分布式并存带来新要求	63
三、数字化解决方案	64
(一) 智能电网建设	64
(二) 特高压数字化装备	71
(三) 微电网智慧管理	79
四、措施建议	89
五、本章小结	90

第四章 数字技术支撑多元互动电力之“荷”	93
一、内容概述.....	93
二、面临挑战.....	93
（一）电力系统低碳发展对绿色用能提出更高要求.....	93
（二）新型电力系统与电力市场建设需要协同推进.....	94
（三）数字基础设施规模化发展导致用电负荷增长.....	94
三、数字化解决方案.....	95
（一）工业领域.....	95
（二）交通领域.....	98
（三）建筑领域.....	101
（四）民生领域.....	104
四、措施建议.....	107
五、本章小结.....	108
第五章 数字技术赋能安全可靠电力之“储”	111
一、内容概述.....	111
二、面临挑战.....	111
（一）提升新型电力系统电力供给能力和品质.....	111
（二）增强新型电力系统电网灵活性和安全性.....	112
（三）探索新型电力系统消费新场景和新模式.....	112
三、数字化解决方案.....	113
（一）电源侧储能.....	113
（二）电网侧储能.....	114

(三) 负荷侧储能	116
四、措施建议	118
五、本章小结	120
第六章 数字技术助推“源网荷储一体化”	122
一、内容概述	122
二、面临挑战	122
(一) 重塑“源网荷储”电力系统新架构	122
(二) 转变“源随荷动”的传统运行模式	123
(三) 强化“源网荷储一体化”运维管理	123
三、数字化解决方案	124
(一) 协同体系规划设计	124
(二) 深度互动系统搭建	125
(三) 运行系统高效管理	126
四、措施建议	128
五、本章小结	130
第七章 总结与展望	132
一、数字技术在新型电力系统中的应用现状和展望	132
二、数字技术与电力系统融合需要关注的其他问题	139
三、推动中国新型电力系统数字化建设的措施和建议	141
(一) 要素保障，优化电力数字融合发展环境	141
(二) 资金支持，加大财政金融引导扶持力度	143

（三）智力支撑，健全新型电力系统人才生态	144
（四）创新加速，强化关键数字赋能技术供给	146
（五）示范引领，加快电力数字技术应用推广	147
（六）分类施策，筑牢电力网络数据安全防线	149

前 言

2020年9月，中国在联合国大会上向世界郑重承诺，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（以下简称“双碳”目标）。当前，中国电力行业碳排放占全国碳排放总量的比重达到40%，电力系统低碳转型是实现“双碳”目标的关键所在。2021年9月，中共中央、国务院发布《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》，把构建以新能源为主体的新型电力系统作为推进“双碳”工作的重点任务之一，这对电力系统走上低碳发展之路提供了战略指引。

近年来，中国数字经济快速发展，并逐渐加快与经济社会各领域深度融合，云计算、大数据、物联网、移动互联网、人工智能、区块链等数字技术在助力新型电力系统建设中也发挥了重要的赋能作用，随着数字技术与电力系统各环节的交叉融合，中国新型电力系统“源网荷储”一体化协同发展步稳蹄疾，正在加速实现电力系统“质与量”的双向提升。

本研究报告围绕数字技术发展与中国新型电力系统建设协同推进，从源、网、荷、储以及一体化五个方面，分别探讨了中国新型电力系统建设所面临的主要形势和挑战，系统梳理了数字技术在关键环节当前的主要应用情况和前瞻性应用场景，挖掘数字技术在融入电力系统的过程中凸显出

的不足，并提出针对性相关措施建议，最后对未来中国新型电力系统数字化建设进行总结展望。

Abstract

In September 2020, China made a solemn commitment to the world at the United Nations General Assembly that carbon dioxide emissions will peak before 2030 and strive to achieve carbon neutrality by 2060 (hereinafter referred to as the "double carbon" goal). At present, the Chinese electric power industry carbon emissions accounts for the proportion of the total carbon emissions to 40%, low carbon transformation of power system is the key to achieve the "double carbon" goal. In September 2021, the Central Committee of the Communist Party of China and The State Council issued the "Opinions on the Complete, Accurate and Comprehensive Implementation of the new Development Concept and the Work of carbon Peak and carbon Neutrality", which took the construction of a new power system with new energy as the main part as one of the key tasks to promote the "double carbon" work. This provides strategic guidance for the power system to embark on the road of low-carbon development.

In recent years, China's digital economy has developed rapidly and gradually accelerated its deep integration with all areas of the economy and society. Digital technologies such as cloud computing, big data, Internet of things, mobile Internet, artificial intelligence and blockchain have also played an

important role in enabling the construction of new power systems. With the cross-integration of digital technology and all aspects of the power system, the integrated development of "source, grid, load and storage" of China's new power system is stepping steadily and accelerating to realize the two-way improvement of "quality and quantity" of the power system.

This research report focuses on the cooperation between the development of digital technology and the construction of China's new power system, and discusses the main situations and challenges faced by China's new power system construction from the five aspects of source, network, charge, storage and integration. The current main application situation and prospective application scenario of digital technology in key links are systematically sorted out, and the shortcomings of digital technology in the process of integrating into the power system are explored. Finally, the paper puts forward relevant measures and looks forward to the future digital construction of China's new power system.

第一章 数字技术与中国新型电力系统

一、数字经济成为中国经济社会高质量发展新引擎

近年来，5G、大数据、人工智能等数字技术发展日益成熟，以此为依托，数字经济作为一种新的经济形态在全球范围内得到快速发展。以数字技术为媒介，数字经济与实体经济正在发生更快速、更深层次地融合，推动了数字技术的产业化、传统产业的数字化以及数字化治理进程完善，数字经济正在引领中国经济社会各领域发生深刻变革。

（一）国家政策推动数字经济迈向成熟

自 2015 年 7 月国务院发布《关于积极推进“互联网+”行动的指导意见》以来，数字经济成为了中国经济社会发展中的重要一环，国家相关政策支持力度不断加码。2020 年 7 月，国家发改委、工业和信息化部等 13 个部门联合发布《关于支持新业态新模式健康发展激活消费市场带动扩大就业的意见》，对加快发展数字经济 15 大新业态新模式提出 19 项创新支持政策，以创新生产要素供给方式，激活消费新市场，发展新的就业形态，培育壮大新动能。2021 年政府工作报告中明确指出，加快数字化发展，打造数字经济新优势，营造良好数字生态，建设数字中国。截至 2020 年底，中国数字经济规模达到 43.2 万亿元，同比增长 14.9%，占 GDP 比重为 42.5%，云计算、大数据、人工智能、区块链、物联网等数字技术对中国经济社会各领域产生了重大影响，“数字化、生态

化、智能化”成为经济社会高质量发展中的关键词。

（二）数字与实体融合引领高质量发展

在经历互联网、移动互联网阶段之后，信息网络逐渐突破传统信息处理终端以及传输方式的限制，正大幅向更广、更快、更深的方向发展。随着 5G、大数据、人工智能、物联网等技术逐步发展成熟，以“万物互联”为突出特征的数字经济基础正在形成，数据要素成为了新的生产要素，也成为世界各国推动经济高质量发展的重要力量。伴随互联网特别是产业互联网的普及和应用，数字资源在互联网中加速产生、传播并应用，将进一步优化资源配置和使用效率，提高资源、资本、人才全要素生产率。在全球经济放缓、增长乏力的背景下，以推动互联网、大数据、人工智能与实体经济深度融合为特征的新一轮科技革命和产业变革应运而生，数字经济在提升全要素生产率、促进传统产业提质增效方面发挥显著作用。当前，随着信息技术的持续演进和全面创新，数字经济正在逐渐广泛融合渗透到传统产业之中，驱动农业、工业和服务业数字化转型升级，引发各行业领域的业务形态变革并带动产业结构调整。伴随着工业互联网的广泛部署，以及大数据、云计算、人工智能等数字技术的成熟应用，未来传统产业必将迎来数字化驱动的转型升级热潮，数字化融合创新将成为全球数字经济发展的主战场，推动世界经济高质量发展。

（三）“新基建” 夯实数字经济发展基础

“新基建” 提档加速是中国数字化历史进程中的一个重要节点。随着智能制造、智慧城市等领域对数据采集、数据存储、数据传输、数据分析等的需求不断提升，数据中心、5G 基站、工业互联网等新型基础设施建设加快推进。在 5G 领域，截至 2020 年底，已经建成的 5G 基站达到将近 72 万个，5G 终端连接数超过 2 亿，建设速度和规模超出预期。在工业互联网领域，中国已培育形成超过 500 个特色鲜明、能力多样的工业互联网平台，部分重点平台服务工业企业近 8 万家。随着新型基础设施建设的加速推进，中国数字经济发展进入高速增长期。

（四）数字经济将助力高水平对外开放

中国数字经济的蓬勃发展将进一步推动数字技术的快速迭代和数字技术链的逐步完善，数据要素作为未来重要的生产生活要素，将充分发挥在扩大对外开放和深化区域合作中的作用。2021 年 11 月，中国正式提出申请加入《数字经济伙伴关系协定》，积极融入国际数字经济发展格局，探索跨境数字治理框架的最佳路径，积极开展多双边数字治理合作，并为协定成员提供广阔市场，拉紧相互的数字经济合作纽带，为各成员的企业和人民带来更大福祉，促进亚太地区乃至全球数字经济开放融合与长期繁荣，力求为全球数字经济发展、贸易投资增长和经济复苏作出积极贡献。

二、数字化转型是中国电力系统面向未来的主旋律

经过 60 多年的发展，中国电力行业在基础设施建设、实现全国联网、解决无电人口等方面取得了举世瞩目的成绩，在整个过程中，信息技术和数字技术的应用贯穿始终。从二十世纪六十年代起，中国电力行业就开始了信息化建设的步伐，信息技术在电力系统各方面融合应用。随着新一轮科技革命和产业变革兴起，以数据为核心生产要素、以数字技术为驱动力的新的生产方式蓬勃发展，电力系统与数字技术进一步深度融合发展，数字电厂、智慧电网、智能用电终端等一批新模式、新业态、新产品的出现，反映出中国电力系统“质与量”的双重提升。

（一）数字技术与电力系统融合日益加深

二十世纪六十年代，计算科学在电力行业开始得到应用。电力行业是技术和装备密集型产业，其特有的生产与经营方式决定了其信息化发展的模式，信息技术最初主要用于电力系统的计算及发电厂和变电站的自动监测、监控等方面。上世纪中下叶，中国电力行业信息化建设进入初期发展阶段，各种中小型计算机开始在电力行业科学计算和工程运算方面得到应用，应用的领域包括电力实验数字计算、工程设计科技计算、发电厂自动监测、变电站所自动监测等方面，为了实现提高电厂和变电站所生产过程的自动化程度、改进电力生产和输变电监测水平、提高工程设计计算速度、缩短电

力工程设计的周期等目的。

二十世纪八十年代，信息技术开始渗透到电力行业各专项业务中。随着计算机系统自动化处理事项的能力的增强，中国电力行业开始大面积的使用计算机系统，信息技术开始服务于电网调度自动化、发电厂生产自动化控制系统、电力负荷控制预测、计算机辅助设计、计算机电力仿真系统等电力各领域内的专项业务，各大电力企业也都开始注重建立管理信息的单项运行系统。

二十世纪末期至二十一世纪初期，信息技术日新月异的发展和国际互联网的出现加速了电力行业信息化进程。网络技术的进展尤其是全球性互联网的诞生和成长，引发了中国电力信息化飞跃式的进步，整个行业开始有计划有步骤的开发建设电力企业管理信息系统，信息技术从应用于操作控制的底层向能为管理人员提供辅助决策的管理层延伸，并且开始从服务单机、单业务、单个企业向服务整个电力供应链和电力系统综合业务方向发展。

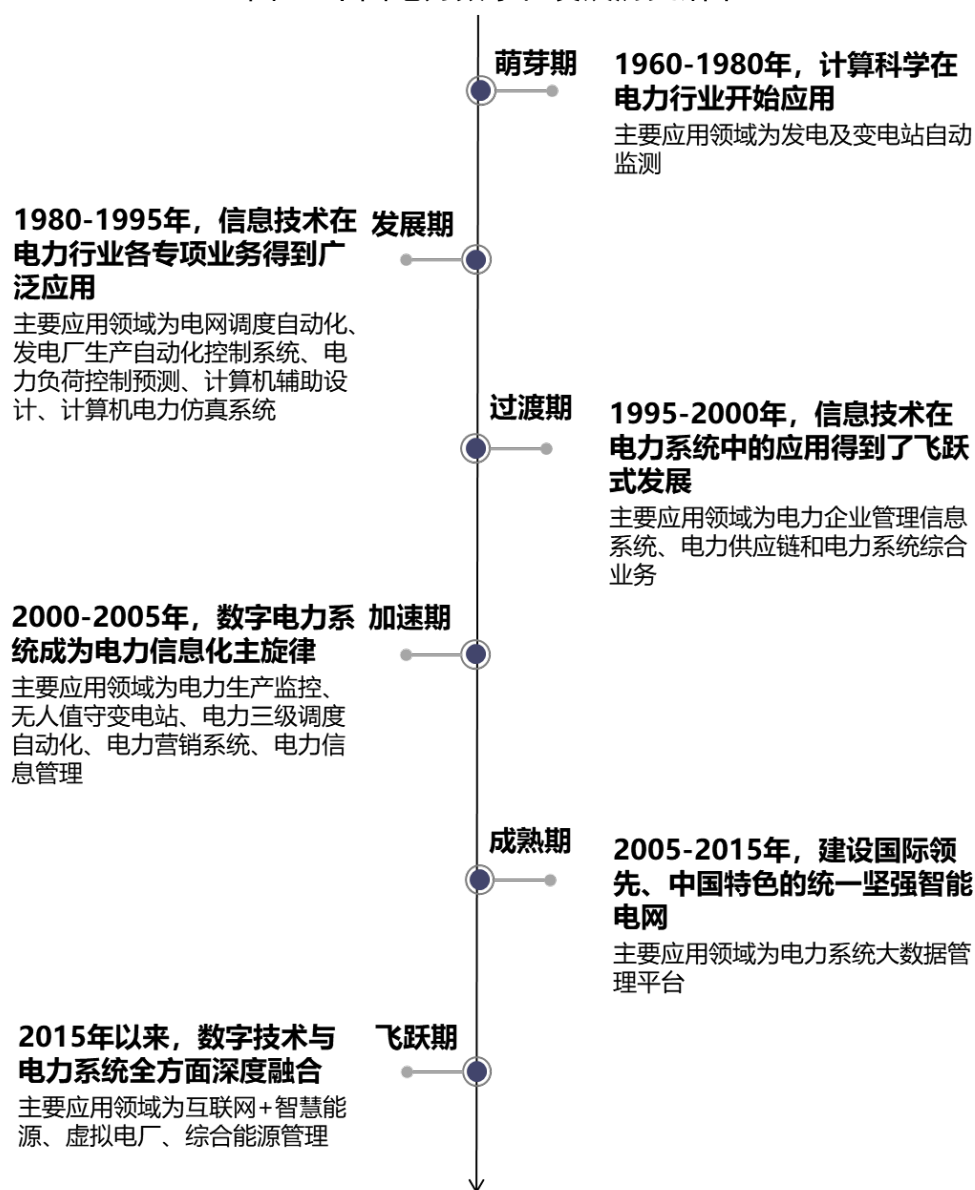
二十世纪初以来，电力系统进入高度数字化、网络化时代。2000年，数字电力系统（DPS）被首次正式提出，以信息处理技术为基础对实际电力系统数字化再现，实现对电力系统的运行控制、分析计算、调度管理、辅助决策、规划以及培训的高度自动化与智能化，也能够实现对电力系统的科学管理和决策、实时安全稳定性评估与改善，助力企业制定

和实行经济运行策略，开展科学研究与系统规划设计。2005年，中国电力行业的信息化基础设施初步完善，整个电力网络系统已见雏形，通信网、数据传输网和信息网络系统的建设初步完成，电力专用通信网初具规模，形成了微波、载波、卫星、光纤、无线移动通信等多种类、功能齐全的通信手段，通信范围覆盖了全国各个省级电网公司。电力生产方面，中国电力生产和电力调度自动化系统应用成熟，火电、水电、原子能发电厂及变电站均配备了计算机监控系统，出现了相当一部分无人或少人值守的水电站和变电站。电网建设方面，各电网企业已经建成 SCADA（调度自动化）、DMS（配网自动化系统）、EMS（能量管理信息系统）等各种电力调度自动化系统，电网的三级调度全部实现了自动化，各级电网公司和供电公司开展了客户服务中心建设，实现业务受理数字化，电力营销系统得到广泛应用。电力信息管理方面，电力行业内部企业的各种管理信息系统建设初具规模。

“十三五”以来，数字技术成为电力系统转型发展的新动能，中国电力系统数字化发展迈向新高度。随着新型基础设施建设在中国各地区全面加速推进，为数字技术在电力系统各领域的加深融合夯实了基础设施保障。在不断发展成熟的云计算、大数据、人工智能、区块链、物联网等数字技术加持下，中国电力行业产生了重大变革，数字技术在电力系统中的电力设备数字化升级改造、特高压输电、微电网、泛

在电力物联网、能源互联网建设等方面均得到了创新示范性应用，显著提升了电力系统的灵活性，提高了能源利用效率，打通电力系统数据孤岛，促进了电力产业链高水平发展。未来，数字技术将在构建更加绿色、高效、智慧的电力系统中发挥更加强大的作用，推动以化石能源为主传统电力系统向以新能源为主的新型电力系统转型加速转变。

图 1 中国电力数字化发展历史沿革



数据来源：赛迪顾问整理，2022.08

（二）技术进步带动电力系统阶段性变革

电力系统数字化发展初级阶段是电力自动化。该阶段以电力生产监测环节中基础性数据采集和对信息通信类技术的应用为主，能够实现电网自动调度、电厂自动化把控体系、电力负荷的侦测、计算机的辅助设计等，助力电力行业发展建立起更加完善的管理制度，使管理体系从单项管理方式发展成网络性质的管理形式。但缺乏对数据的智能分析与处理，且电力生产、传输、消费等环节的信息相对封闭，数据流未形成闭环，数据缺乏一致性，对很多信息难以进行集中访问与处理。

电力系统数字化发展的中级阶段是电力信息化。在这一阶段中，数字技术的整合式应用覆盖了电力生产、传输和消费各环节，实现了终端设备信息的全面感知、电力系统各环节各要素互联互通、人与物之间的协同交流。在此阶段，电力企业通过对闭环数据的深度共享和智能分析，实现对各类资源的优化配置，并且能充分发挥前瞻感知、主动预警和超前防御的风险控制优势，保障电力系统灵活、安全、高效、可靠运行。

电力系统数字化发展的高级阶段是电力智能化。实体模型与数字模型深度融合，现实世界和虚拟世界实时互馈，能通过虚拟世界的数字复盘及演算能力预言并重构现实。电力系统将具有自动化的智慧决策能力，相关元素能够自治自愈，

支撑高度无人化的智慧运作，彻底重塑电力生产、传输和消费方式。随着相关技术与应用场景持续迭代创新，电力数字化将对电力结构、发电效率和电力安全等产生显著影响。

当前，电力系统信息化基础较好，智能电网建设进入引领阶段，并积极探索泛在物联网的数字化技术集成创新，电力行业已经进入电力智能化阶段，是能源数字化的先行领域。数据信息正成为电力领域新的关键生产要素，未来电力数字化发展将呈现出技术多样化、应用个性化、系统智能化、交互网络化、场景平台化等特点。数字经济浪潮下，数字技术不断应用于电力行业，以华为、阿里、中兴等重点电力行业数字技术服务商迅速发展，助力电力系统数字化建设，支撑电力行业实现碳达峰碳中和目标。

表 1 电力数字化转型服务重点企业

序号	企业名称	主要技术和产品	应用场景	行业案例
1	华为	数字电网、数字运营、数字服务领域提供场景化解决方案	电网、电力运维、电力设施	助力数字南网玉溪供电局在行业内部署 MS-OTN 光传输网络
2	腾讯	腾讯云综能工场（产品）能源物联解决方案	智能电网、电力运维、综合能源	
3	阿里	能源智能解决方案，利用人工智能技术为产业解决痛点。	电厂、电网、电力设备	数据机器人提升指挥效率和业务生产力水平
4	浪潮	能源电力大数据监管解决方案	电力监管	蒙能集团依托浪潮云眼搭建了内蒙古自治区首个能源云大数据平台
5	中科曙光	电力大数据一体化解决方案	电力调度智能电网	辽宁电力视频结构化处理平台

《碳中和背景下数字技术赋能的中国新型电力系统》

			光伏发电	
6	华三通信	智慧电厂解决方案	电厂	国家能源集团宿迁智慧电厂建设
7	科林电气	电力系统完整解决方案	电厂、电网、电力基础设施	陕京四线三座压气站变电站综合自动化系统
8	中兴	5G+智能电网解决方案	智能电网	南方电网 5G 智能电网应用示范区
9	威盛集团	能源计量与能效管理	智能电表、合同能源管理	基于区块链的微电网用户能源交易与大数据分析融合集成应用示范项目
10	国电南瑞	能源互联网整体解决方案	智能发电、调控、输电、配电、用电	南京供电公司江北基地综合能源服务
11	中电科安	电力物联网产品和解决方案	配电物联网、智慧用电	新疆新能大厦智能配电系统改造项目
12	太极	智慧能源	电力运维、电力监测	国网上海电力自动化运行管理平台
13	金智科技	智慧能源	智慧电厂	华能金陵电厂二期 2*1030MW 机组 ECMS 系统
14	高新兴	电力物联网	配电、智能巡检、智慧工地	
15	优诺	数字孪生	数字电网一张图、智慧变电站	国网上海电力练塘新视界物联网平台
16	美林数据	大数据	电力数据应用管理	西电集团中低压输配电装备智能制造新模式项目
17	趣链科技	区块链	分布式电力交易	
18	云智环能	能源服务数字化平台	电力需求侧管理、响应	助力山西美锦能源建立电力能效管理平台
19	朗坤	工业互联网	电力运维	助力江苏国信集团建设了能源大数据平台，实现下属 15 家电厂的集中化、集约化管控
20	中天科技	输配电一体化	智能电	研发超长距离输电

		决方案	网、电力设备	线路光纤随机激光传感监测系统
21	国网信通产业集团	信息通信技术	智能电网、能源互联网	电工装备智慧物联平台、数字员工、电力北斗精准服务网
22	东方国信	风电云解决方案	风电	

数据来源：赛迪顾问整理，2022.08

（三）电力数字化发展政策环境持续改善

2002年，国务院发布《关于印发电力体制改革方案的通知》，提出加快电力体制改革，电力行业开始打破垄断，推进全国联网，形成了政府监管下的政企分开、公平竞争、健康发展的电力市场体系。在电力改革环境下，电力企业的经营方式从计划性生产向市场化运营转变，更加专注于提高运营效率，挖掘数据价值，优化电力供应链。2008年以来，一系列政策标准相继出台，主要围绕“电力供应侧的智能电网、电力需求侧的泛在电力物联网、能源互联网”等三个方面，从标准法规、技术攻关、产业发展政策等层面，有力支撑了电力数字化的发展。

表 2 中国电力数字化相关政策

发布日期	政策文件	发布单位	相关内容
2022.5	《关于促进新时代新能源高质量发展的实施方案》	国家发展改革委、国家能源局	加快构建适应新能源占比逐渐提高的新型电力系统，发展分布式智能电网，提高配电网智能化水平
2022.1	《“十四五”新型储能发展实施方案》	国家发展改革委、国家能源局	依托大数据、云计算、人工智能、区块链等技术，开展储能多功能复用、需求侧响应、虚拟电厂、云储能、市场化交易等领域关键技术研究
2021.11	《“十四五”能源领域科技创新规划》	国家能源局、科学技术部	围绕大规模高比例新能源友好并网，推进新型电力系统数字化支撑技术体系建设

《碳中和背景下数字技术赋能的中国新型电力系统》

2021.10	《“十四五”可再生能源发展规划》	国家发展改革委、国家能源局等 9 部门	加快建设可再生能源存储调节设施,强化多元化智能化电网基础设施支撑,提升新型电力系统对高比例可再生能源的适应能力
2021.6	《关于印发能源领域 5G 应用实施方案的通知》	国家发展改革委、国家能源局、中央网信办、工业和信息化部	围绕智能电厂、智能电网、综合能源等方面拓展一批 5G 典型应用场景,研制一批满足能源领域 5G 应用特定需求的专用技术和配套产品,制定一批重点亟需技术标准,研究建设能源领域 5G 应用相关技术创新平台
2021.4	《2021 年能源工作指导意见》	国家能源局	开展电网、电厂等领域智能化建设,推动分布式能源、微电网、多能互补等智慧能源与智慧城市、园区协同发展
2021.2	《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》	国家发展改革委、国家能源局	依托“云大物移智链”等技术,进一步加强“源网荷储”多向互动,通过虚拟电厂等一体化聚合模式,为系统提供调节支撑能力
2020.12	《关于加快构建全国一体化大数据中心协同创新体系的指导意见》	国家发展改革委、中央网信办、工业和信息化部、国家能源局	探索电力网和数据网联动建设、运行机制,进一步降低数据中心用电成本
2020.6	《关于做好 2020 年能源安全保障工作的指导意见》	国家发展改革委、国家能源局	实施配电网建设改造行动计划,推进粤港澳大湾区、长三角一体化等区域智能电网高标准建设
2019.7	《工业领域电力需求侧管理工作指南》	工业和信息化部	利用泛在物联网技术实时监测变配电设备、线路、开关的运行方式及电流、电压等数据
2019.6	《关于推广国家技术标准创新基地(智能电网)建设经验做法的通知》	国家标准化管理委员会	建设智能电网领域国家技术标准创新基地,构建技术标准共建、共享服务平台,形成高效的标准化协作机制,促进科技、标准、产业同步发展

《碳中和背景下数字技术赋能的中国新型电力系统》

2019.5	《关于加强能源互联网标准化工作的指导意见》	国家标准化管理委员会、国家能源局	重点开展能源互联网标准化体系建设，结合智能电网、泛在电力物联网、智慧城市发展，制定能源互动标准
2018.7	《工业互联网平台建设及推广指南》	工业和信息化部	风电、光伏等新能源设备等智能化设备上云用云
2018.3	《2018年能源工作指导意见》	国家能源局	推进配电网改造和智能电网建设，提高电网运行效率
2018.2	《关于提升电力系统调节能力的指导意见》	国家发展改革委、国家能源局	推进能源互联网、智能微电网，构建多层次智能电力系统调度体系，开展智能小区、智能园区等电力需求响应及用户互动工程示范
2017.11	《高端智能再制造行动计划（2018-2020）》	工业和信息化部	鼓励新一代信息技术在电力行业大型机电装备中应用
2017.9	《电力需求侧管理办法（修订版）》	国家发展改革委等六部委	总结推广需求响应试点经验，实施电能替代，提高智能用电水平
2017.1	《国务院办公厅关于创新管理优化服务培育壮大经济发展新动能加快新旧动能接续转换的意见》	国务院办公厅	建立全面接纳高比例新能源电力的新型电力系统
2016.12	《关于印发“十三五”国家信息化规划的通知》	国务院	推动信息技术与能源技术融合渗透，推广能源互联网
2016.11	《电力发展“十三五”规划》	国家发展改革委、国家能源局	升级改造配电网，推进智能电网建设，推广应用光伏系统集成及控制技术、海上智能风电机组
2016.11	《关于印发“十三五”控制温室气体排放工作方案的通知》	国务院	加强智慧能源体系建设，推行节能低碳电力调度，提升非化石能源电力消纳能力
2016.10	《国务院办公厅转发国务院信息化工作办	国务院办公厅	在电力行业中选择一批重点企业，建立信息技术应用示范工程和示范生产线

《碳中和背景下数字技术赋能的中国新型电力系统》

	公室关于振兴软件产业行动纲要的通知》		
2016.8	《关于印发“十三五”国家科技创新规划的通知》	国务院	聚焦部署大规模可再生能源并网调控、大电网柔性互联、多元用户供需互动用电、智能电网基础支撑技术等重点任务,实现智能电网技术装备与系统全面国产化
2016.8	《工业领域电力需求侧管理专项行动计划(2016-2020年)》	工业和信息化部	鼓励工业园区建设电力需求侧管理平台,引导工业企业完善电力需求侧管理制度建设,加强用电设备改造和信息化建设
2016.2	《关于深入推进新型城镇化建设的若干意见》	国务院	实施“宽带中国”战略和“互联网+”城市计划,发展智能电网
2015.11	《关于积极发挥新消费引领作用加快培育形成新供给新动力的指导意见》	国务院	调整完善有利于智能微电网等新基础设施建设配套制度
2015.8	《关于加快配电网建设改造的指导意见》	国家发展改革委	提高新能源接纳能力,推动智能互联,打造服务平台,加快建设现代配电网设施与服务体系
2015.7	《配电网建设改造行动计划(2015-2020)》	国家能源局	到2020年,中心城市(区)智能化建设和应用水平大幅度提高
2015.7	《国务院关于积极推进“互联网+”行动的指导意见》	国务院	突破分布式发电、智能微网、主动配电网等关键技术,构建智能化电力运行监测、管理技术平台,使电力设备和用电终端基于互联网进行双向通信和智能调控
2015.7	《关于促进智能电网发展的指导意见》	国家发展改革委 国家能源局	推广建设智能变电站,根据不同地区配电网发展的差异化需求,部署配电自动化系统,鼓励发展智能测控等主动配电网技术
2015.3	《关于进一步深化电力体制改革的若干意	中共中央 国务院	提高发达地区的用电质量及信息化程度,通过运用现代信息技术促进供需平衡和节能减排

《碳中和背景下数字技术赋能的中国新型电力系统》

	见》		
2015.3	《智能电网项目建设意见》	国家电网	组织开展输变电设备监测系统和配电自动化系统推广建设、智能变电站、用电信息采集系统建设
2014.11	《关于印发能源发展战略行动计划（2014-2020年）的通知》	国务院办公厅	确定分布式能源、智能电网等重点创新领域，开展重大工程示范
2014.8	《关于促进智慧城市健康发展的指导意见》	国家发展改革委等八部委	加快电力等公用基础设施的智能化建设
2013.10	《关于印发国家卫星导航产业中长期发展规划的通知》	国务院办公厅	在能源(电力)、金融、通信等重要领域，全面应用北斗等卫星导航系统
2013.9	《国务院办公厅转发电子振兴领导小组关于搞好中国计算机推广应用工作汇报提纲的通知》	国务院办公厅	四大电网引进系统初步实现自动发电控制和经济调度控制功能，并与国家调度的计算机联机进行远程数据通信
2013.9	《关于加强城市基础设施建设的意见》	国务院	推进城市电网智能化，加强城市智能配电网关键技术研究
2013.8	《关于促进信息消费扩大内需的若干意见》	国务院	支持公用设备设施的智能化改造升级，加快实施智能电网工程
2013.7	《关于促进光伏产业健康发展的若干意见》	国务院	积极发展融合先进储能技术、信息技术的微电网和智能电网技术，提高电网系统接纳光伏发电的能力
2013.5	《关于印发“十二五”国家自主创新能力建设规划的通知》	国务院	加强电力需求侧管理技术、电网资源优化技术等开发与推广能力
2013.2	《关于印发循环经济发展战略及近期行动计划的通知》	国务院	加快智能电网建设和电网节能技术改造

2012.7	《关于大力推进信息化发展和切实保障信息安全的若干意见》	国务院	加快实施智能电网、智能交通等试点示范,引导智慧城市建设健康发展
2012.7	《关于印发“十二五”战略性新兴产业发展规划的通知》	国务院	加快建设适应新能源发展的智能电网及运行体系
2012.1	《关于印发工业转型升级规划(2011—2015年)的通知》	国务院	推进物联网在电网等基础设施中的应用
2012.1	《关于进一步促进贵州经济社会又好又快发展的若干意见》	国务院	加快建设毕节—大兴北部通道、兴仁—独山南部通道,形成覆盖全省的坚强电网
2012.1	《关于印发“十二五”控制温室气体排放工作方案的通知》	国务院	研发智能及绿色电网技术
2011.9	《关于印发“十二五”节能减排综合性工作方案的通知》	国务院	开展智能电网试点
2011.3	《关于落实政府工作报告重点工作部门分工的意见》	国务院	推进传统能源清洁利用,加强智能电网建设
2010.3	《关于落实政府工作报告重点工作部门分工的意见》	国务院	加强智能电网建设
2009.9	《关于进一步实施东北地区等老工业基地振兴战略的若干意见》	国务院	率先在东北电网开展智能电网建设试点
2008.3	《关于印发中国应对气候变化国家方案的	国务院	重点研发电网调度自动化技术

	通知》		
--	-----	--	--

数据来源：赛迪顾问整理，2022.08

（四）电力系统数字化未来重点逐渐明晰

智能电网——2009 年国家电网首次提出智能电网概念，2010 年 3 月《政府工作报告》明确提出“加强智能电网建设”，并将其上升为国家发展战略。“十二五”期间，为推动智能电网建设发展，中国从政策标准的角度出发，相继出台了《关于促进智能电网发展的指导意见》等一系列政策文件，分别从智能电网顶层规划、示范试点、技术创新与攻关等方面，全面为智能电网建设提供保障。2016 年，国家发展改革委、国家能源局联合发布《电力发展“十三五”规划》，进一步提出要升级改造配电网和推广先进技术应用，全面推进智能电网建设。2019 年，国家标准化委员会发布《关于推广国家技术标准创新基地（智能电网）建设经验做法的通知》，明确提出建设智能电网领域国家技术标准创新基地，构建技术标准共建、共享服务平台，形成高效的标准化协作机制，促进科技、标准、产业同步发展。截至目前，中国智能电网发展逐步迈入成熟阶段，电力系统输配电各环节智能化与自动化水平大幅提升，供电可靠性显著改善，特高压网络已达到国际领先水平。

泛在电力物联网——随着中国电力行业市场化改革的深入推进，对电力系统的管理模式逐步由单一性的生产侧管

理，逐步向下游需求侧延伸，伴随着电力系统的需求侧响应能力建设的持续推进，泛在电力物联网应运而生并快速发展。2015年，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》，明确提出开展电力需求侧管理和能效管理，通过运用现代信息技术、实施需求响应等，促进供需平衡和节能减排。2016年，工业和信息化部发布《工业领域电力需求侧管理专项行动计划（2016-2020年）》，明确提出分别从工业园区和工业企业两个方面提升工业领域用能效率和需求响应能力，鼓励工业园区构建能源服务体系，创新综合能源服务模式，引导工业企业加强用电设备改造和信息化建设，促进电能替代。2017年，《国家能源生产和消费革命战略（2016-2030）》《电力需求侧管理办法（修订版）》等政策文件相继出台，明确提出开展工业领域电力需求侧管理专项行动，提高智能用电水平，并形成示范经验在交通、建筑、商业领域推广。2019年，工业和信息化部发布《工业领域电力需求侧管理工作指南》，提出用能单位提高电能信息化管理水平，参与“源—网—荷—储”一体化智能调节，通过智能电网和能源互联网等平台，逐步扩大电力需求侧和电源侧的双向互动，实现电能供需耦合。

能源互联网——2008年，德国首次出现“能源互联网”概念，并在2013年前完成了6个不同类型的综合能源示范项目。2014年，“能源互联网”的概念在中国首次提出。2015

年 9 月 26 日，习近平总书记在联合国发展峰会上倡议“探讨构建全球能源互联网，推动以清洁和绿色方式满足全球电力需求”。“十三五”时期，中国对能源互联网发展共识逐步增强，产业政策标准不断完善。2016 年，国家发展改革委、国家能源局、工业和信息化部联合发布《关于推进“互联网+”智慧能源发展的指导意见》，明确提出从两个阶段推进能源互联网多元化、规模化发展。2017 年，在全球能源互联网推动下，中国稳步推进能源互联网建设，加快能源互联网示范项目建设，积极研究提出配套政策措施，支撑能源互联网新模式、新业态发展。截至 2017 年，全国 55 个首批能源互联网示范项目已陆续开工，中国能源互联网进入实操阶段。2021 年，中国加大对综合能源项目的支持，能源互联网建设蓬勃发展，《关于加快建立健全绿色低碳循环发展经济体系的指导意见》《关于加强自由贸易试验区生态环境保护推动高质量发展的指导意见》《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》等一系列政策相继出台，鼓励园区、自贸区建设电、热、冷、气等多能协调互济的综合能源项目，支持各级源网荷储一体化项目的开发，提升电力系统平衡力及能源利用效率。

数字低碳发展——为了应对日益严峻的全球气候变化问题，世界各国加快推进能源结构改革，高度电气化以及电力清洁化是当前最主要演进方向，这一过程为未来电力系统

的发展带来许多新的挑战。新能源的大规模并网，给电力系统的调度运行中电力消纳、电网安全、稳定保供等环节带来新的变化。中国产业结构全面调整和经济高质量发展，使用能方式更加多样，负荷特性更趋分散、灵活多变，对能源品质、传输配送、时空衔接提出更高要求，能源消费形态从被动式消费到主动式消费转变，能源供给从清洁占比较低到全面清洁转变，能源技术从传统技术到新兴技术融合转变，能源体制从以计划为主到以市场为主的转变。面对低碳发展新形势和新变化，数字技术将在电力系统发展中发挥更全面更显著的作用，数字化和低碳化协同共进，将是中国电力系统未来发展的主要任务。

三、构建新型电力系统是实现“双碳”目标的必经之路

2020年9月22日，中国在第七十五届联合国大会首次提出碳达峰碳中和目标，并在同年12月的气候雄心峰会上进一步明确了具体减排指标“到2030年中国单位GDP二氧化碳排放将比2005年下降65%以上，非化石能源占一次能源消费比重达到25%，风电、太阳能发电总装机容量达到12亿千瓦以上”。由此可见，能源领域是中国实现“双碳”目标的重点，而新能源电力发展将是能源领域结构性改革的重要抓手。2021年3月，中央财经委第九次会议提出，构建以新能源为主体的新型电力系统，这为中国电力系统走上“双碳”之路提供了重要战略指引。

（一）电力系统将面临多层次更大挑战

相较于依赖化石能源的传统火电，新能源电力在绿色低碳方面的优势不言而喻，大规模新能源替代是电力系统低碳转型的必由之路。未来十年，大规模的新能源电力替代传统火电是必然趋势，这个过程所带来的变化值得关注。

新能源电力大规模替代将给电力安全稳定带来挑战。以风电和太阳能发电为代表的新能源电力，其发电能力和效率很大程度上受自然气候条件影响，电力供给具有间歇性、波动性和反调峰性等特征，当其在电力供给中的比重持续上升时，所带来的电力供给安全隐患也愈发明显。例如美国在2019年10月和2021年2月发生的加州和得州严重大规模停电事件，新能源电力在两地的电力系统中均占据了20%~30%的比重，这部分电力的突发性断供引发了整个电力系统的崩溃，从而对经济、社会、民生造成了一系列影响。因此，面对未来大规模新能源电力融入所带来的电力系统复杂型快速提升的压力，寻求合理有效途径保障电力安全稳定，是未来中国电力系统低碳转型过程中要解决的问题之一。

新能源电力大规模替代将重塑电力市场供需平衡。新能源电力发展具有明显的地域性特征，例如中国“三北”和西南等风光资源充沛地区是新能源电力发展的重点地区，装机规模和跨区通道能力不匹配，电力消纳压力尚存。虽然目前通过政策支持、技术创新和市场调节等一系列举措，有效缓

解了新能源电力并网问题，减少了弃风、弃光现象的出现，但未来新能源电力的倍增又将在这方面带来新的更大挑战。另外，当前电力系统的供需关系正在重塑，供需互动引发了电力市场发生变革，特别是大数据中心、5G 基站、新能源充电桩等“用能大户”的出现对电力系统提出更高要求，传统的以销定产机制将逐步被以需定产取代，固化的价格机制也将被打破。因此，新能源电力如何发挥后发优势，在电力替代过程中顺利融入电力市场变革并在其中发挥积极作用，将影响到中国电力系统低碳转型进程。

新能源电力大规模替代将引发电力行业系统性变革。电力系统经过几十年的发展，传统火电在其中占据着核心地位，至今仍是经济社会各行各业电力供给的最主要来源。近年来，在国家大力扶持下，新能源电力快速发展，在电力市场中逐步占据了一席之地，并逐渐对传统火电产生影响。当前，中国电力系统低碳转型将加速实施，电力系统对新能源的需求将全面释放，未来新能源电力更快更强有力的涌入将引发电力行业系统性变革。一方面，在中国电力系统中起到支柱作用的大型电力企业深耕传统火电多年，历史积淀深厚，在面对即将到来的大规模新能源和火电的涨落，无疑将在运营模式、资源配置、技术革新等方面面临不小的转型压力。另一方面，新能源电力市场需求激增会吸引更多的企业入场，将激发新能源领域更加激烈的竞争，为新能源中小企业发展带

来更大压力。

（二）数字技术赋能将发挥更关键作用

近年来，中国数字经济浪潮的兴起与数字技术的发展在全经济社会领域碳减排方面发挥了显著的积极作用，2005-2020年间，通过数字技术在其他行业的广泛渗透，使中国二氧化碳排放量减少14-17亿吨，这相当于全国2020年碳强度减排目标的13-18%。未来在构建以新能源为主的新型电力系统过程中，数字技术必将发挥更关键作用。在电力生产层面，通过先进数字技术的应用，进一步降低火电发电过程中的供电标准煤耗，提升火电能量转化效率并增强火电运行的灵活性，优化清洁能源运行控制策略，提高风电光电并网的稳定性和可靠性，加快提升清洁电力在电力结构中的比例。在电力网络层面，加强先进数字技术同电网的融合，通过先进输电网络建设、电网智慧化改造、泛在电力物联网建设等途径，降低电力远距离传输损耗并提高电网智能化调度水平。在电力消费层面，通过数字技术创新用电管理模式，优化分布式能源上网交易规则，建立智能建筑-电动汽车-智能充电桩-电网信息能量流动通道，发展用电负荷快速灵活响应控制系统，有效指导工商业的错峰合理用电并缓解电网调峰压力。

（三）数字基建将塑造电力供需新格局

近年来，以大数据中心、5G基站、新能源充电桩等为代表的“数字基础设施”建设大规模落地实施，数字“新基建”

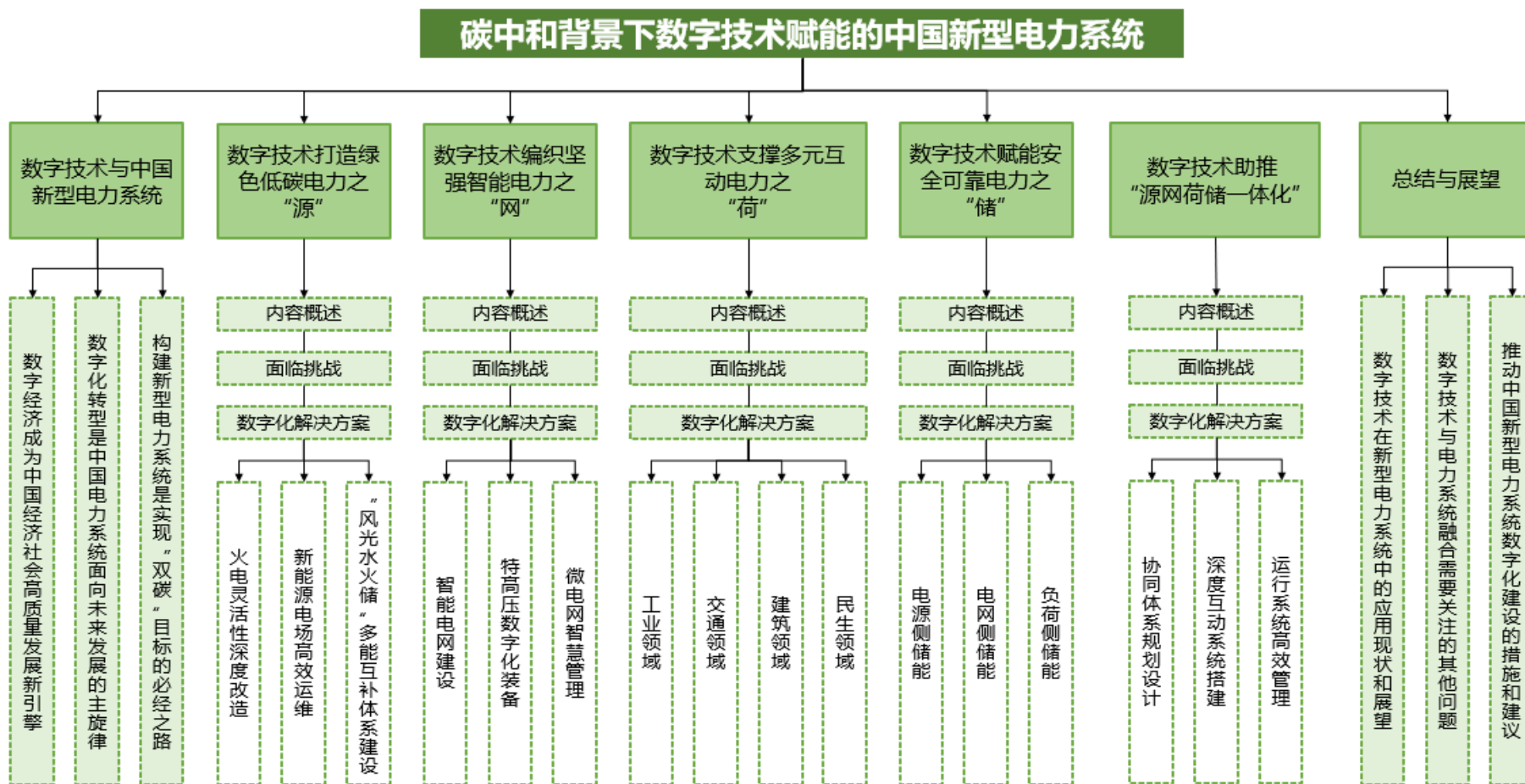
的高能耗对电力系统提出更高用电需求。2020年，中国已建成5G基站数量达71.8万座，总能耗可达约239.0亿千瓦时/年，占全年全社会用电量的0.3%。随着5G网络建设步入高速建设期，2025年覆盖全国的5G网络将基本建成，基站数量也将达到525万座，届时5G基站总用电能耗将达到1747.6亿千瓦时/年，占全社会用电量的2.0%。2020年，中国数据中心机架数量达到240万架，总能耗可达1314.0亿千瓦时/年，占全社会用电量的1.8%。根据近年内中国对数据中心投资规模的增长，可以预见未来几年中国数据中心建设仍将处于快速发展期，预计到2025年，中国数据中心机架数将突破830万架，总能耗将达到4362.5亿千瓦时/年，占全社会用电量的4.9%。在国家支持下，中国已经成为全球新能源汽车最大生产国和最大市场，新能源汽车保有量与日俱增，导致对新能源充电桩的需求愈加旺盛。2020年，中国新能源充电桩保有量达到168.1万个，按车桩比1:1估算，预计到2025年，中国新能源充电桩保有量将达到2100万个。由此可见，5G基站、大数据中心、新能源充电桩将是未来用电增长的新动能，对电力系统的分布、输送、供需调节形成新的庞大需求。

四、报告的目的和框架

本研究报告将基于国家“双碳”战略目标和数字经济发展主要背景，以中国电力系统低碳转型为研究主题，重点关注中国未来构建以新能源为主的新型电力系统过程中面临

的关键问题，系统分析数字技术在解决这些问题过程中所发挥的赋能作用，并探索未来数字技术与新型电力系统能够更深层次融合的潜在应用场景。本研究的主要目的是将中国电力系统中正在应用的、亟待推广的以及未来潜力突出的先进数字技术进行全面系统梳理和展望，以期能够将先进数字技术在电力行业进行更广泛的推广，并促进未来数字技术在新型电力系统建设运行中发挥更大作用。

图 2 报告内容框架图



第二章 数字技术打造绿色低碳电力之“源”

一、内容概述

打造绿色低碳的电源体系是构建以新能源为主的新型电力系统的首要环节，本章内容总结了电源结构低碳转型面临的三大挑战，即火电调峰能力需要进一步提升、新能源电力并网难度大、新能源电源安全稳定性等三个方面，并基于此提出了数字化的解决方案，包括数字技术在火电灵活性深度改造、新能源电场高效运维、“风光水火储”多能互补体系建设中的应用，同时结合相应的案例应用进行分析，说明当前相关数字技术应用现状，提出前瞻性应用场景展望，最后针对数字技术在电源侧应用的不足之处提出相关措施建议。

二、面临挑战

（一）火电功能转换需要调峰能力进一步提升

近年来，中国新能源一直保持稳定发展态势，新能源电力装机规模逐年上升，截至 2020 年，风电与光伏装机容量分别为 2.82 亿千瓦和 2.53 亿千瓦，年发电量达到 4665 亿千瓦时和 2611 亿千瓦时，稳居世界领先地位。随着中国“双碳”工作的持续推进，以风电、光电为主的新能源电力将继续维持高速增长，这对电力系统调峰能力提出了更为严格的要求。在各类电源调峰能力方面，常规水电调峰能力较差，核电由于安全原因不参与调峰，抽水蓄能、气电等灵活性电源比例

较低，2020年抽水蓄能在建装机和运行装机容量共6236万千瓦，在电源总装机容量中占比仅为2.83%，难以提供足够的调峰能力，因此火电将在未来长时间里肩负起电力系统调峰的重任，将是电力系统灵活性的重要保障。然而，现阶段中国火电机组平均调峰能力只有50%，其中“三北”地区供热机组的调峰能力仅为20%，与德国、丹麦等欧洲国家相比仍有较大差距¹，还不具备深度调峰能力。未来在中国新型电力系统中，随着电源结构新能源比重增大，火电将由“主力电源”向“调节保障性电源”转变，1000MW以上大容量超临界、超超临界机组将逐步替代600MW以下小容量机组，火电机组装机总量也将大幅缩减，这将使得电力系统调峰面临前所未有的压力。

表3 德国、丹麦火电灵活性情况

电厂类型	爬坡率 (%/min)	最小出力(%)	热态启动时间 (h)	冷态启动时间 (h)
硬煤火电	1.5/4/6*	40/25/20	3/2.5/2	10/5/4
褐煤火电	1/2.5/4	60/50/40	6/4/2	10/8/6
燃气联合循环	2/4/8	50/40/30	1.5/1/0.5	4/3/2
燃气单循环	8/12/15	50/40/30	<0.1	<0.1

注：*表示一般值/先进值/目标值

数据来源：赛迪顾问整理，2022.08

（二）新能源电力不确定性导致并网难度加大

受气象情况、地理条件等众多因素的影响，新能源发电

¹ 潘尔生,田雪沁,徐彤,王新雷.火电灵活性改造的现状、关键问题与发展前景[J].电力建设,2020,41(09):58-68.

功率难以准确预测，进而影响电力系统平稳运行。风光资源随机波动性强，导致新能源电力独立向负荷提供可靠供电的能力偏弱，无法有效支撑电网电压与频率，较难满足电网安全稳定运行要求²。新能源发电设备的低抗扰性、强耦合性和弱支撑性，数量巨大的新能源发电单元与电网的协调控制难度大。新能源电站容量较常规电站小，电站数量远多于常规电站，且新能源电站之间的出力相关性较常规电站更强，使新能源发电优化调度难度更大。综合以上因素，新能源电力整体呈现预测难、保障难、控制难、调度难等特征，相比于传统火电，新能源电力并网难度较大。

（三）新能源电源结构面临安全性稳定性挑战

新能源大规模并网之后，保障新型电力系统安全稳定运行是面临的主要挑战。相比而言，传统火电为主的电力系统是一个实时平衡的同步系统，具有运行平稳和惯性大的特点，随着风电、光电等依靠电力电子的发电设备大规模接入电力系统中，传统电力系统固有特性将发生根本变化，未来电力系统将向电力电子化转变，其形态和结构趋于复杂³，电网将呈现低转动惯量、宽频域振荡等新的动态特征，故障连锁脱网与电能质量问题将逐步凸显。由于换流器抗干扰能力弱，在可再生能源发展早期在全球范围便已发生了大量大规模

² 吕志盛, 闰立伟, 等. 新能源发电并网对电网电能质量的影响研究[J]. 华东电力, 2012, 40(2): 251-256.

³ 张军军. 中国新能源发电并网问题及展望[J]. 工程建设标准化, 2016(11): 16-17.

脱网事故。同时，新能源发电的大规模并网将给后端电网的运行、管理带来新的挑战，新能源自身间歇性、随机性的特点给电网功率平衡和运行控制带来困难，其分布式的渗透使配电网由功率单向流动的无源网络变为功率双向流动的有源网络。随着新能源比例的提高，全网惯性水平降低，直接影响系统故障时的电气量变化率，影响电力系统的稳定能力。

三、数字化解决方案

（一）火电灵活性深度改造

火电灵活性改造是火电机组充分响应电力系统的波动性变化，实现降低最小出力，从而增加调峰能力的过程。其改造方式主要是锅炉设备灵活性改造、汽轮机适应性提升以及机组的精准控制与监测。现阶段中国火电机组全面改造进程缓慢，设备和技术改造潜力有限，且投入改造的经济成本较高。大数据、人工智能等数字技术的应用能够进一步激发改造潜力，基于数据挖掘和人工智能算法，构建优化决策模型，指导火电机组进行灵活性深度改造，并能在改造成本投入较小的情况下实现深度调峰。整体来看，通过数据分析挖掘、数字化管理能够高效指导煤电厂灵活性深度改造，提高2%的发电效率，带来直接碳减排量达到2.5亿吨。

锅炉设备改造——锅炉灵活性深度改造需要解决燃烧稳定性、制粉系统稳定性、换热水动力稳定性、空预器低温腐蚀及泄漏、脱硝运行安全等问题，其中锅炉燃烧稳定性是

影响锅炉深度调峰的主要因素。基于数据挖掘技术的应用，对影响锅炉燃烧稳定性的各类因素数据（燃料特性、一次风、二次风、温度）进行“加工分析”，能够得出多个因素之间潜在联系和规律，从而指导锅炉深度调峰，保障安全高效运行。

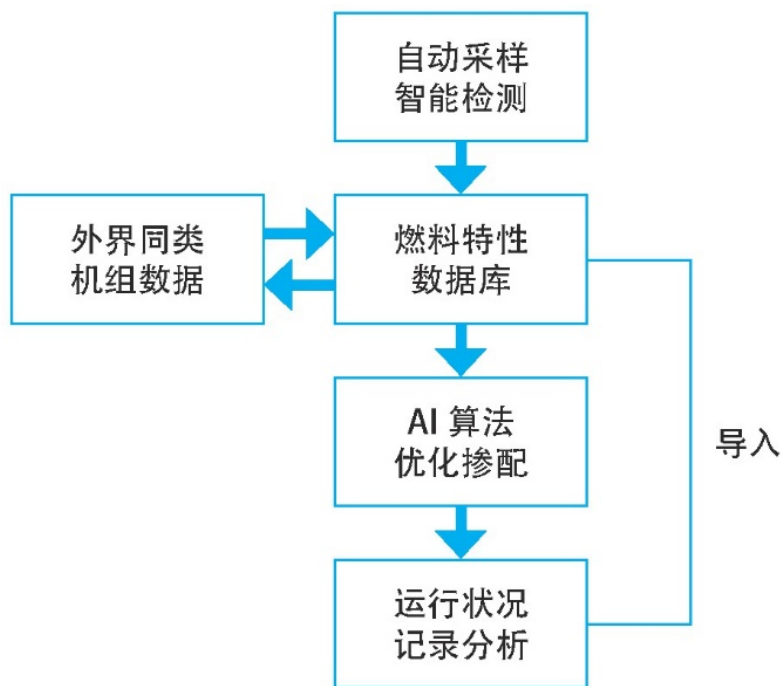
应用场景一：燃料智能掺烧

燃料特性是最低负荷的决定性因素，入炉的掺配掺烧煤种不合理将导致燃烧稳定性下降，甚至锅炉熄火、制粉系统故障、锅炉结焦严重等情况。建立基于大数据平台的“燃料智能掺配”系统，指导入炉燃烧煤种的选配，在机组深度调峰前，预先设定合理的燃烧煤种，以保证锅炉运行的安全性和经济性。

该系统架构包含五个功能模块，首先燃料入厂前经过机械化自动采样和全成分智能检测，保证全面掌握煤质特性，其次把相关数据导入燃料特性数据库，根据机组负荷预测和设备运行状态等数据信息，基于数据挖掘和机器学习算法，构建燃料优化模型，对煤种掺混方式和比例进行实时优化，指导燃料入炉工作。最后对燃烧不同煤种时火焰燃烧状况、辅机运行状态、炉内热力参数进行记录分析，同时反馈进入燃料特性数据库，不同发电企业的外界同类型机组能够实现数据共享。通过大数据技术不断挖掘燃料燃烧过程中的数据规律，不断优化智能掺配模型，提升入炉煤种配比精准度，锅炉燃烧稳定性得以显著提升。当前，

该项技术在国家能源集团、国家电投、华电集团等旗下多个智能化标杆电厂已有应用，与传统的火电厂燃烧系统相比，智能掺烧技术的应用能够降低入炉热值差 0.2 MJ/kg，一定程度缓解了煤炭燃烧不充分问题，降低了单位发电煤耗，从而有效实现节能减排的效果。同时，火电厂人力和燃料成本显著减少，按照单厂区年耗煤 300 万吨和标煤单价 300 元/吨左右进行测算，每年可节省燃料成本约 600 多万元，减少劳动用工 20 余人。

图 3 基于大数据的智能掺烧系统



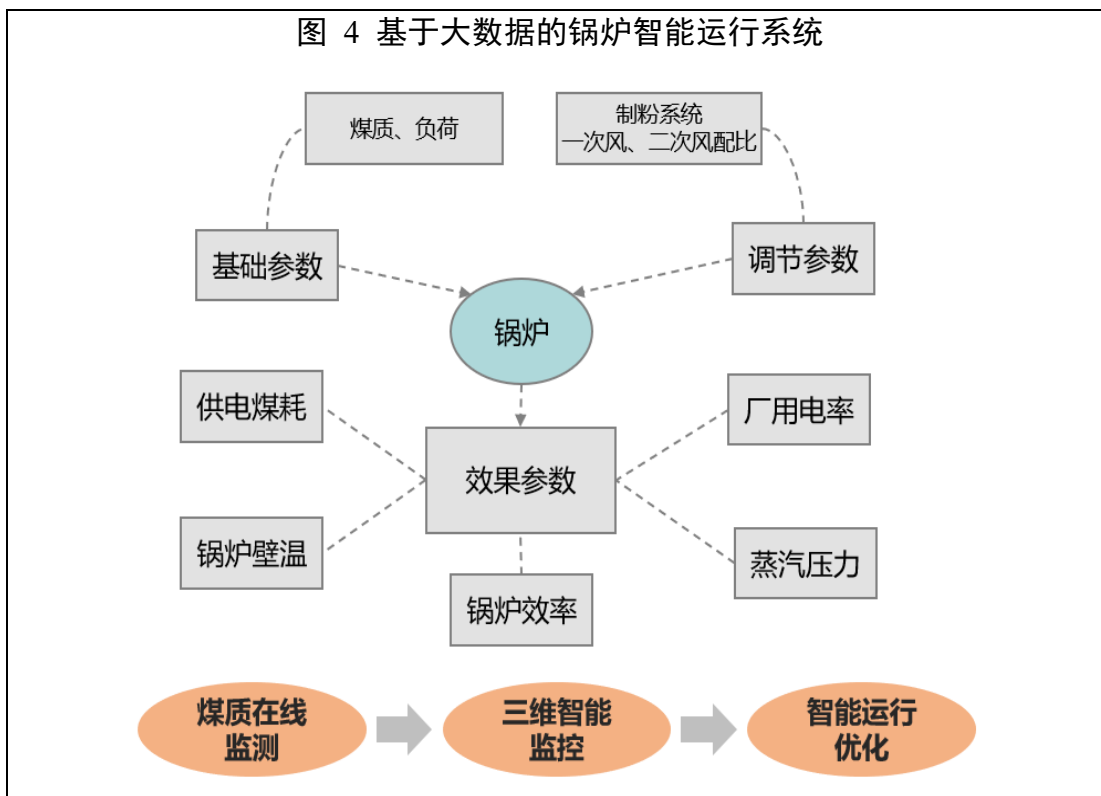
应用场景二：基于大数据的低负荷稳燃潜力挖掘

低负荷稳燃技术是解决锅炉燃烧不稳定的又一项关键技术，基于燃料属性、机组结构、运行方式等低负荷稳燃的影响因素，从源头入炉煤质到终端锅炉运行，通过大数据平台，形成“煤质数据在线监测—三维智能监控—智能运

行优化”智慧决策体系，充分利用锅炉燃烧过程中所产生的数据价值，优化锅炉运行，助力锅炉灵活性深度改造。

该智能运行系统包括三个部分，一是煤质数据智能监测，通过气固两相流装置实时采样获取运行数据，利用定量光谱分析技术，对元素、煤粉粒度实时在线测量，并通过计算机软件实现快速高效在线分析计算功能。二是锅炉运行智能监控，对锅炉运行中的安全性、环保性及经济性各项指标进行监测，例如炉膛壁温、污染物排放量、厂用电率、供电煤耗等，并及时反馈优化。三是锅炉运行智能辅助，根据燃烧实验数据及电厂运行经验数据，构建低负荷优化运行案例库，指导锅炉高效运行。当前，针对机组灵活性改造问题，低负荷稳燃技术是重要的发展方向，通过大数据应用赋能技术改造潜力巨大，当前该系统在国家能源集团、国家电投、大唐集团等旗下火电厂 600MW 以上机组已有部分应用，能够提升机组 30%-40%的调峰能力。

图 4 基于大数据的锅炉智能运行系统



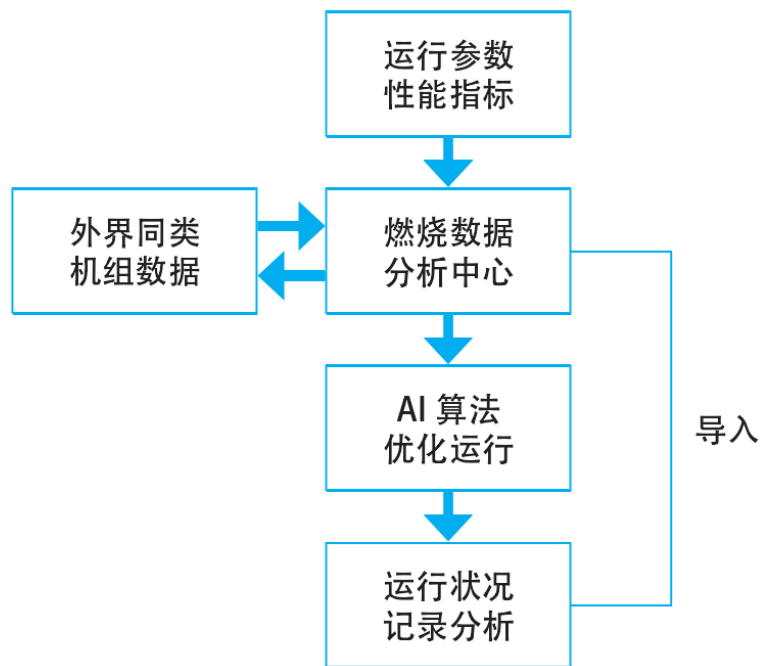
应用场景三：燃烧数据分析

机组在进行深度调峰时，锅炉动力场包括一次风、二次风、燃料量均下降，燃烧温度降低，脱硝、脱硫、电除尘等减排设备运行参数改变，常规工况下的运行规范已很难全面指导此状态下的运行操作。各发电企业目前采取的措施主要是通过试验或试运行摸索规律，在实践中积累经验，但通过运行人员摸索出的规律具有很强的局限性和主观性，很难精确把握客观规律，最大程度地保证机组运行安全经济，同时单一发电企业的摸索和积累过程缓慢，消耗成本巨大。基于大数据平台的“燃烧数据分析中心”，可结合最新的计算机技术指导机组深度调峰的运行工作。

锅炉包括相关辅机的运行参数和性能指标实时导入燃

烧数据分析中心进行处理分析，运用机器学习算法并结合外界同类机组数据进行燃烧建模，根据模型给出最优控制参数，指导深度调峰下的运行工作，同时记录运行状况反馈回燃烧数据中心。现阶段国内火电厂仅有小部分应用案例，例如大唐集团开发的锅炉智能燃烧优化系统数据平台，投入运行后锅炉效率提高 1%；黔西电厂 3 号 300MW 机组和华电湖北襄阳 1 号 300MW 燃煤发电机组应用锅炉燃烧在线优化控制系统，分别提高锅炉效率 0.3%-2%，实现锅炉深度调峰稳燃负荷降低 5%-10%。

图 5 燃烧数据分析中心架构



汽轮机适应性提升——汽轮机及其热力系统的运行经济性是影响机组调峰期间煤耗指标的最主要因素，在变工况的条件下，汽轮机通流部分的气动特性与设计值会发生较大偏离，设备的安全性和寿命损耗也需得到准确的评估，因此

提升汽轮机对深度调峰的适应性能力是关键问题。通过大数据技术的应用，构建预测诊断模型，建立基于大数据平台的“汽轮机诊断分析优化中心”，能够指导机组深度调峰时汽轮机的运行工作。

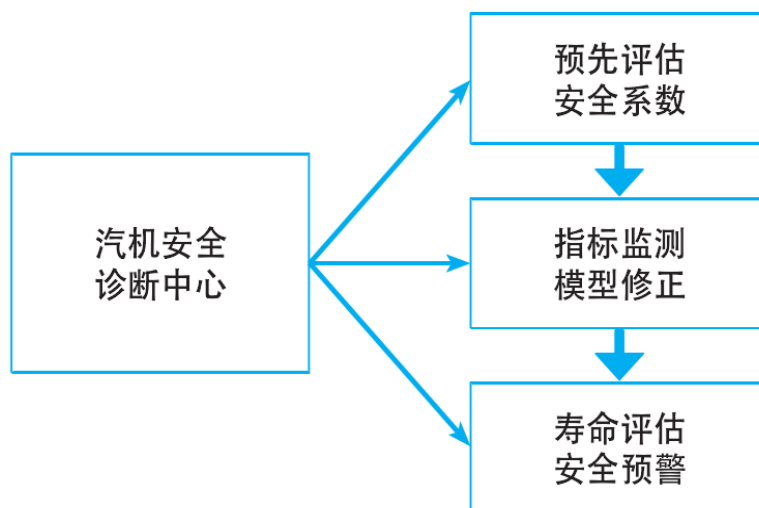
应用场景：汽轮机运行智能优化

汽轮机滑压运行智能优化——为确保火电机组运行经济性，汽轮机的滑压运行曲线需根据深度调峰状况重新拟定，包括重新确认滑压运行经济负荷起止点，滑压运行压力，确保汽轮机在调峰期间调门开度合理，进汽节流损失小，主蒸汽参数稳定。目前主要采用试验方法对汽轮机滑压方式进行优化，试验过程繁杂，并且在调峰状态变化或机组调速系统改造后需重做试验。结合大数据平台开发“汽轮机滑压运行智能优化”系统，根据负荷预测和机组运行状况，能够对滑压曲线进行预见性地修正，保证机组在常用工况点经济性最优，满足 AGC 等调控系统的要求，还可以拟合并分析同类型机组的滑压曲线，结合自身设备状况进行仿真分析。

汽轮机安全智能诊断——深度调峰给汽轮机带来多种潜在的安全问题，如排汽温度升高引起的缸体变形和轴承位置变化可能导致汽轮机轴系振动增大，低压末级动叶易诱发颤振，低压叶片水蚀状况可能加重，滑压运行加重材料低周疲劳进而影响机组寿命等。建立基于大数据平台的

“汽轮机安全智能诊断中心”能够在机组深度调峰前就针对以上安全隐患开展评估，贯穿机组的全寿命周期，制定相应的风险应对策略。该项技术运用先进的数值模拟方法对机组的典型工况进行通流计算，对通流部分的热力特性、流动特征和热应力状态全面掌握，运用流固耦合算法计算低压缸末级叶片的水蚀和颤振状况，经过与实际运行状况的对比来评估设备的安全性，安全预警的准确度随着数据量的累积会不断提升。

图 6 汽轮机安全智能诊断中心架构



辅机运行智能控制——火电机组的深度调峰会影响到辅机运行的安全性和经济性，针对深度调峰时辅机运行安全和节能的需求，运用大数据挖掘和分析技术，收集同类型机组和同一机组不同工况下的运行数据，经过学习型算法的优化计算，拟合出各类辅机的工作曲线或工况点参数，并且可嵌入机组控制系统，实现自动跟踪控制。现阶段利用数字技术提升汽轮机适应能力的实际应用案例很少，尚

处于大规模试验研究阶段，例如国家能源集团旗下火电厂 300MW 燃煤机组通过大数据分析辅助汽轮机改造，能够在汽轮机安全稳定运行的前提下，实现机组 25%左右负荷稳定运行的深度调峰。

火电机组精准控制——火电机组在低负荷运行时，协调控制系统不稳定，运行参数波动范围广，人员操作难度大，常规的控制系​​统不满足机组深度调峰下的运行要求。通过人工智能的应用指导机组低负荷工况下的 AGC(自动发电控制系统)协调优化控制，进行机组深度调峰的控制改造，满足更低负荷的稳定运行需求。

前沿技术应用展望：火电机组智能控制

预测控制——预测控制技术通过状态估计算法获得当前火电机组系统的状态量，通过系统标称模型进行预测，并使用动态优化算法，在满足性能指标和约束条件的情况下在线计算出控制序列对干扰和不确定因素有着良好的适应性。基于不同类型火电机组 AGC 控制策略特点，构建基于预测控制的 AGC 优化系统，通过对 AGC 相关的控制策略和控制系统进行结构和参数优化，能够显著改善机组控制性能，进一步提升各项控制指标，满足低负荷运行需求。

神经网络控制——神经网络控制技术是通过预先建立人工神经网络模型，获得被控对象输入输出的映射关系，对设备进行控制的方法。当前，火电机组调度控制器通常

仍采用 PI 控制，智能控制器的应用是未来的重点方向，融合人工智能算法和经典预测控制思想，建立由神经网络训练出来的 AGC 系统黑箱模型，包含模型预测、反馈矫正和滚动优化等众多要素，设计研发智能预测 AGC 系统控制器。通过设计多层结构的神经网络结构，以及梯度下降算法，使得训练模型无限接近于机理模型，可以较好地解决火电机组被控对象非线性、多变量、强耦合的难题。现阶段该项技术在火电机组已得到应用，例如华能营口电厂和东南大学合作开发并实施了控制系统智能优化，可在设备改造投入较小情况下，实现机组 20%-30% 负荷稳定运行的深度调峰。

（二）新能源电场高效运维

新能源电力由于受外界环境影响波动性较大，大规模并网后将给电力系统运行带来巨大压力。电力系统发电调度过程中，机组组合和经济调度环节需要提前对未来一定时间内的机组运行状态进行优化，不可控的新能源发电功率扰动必须提前进行预测，而目前天气状况的准确预测仍面临困难。新能源发电能力随着外界环境的变化处在持续波动过程中，为了达成整体电网有功功率的供需平衡，其他可控发电机组在跟踪负荷的同时还需要相应地追加调整出力，在新能源大规模并网后，这一额外的调节负担将给电网运行带来不小的挑战。数字技术在新能源电力并网环节发挥了重要的赋能作

用，基于大数据、人工智能算法能够建立精度较高的预测模型，构建新能源电力智慧运营平台，满足电力系统发电调度要求，有助于冲破新能源并网的障碍，使新能源并网能力得到明显提升。

风电功率预测——当前，对风电功率的预测主要运用物理预测法和统计预测法。物理预测法是基于气象数据和地理实地信息，通过数学模型进行计算，并通过微观气象学理论得到风机的轮毂高度风速和风向，从而进行风电功率预测，其在随机优化和参数评估上应用较为有限。统计预测法则利用数学统计方法，建立实际发电量与历史数据之间的关系，并将这种关系抽象转化为一个预测模型，预测未来的风电发电量。大数据和人工智能算法的融入，进一步完善了以上两种预测方法，使发电功率预测模型的精准度获得提升。

应用场景一：基于机器学习预测短期风电功率

人工智能算法具有自动化、智能化、数据量大的优点，能够在超大规模的数据量中快速寻找出其映射关系，实现统计预测。通过机器学习算法建立风电发电量短期风电功率与影响因素之间的内在联系并训练成模型，通过调用训练好的模型，能够预测短期风电功率。目前常用的人工智能风电功率预测法主要是支持向量机法和神经网络法，人工神经网络法在处理非线性问题上优势明显，自适应、自学习能力强，因此被广泛应用于风电功率预测上。

当前，该技术领域率先得到应用的是 RBF 神经网络预测，该模型包括输入层、隐含层以及输出层，通过选取前一时间段风机的电功率输出、环境温度和后一时间段的风速作为网络训练样本的输出进行训练，将训练好的模型中带入风速、环境温度从而预测风电输出功率。当前，该模型已有部分应用，模型预测准确度达到 90%以上，相比物理预测法提高约二十个百分点。

未来应用展望：在对风电场发电功率进行预测中，通过精细化的数据分析，有针对性地开展模型构建，是提高预测精度的一大关键途径。然而，在风电功率预测相关的实际应用中，位置气候条件、风电场布局、地形地貌等因素导致了不同风电场拥有的数据基础不同，未来需要找到一种适用于多个风电场的风电功率预测的普适模型。

迁移学习——迁移学习是运用已有知识解决相似任务的一种新的机器学习方法，是一项潜力巨大的人工智能技术。当前电力系统中存在一些新建风电场，由于投入运营时间较短，缺乏足够的历史运行数据作为模型的训练数据。若此时能够通过使用迁移学习，将已投入较长时间的风电场训练模型直接迁移用于新建风电场的风电功率预测中，上述历史运行数据不足的问题将能够得到很好的解决。

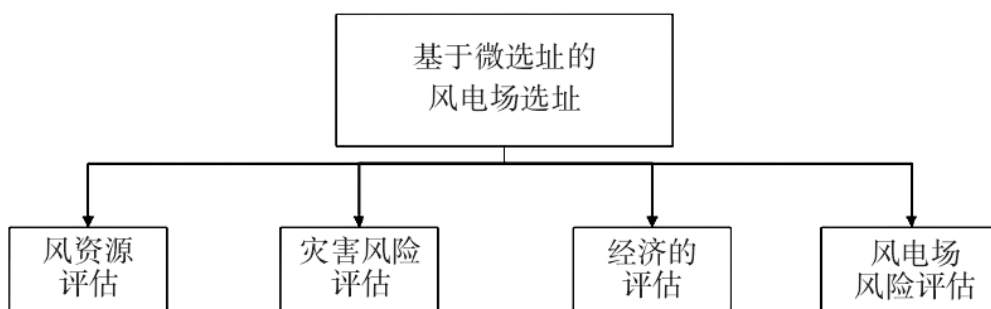
增量学习——在一些具有实时性要求的风电功率预测场景中，在线建模能够方便模型利用到最近一段时间的数

据，从而确保模型的时效性。然而，若在模型训练阶段对所有历史数据进行加载，将有可能带来巨大的计算成本，影响建模的效率。在风电功率预测领域中，增量学习算法能够做到在前期先利用部分历史搭建基础预测模型。在后期有新训练数据到来时，仅使用这些数据更新模型，从而满足在线建模的实时性需求。

应用场景二：风电场微观选址

新能源与传统能源的融合改变了固有的发电模式，发电数据的测量与管理越来越受到重视，大数据技术可以为风电企业做出更好的预测，从而辅助风电场选址。丹麦维斯塔斯风能技术集团通过对天气预报、潮系信息、地理信息、卫星图像等大数据的分析，优化风力涡轮机的地理布局，提高发电效率。IBM 提出了一种基于高精度天气预报的风电场选址的微型选址解决方案，通过大气动力过程分析、物理过程分析，建立高精度数值天气预测模型，能够在较长时间内全面预测整个风电场的资源分布，避免了预测时间造成偏差，使风力资源利用效率最大化，成本最小化。

图 7 风电场的微定位解决方案



光伏功率预测——光伏电站的发电量不仅受到太阳辐照度和工作温度的影响，而且与四季、昼夜及阴晴等气象条件有较强的相关性，准确预测未来短期内光伏发电的负荷及太阳辐照度情况，就能够提前做出相应的运行调度策略。现阶段人工智能算法已经被用来完成对光伏发电过程中各个环节的预测，其中包括使用深度学习来预测光伏发电负荷及太阳辐照度，以及使用 BP 神经网络、遗传算法等人工智能算法来完成对负荷的预测。

应用场景：基于人工智能的光伏发电功率预测

综合考虑影响光伏发电的环境因素，将辐照度、温度、相对湿度等对于光伏发电输出功率影响较大的三个环境因素作为模型的输入变量，结合综合型灰度关联系数来选择关联相似数据，消除天气类型和季节的影响。以人工智能算法为基础，例如 BP 神经网络、支持向量回归算法、决策回归树、梯度提升树等，建立光伏发电功率预测模型。

BP 神经网络算法——基于 BP 神经网络的光伏发电预测模型分为输入层、隐含层以及输出层，其中输入变量为光伏发电系统各个时段的平均温度、平均光照，输出变量为当日各时段的光伏发电量。光伏发电预测模型分为 24 小时/天，每一个小时为一个计算单位。输入层中的每个结点作为激励信号，组成下一层的输入信号，而该层输出信号又作为下层的输入信号，以此类推。神经网络具有很好的

非线性拟合性，学习规则简单，预测精准度相比传统模型提高 40%左右。

未来应用展望：开发结合环境影响因素的预测模型。

当前各类预测模型对环境预测的精准度普遍较低，以太阳光辐照度为例，太阳辐照度是影响光伏电站发电效率的重要指标，可以通过实地测量获得，也可以通过理论计算获取。与预测电力负荷类似，目前已有半正弦模型等预测太阳辐照度的数学模型，但这些模型的建立都基于特定地区的太阳辐照度数据，所以地域性强、通用性较差，且模型精度受天气因素影响波动较大。**推动人工智能算法与光伏发电深度融合。**在光伏发电系统运行管理过程中，还存在如缺乏自动化、智能程度偏低等问题，各项功能系统之间未能充分发挥协同作用。通过人工智能技术，能够有效归纳各类数据，提取其中的有效信息，深度建立它们之间的关系，实现管理优化，有效整合现有系统，发挥各系统彼此间的协同效用，极大化地发掘现有数据的潜在价值。

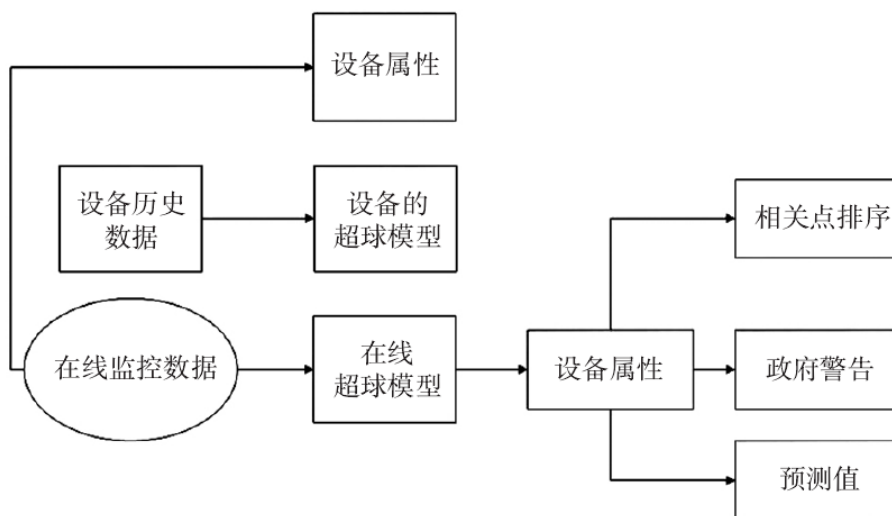
新能源电场运维——新能源电场与传统火电厂在运维模式方面存在较大区别，当前传统的管理模式已经不能满足高效运维需求，需要通过大数据、人工智能、云计算等数字技术构建新能源智慧管理平台，在机组异常状态识别、故障可视化、运行评估等方面实现应用，保障电厂高效安全运行。

应用场景：新能源电场智慧运维

风电大数据平台——基于大数据建立新能源电场远程智能监控中心，服务于优化设计、科学选型、优化设备运行性能等方面，实现管理效率和经济效益同步提升。例如内蒙古集宁区北方同创开发的风电大数据平台，以风电场运维管理大数据平台为核心，包括多个数据信息集成体系的大数据系统，可将各风场风力发电机组中所有信息，完整地储存在计算机中，形成信息数据库。该平台可以实现风电设备的在线故障、部件库存、检修等全方位预警、报警、诊断，提高运行参数的智能优化能力提高装置安全可靠性和提高发电机组智能化程度，实现风电机组设备状态维修，降低维修成本。

风电机组状态评估——针对风力涡轮机在运行过程中受到的雷雨、盐雾、雪等天气因素的影响，建立基于大数据技术的风力发电机组综合状态评估系统，通过基于监测装置的超球模型和基于在线监测数据的超球模型，可以预测出风电机组部件磨损或疲劳可能导致的灾难性故障，提高风力发电机组的运行安全性，降低重大故障的发生概率，降低机组的运行维护成本。

图 8 风电机组发电状态评估系统流程



新能源系统运行预测——运用智能感应技术实现对新能源系统运行状况的短期预测，通过在风电系统中应用无线感应器、智能感应器或光纤感应器，可以为风电系统的运行提供许多支持，依托于智能感应系统的信息反馈技术与传输技术，可对风电系统运行中所产生的数据信息进行实时化获取，并且在风电系统运行过程中还能根据实际需要来对这些信息进行调取，实现对风电系统运行情况的短期预测，并可根据预测结果来实现电力供应的削峰填谷。

未来应用展望：实现新能源电场的自我决策。以平台为基础实现各子系统的优化升级，比如能量管理系统控制策略可参考更多因子，如发电性能指标偏低、预警未处理机组可考虑下发更少的目标电量等，新能源电场可根据各生态子系统影响因子来执行“自我决策”，达到电场自身运营最优。研发故障自动检修机器人，并与智慧电场形成联动，实现新能源电场的“自运维”。

（三）“风光水火储”多能互补体系建设

多能互补体系是采用多种能源进行相互补充与综合利用⁴，即将风、光、水及传统化石能源等不同类型能源资源进行综合性输入，依照不同能源品位高低进行互补利用，以提升整体能源利用效率。当前多能互补体系的构建面临多方面的技术限制，主要表现在多能系统规划设计、能源数据安全、多能互补系统的协调优化控制、多能互补系统的优化运行、多元用户用能特征提取、多能互补系统能量管理等众多关键环节，数字技术的应用有望突破关键环节技术限制，加快多能互补体系的发展进程。

多能互补体系规划设计——规划设计是多能互补能源综合利用的前期工作，当前多能互补系统规划运行存在仿真手段有限且效果不理想的问题，数字技术应用到模型规划中，能够分别对系统能量的转换、分配、存储等环节进行建模，并高效指导多能互补体系规划设计。

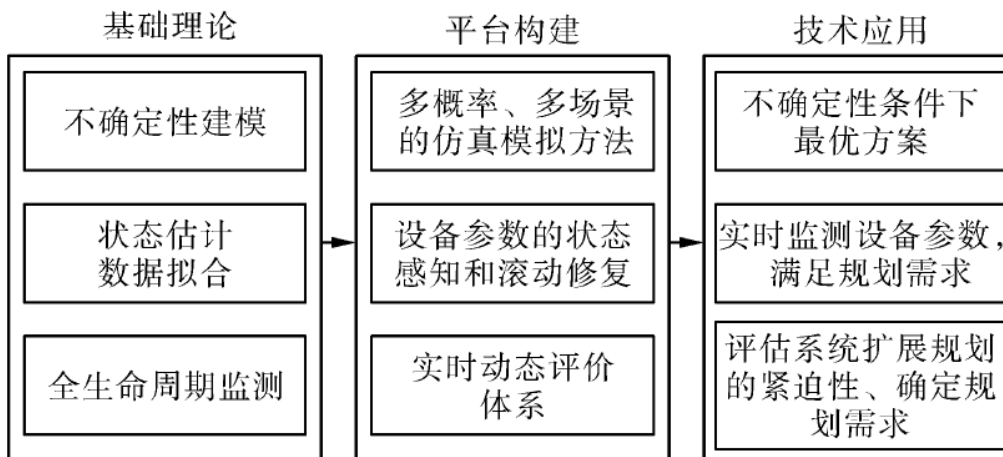
前沿技术应用展望：基于数字孪生的多能互补体系设计

数字孪生技术在解决多能互补规划问题时提供一种全新思路，通过大规模异构并行计算资源对海量数字孪生的场景进行仿真，从海量仿真结果中寻找规律，驱动多能互补体系运行方式的优化。数字孪生技术为多能互补体系的构建提供了有力支撑，基于数字孪生技术的多能互补体系

⁴ 付萍,孙茜茜,李亚楠,陈晓波.构建多能互补供电系统的研究探讨[J].节能,2020,39(11):113-114.

规划主要有两大优势，一是具备更高的模型精度，二是系统能够进行动态更新机制，对多能互补体系的安全性、经济性的评估相比传统规划结果更准确，具备更大应用价值。

图 9 基于数字孪生技术的多能互补规划应用架构



应对不确定性问题——规划过程中存在能源价格、政策环境、电力负荷等不确定问题，数字孪生技术的应用能够提升系统全周期运行数据，以及非系统数据（天气、温度、环境等）采集和处理能力，更好地建立不确定性因素的统计和随机过程模型，利用模糊聚类、数据挖掘等技术，以更小的代价提升规划结果与运行方式的鲁棒性。同时，借助不确定性建模、场景生成等技术，数字孪生可以对不同方案进行多概率、多场景的仿真模拟，从中选取最优方案。

设备状态感知修复——原有系统设备和管网参数不可考证，难以用传统的机理模型进行准确描述，在数字孪生框架下，通过采集的系统实际运行状态作为输入量，基于状态估计、数据拟合来获得该管道的实际运行过程中的特

性参数，作为扩展规划的基础依据。

自适应动态规划——通过数字孪生技术对系统进行全生命周期的监测形成问题库，形成实时动态评价体系，评估系统例如充裕度、负载量、可靠性等信息，能够更加及时、有效地评估系统扩展规划的紧迫性，确定规划需求，并为规划方案的优选提供闭环反馈。

能源数据安全管理——多能互补体系建设涉及电量计量、能源交易记录等大量数据的交互流通，这些数据由于涉及到安全隐私不便于公开和共享，因此需要加快突破数据安全壁垒。区块链技术能够解决由于第三方采集大量用户信息造成的信息隐私泄露问题，去中心化的数据管理体系可以有效地对信息进行管控，在多能互补体系中的应用能够实现对数据的合理的保护，做到对信息互联共享性的控制，避免出现数据泄露等问题，从而提高多能互补系统的数据安全性。

前沿技术应用展望：区块链在多能互补体系中的应用

区块链技术不仅能够有效支撑能源企业的发展，还能拓展多种创新服务模式。为了满足能源行业的长期发展，未来多能系统的应用大多都是在能源服务商的合作下展开的，每个服务商都能建成区块链，且都含有不同类型的区块链，以此就能实现信息的有效保护和共享。此外，在设计多能互补系统时，往往会涉及到信息共享调用同步等问题，而要想将区块链技术运用该系统中，就应建立相应的数据

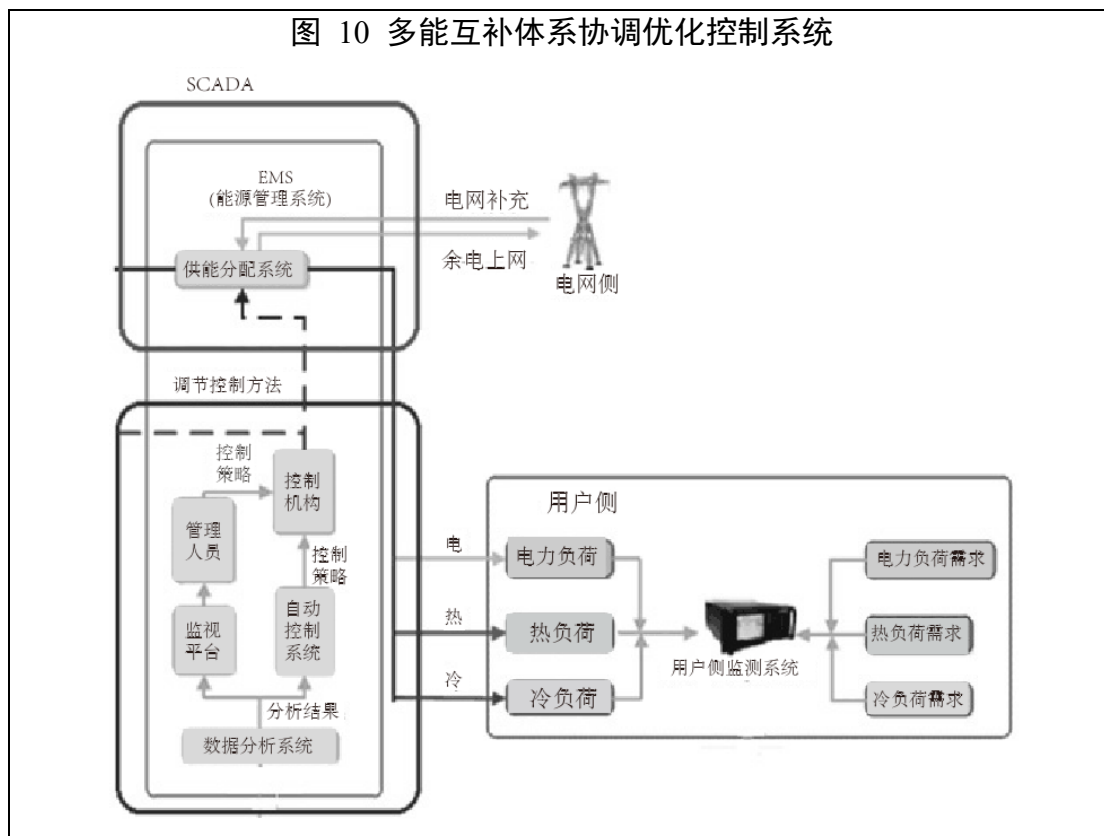
共享渠道，确保能够在不同的模式下，协同完成不同的业务，以此就能保障不同能源商的数据交流，确保完成虚拟货币资金的转账功能。

系统内部协调控制——在多能互补系统运行中，系统内部的协调优化对能源利用效率具有直接性影响，尤其是人工操作控制会显著影响系统协调控制效果。以大数据和智能算法运行为基础，构建全面完善的自运行系统，大幅减少人工因素在多能互补系统运行中的严重干扰，能够有效提高系统高效运行水平。

应用场景：产业园区运行多能系统控制方案

以产业园区为运行基础单元，集成多元能源监控、能量管理、能效管控和需求侧响应等综合为一体的综合能源控制系统方案。在整个综合能源控制体系中，基于大数据挖掘和人工智能算法，以数据深入分析系统为基础，构建涵盖自动控制系统、监视平台、管理人员、控制机构为框架的分析系统。基于数据分析结果对系统运行的电、热、冷等系统进行调节分配，从而实现能源的高效分配。优化控制的具体方法是以智能算法为运行基础，将运算得出结果与控制系统进行数据交互后，再对系统设备的运行进行具体优化，相比原先协调控制系统，能够提高 50%-60%左右的运行效率。

图 10 多能互补体系协调优化控制系统



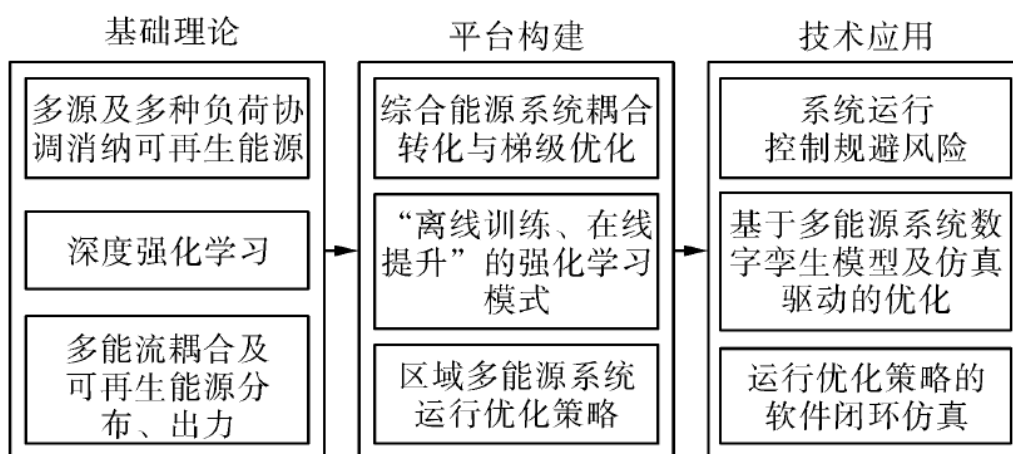
多能系统运行优化——多能互补系统的优化运行主要有两方面工作，一是要利用多负荷和储能协调消纳可再生能源，开发多能互补系统耦合转化与梯级优化利用方法，例如通过运行层面的多能互补需求响应削减峰值负荷；二是根据实时监控提供的风险点、故障等信息，基于大量历史数据，提出多种运行优化策略。因此，多能互补系统优化运行关键在于掌握历史数据之间潜在规律，求解不确定场景下的优化问题，而数字孪生技术的应用能够把多能互补系统的运行优化决策问题转化为深度学习模型，从而通过仿真驱动优化技术，达到多能互补系统运行优化的目标。

前沿技术应用展望：数字孪生助力多能系统运行优化

基于深度强化学习的仿真驱动优化技术是数字孪生技

术在多能互补系统运行优化中应用的关键技术之一。强化学习能够用来求解不确定性场景下的优化问题，通过学习历史数据中的规律，在不知道未来情景下做出最大收益动作，能够较好的处理不确定场景，因而强化学习可以用来求解多能互补运行优化问题。

图 11 基于数字孪生技术的多能系统优化运行架构



在整个系统框架构建中，需要完成五大目标。一是**优化目标的构建**。基于多能互补系统多能耦合、可再生能源就地消纳原则等特点，综合分析各类优化控制方法的优缺点，结合能源利用结构，构建包含多种因素与运行约束条件的综合优化目标。二是**估计技术**。基于数据驱动的状态估计技术，尤其是考虑天然气、供热管网的动态特性进行偏微分方程的动态状态估计技术，识别多能互补系统整体运行状态。三是**深度学习**。基于深度强化学习理论，利用数字孪生模型海量历史数据和多场景仿真器构建强化学习训练引擎，设计适用于多能互补系统“离线训练、在线提升”

的强化学习模式，形成一种基于多能源系统数字孪生模型及海量仿真驱动的优化方法。**四是建立强化学习模型。**综合考虑多能流耦合及可再生能源的分布、出力等运行特性，确定区域多能互补系统优化对象，建立单目标及多目标优化的强化学习模型，合理设置强化学习的动作、状态及反馈奖励等参数，选取合理的强化学习方法，基于数字孪生模型完成模型训练，形成可在线计算的多能互补系统运行优化策略。**五是提出优化策略。**提出运行优化策略的效果评估方法，基于数字孪生实时仿真器，结合实际运行数据，在线生成闭环检测运行优化策略，实现运行优化策略的软件闭环仿真测试，将控制策略开发为一个模块，并入能源智慧大脑一个环节。

当前，数字技术在多能互补优化运行中应用已有个别案例，例如上海浦东连民村全方位多能互补解决方案，西门子联合国家电网提供从规划咨询到核心能源管控平台的一体化解决方案，该能源管控平台融合大数据、人工智能等数字技术，对光伏、风电、地热、储能以及综合能源供应进行智能管理，协调供需、优化运行，实现最大效益，是能源流、信息流与价值流“三流合一”的乡镇能源互联网典型应用示范。借助西门子全方位多能互补的解决方案，连民村综合能耗预计约降低 10%，碳排放量预计减少约 50%。

四、措施建议

当前火电在电力系统中主体能源地位逐渐转变，绿色低碳电源体系的发展进程不断加快，数字技术在赋能新能源电力的并网消纳方面取得了一定成效，但在火电灵活性深度改造和“风光水火储”多能互补体系建设方面尚未发挥有效的支撑作用。数字技术在低碳电源体系建设过程中仍存在应用动力不足、技术融合限制、推广进程缓慢等多方面问题。面向未来新型电力系统的建设，要以新能源电力在电源供给体系中占比提升为核心目标，综合利用技术创新、示范引领、宣传推广等多重手段，更大程度发挥数字技术在电源侧的赋能作用，解决好新能源与化石能源的组合优化问题，打通新能源大规模接入电力系统的数据“桥梁”，加快推动清洁低碳电源体系的建设。

推动协同创新。以火电灵活性改造、多能互补体系建设、新能源并网等领域数字技术需求为核心，拓展跨领域间的协同合作，促进创新资源与企业创新需求的无缝对接，形成创新发展合力。完善能源电力企业科技创新研发投入激励机制、科技成果奖励机制，制定重大科技成果转化管理办法，财政科技资金优先支持产学研合作项目，促进高等院校、科研院所和能源电力企业合作，引导创新资源向企业聚集。加强能源电力企业与数字经济企业间的合作对接，发挥龙头企业的引领带动作用，促使企业进行开放式合作，推动产业、企业

间的协同创新，提高资源有效利用率。

加强示范引领。面向火电灵活性深度改造、新能源大规模并网消纳、“风光水火储”多能互补体系建设等重点领域开展一系列试点示范应用，厘清各领域利用数字技术改造提升的着力点和应用场景，探索形成一批可推广的数字技术解决方案和创新应用。新能源作为低碳电源构建的关键部分，率先开展数字技术支撑大规模新能源并网消纳项目实践试点，遴选一批风电、光伏等领域先导试点应用，全面提升数字技术对新能源消纳的支撑能力。

推广先进经验。能源主管部门牵头，联合能源电力龙头企业、行业协会定期对示范技术应用进行总结，提炼先进经验和做法，梳理发布先进数字技术应用榜单。开展示范应用技术评估，诊断当前数字技术助力新能源并网的关键问题，为后续针对性的优化政策提供参考和依据。依托煤电数字化转型、新能源并网消纳、“风光水火储”多能互补体系建设等相关主题的会议、论坛、峰会等，开展数字技术赋能低碳电源体系建设的经验宣讲，向企业宣传试点示范项目的赋能路径和赋能效果，发布电源侧数字化发展的优秀案例集，分享企业利用数字技术解决电源侧低碳发展的新技术、新模式、新应用。

五、本章小结

本章梳理了低碳电源体系构建过程中面临的主要问题

和亟需完成的三大重点任务，并结合应用场景分析了数字技术在其中的应用情况和前瞻性应用场景。在火电灵活性深度改造方面，锅炉设备改造、汽轮机适应性提升以及火电机组的精准控制是主要的改造方式，数字技术在其中发挥了重要的辅助决策作用，基于数据挖掘和人工智能算法能够构建精确度高的优化决策模型，从而指导火电机组进行灵活性深度改造，并能在改造成本投入较小的情况下实现深度调峰，有效激发火电企业改造动力。典型的应用场景有燃料智能掺烧、低负荷稳燃潜力挖掘、燃烧数据分析、汽轮机运行智能优化、火电机组智能控制等，但当前实际应用案例较少，大多停留在应用开发阶段。在新能源电场高效运维方面，新能源发电功率预测和新能源电场运维管理是两个至关重要的环节，数字技术在其中都发挥了重要的赋能作用。一是基于大数据、人工智能算法能够建立各个环节的预测模型，满足新能源发电功率精确预测的要求，大幅提升新能源并网能力。二是综合利用大数据、人工智能、云计算等数字技术构建新能源智慧管理平台，在机组异常状态识别、故障可视化、运行评估等方面实现应用，从而保障电厂高效安全运行。现阶段数字技术应用案例较多，例如短期风电功率预测、风电场微观选址、风电大数据平台等，但都聚焦于单个功能的实现，未来的应用场景需要向着更高水平发展，与智慧电厂形成联动，实现新能源电场的“自我决策”和“自我运维”。在“风光水

火储”多能互补体系建设方面，多能系统规划设计、能源数据安全、协调优化控制、多能系统运行优化等是当前最主要的难题，数字技术的应用有望突破关键环节技术限制，加快多能互补体系的发展进程。现阶段实际案例较少，基于相应问题的解决我们提出了前瞻性应用场景，例如数字孪生技术高效指导多能互补体系规划设计、区块链技术有效保障多能互补体系数据安全、产业园多能系统智能控制平台、强化学习求解多能互补运行优化问题等。最后针对当前低碳电源数字化建设过程中存在的不足提出了三方面措施建议，即推动协同创新、加强示范引领、推广先进经验。

第三章 数字技术编织坚强智能电力之“网”

一、内容概述

坚强智能电力之“网”是构建以新能源为主的新型电力系统的关键内容，本章内容总结了智慧电网发展面临的三大挑战，即电力供需模式转变要求电网具备更强灵活性、新能源电力消纳需要大容量长距离输电保障、新能源电力集中式和分布式并存带来新要求等三个方面，并基于关键问题提出了数字化的解决方案，包括数字技术在智能电网调度、特高压输电、需求侧响应、微电网中的应用，同时结合相应的案例应用进行分析，说明当前相关数字技术应用现状，提出前瞻性应用场景展望，最后总结在电力电网侧数字技术应用的不足之处，并提出相关建议。

二、面临挑战

（一）电力供需模式转变要求电网具备更强灵活性

新型电力系统将以波动性的新能源作为电源侧电力电量的主要提供者，这将使得电力系统供需两侧均面临高度不确定性，电力平衡模式由源随荷动的“发-用”电平衡转向储能、多能转换参与缓冲的更大空间、更大时间尺度范围内的平衡，以火电为主的传统电力系统的“发输配售用”模式已不能保障以新能源为主的新型电力系统的平稳、高效、经济运行。随着火电的逐步退场，新能源装机规模大幅提升，新能源电力还需要具备一定程度的主动支撑、调节等构网能

力，这对电网的灵活调节能力提出了更高的要求。

（二）新能源电力消纳需要大容量长距离输电保障

中国是国土面积第三大国，能源分布广泛但极不均衡，导致能源电力供需结构也极其不均衡。水力资源主要分布在西部地区及长江中上游、黄河上游、西南雅碧江、金沙江、澜沧江、雅鲁藏布江等地区，光电资源主要分布在西北地区，而中国大多数人口集中在中东部地区，带来 70% 的电力消费需求，电力消费中心与可再生能源供给中心的分离，使得新能源电力就地消纳能力受限。“十三五”期间，新能源富集地区曾出现大面积、长时间的“弃风”“弃光”现象，2020 年中国弃风弃光电量达到 218.6 亿千瓦时。到 2030 年，中国风电、光伏总装机量预计将达到 1200GW 以上，届时新能源电力消纳压力将更加凸显，对电网大范围资源灵活配置的能力要求进一步提高⁵，未来大容量、长距离的高效能源输送方式不可或缺。

（三）新能源电力集中式和分布式并存带来新要求

中国新能源电力资源与需求逆向分布的基本国情，新能源出力的随机性、强时空相关性，都决定了交直流互联大电网仍需扩大规模才能满足远距离大规模输电、新能源跨省、跨区消纳平衡的需求。交流电力系统需要同步电源的支撑，难以适应新能源集中开发、海上风电、大量分布式新能源接

⁵ 张金平,周强,王定美,李津,等. “双碳”目标下新型电力系统发展路径研究[J].华电技术,2021,43(12):46-51.

入等局部场景，这对新能源电力就地消纳能力以及配电网的承载力和灵活性提出了更高要求。以上多重因素决定了未来新能源开发将采用集中式与分散式并举的模式，也为配套特高压长距输电网和区域低压电网统筹建设提出新的要求。

三、数字化解决方案

（一）智能电网建设

全球范围内，由美国、欧盟率先推动智能电网建设，围绕数字电网的关键技术研发和高精度模型构建，开展一系列布局。一方面，以传输感知、电网双向通信、多元控制协同、先进系统布局决策和支持为重点突破方向，构建适应大规模可再生能源并网的先进数字电网体系。另一方面，发展电网与电动汽车的数字互联技术，建立安全、高效和可靠性强的数字保护和控制系统，创造高渗透性电力输配和充电网络条件，提升网荷互动能力。现阶段美国、欧盟的电网数字化体系已经逐渐完善，电力系统灵活性大幅提升，在应对气候变化中发挥了重要支撑作用。通过智能电网的构建可以使美国整体能耗降低 10%，温室气体排放量减少 25%，并减少新建电厂投入成本约 800 亿美元。2009 年，国家电网首次提出“智能电网”的概念，随后国家层面提出“加强智能电网建设”，并将其上升为国家发展战略，中国智能电网建设开始步入快车道。截至 2020 年底，中国智能电网相关政策标准已经趋于完善，在示范试点建设、技术创新攻关等方面取得了重

大突破，电力系统输配电各环节智能化水平大幅提升，供电可靠性显著改善。

智慧调度是智能电网的发展核心，随着智能电网的逐步发展，电网的调度进一步向着智能化迈进⁶，通过营造出健康良好的电网运行环境来减少不良因素的干扰，充分利用人工智能、大数据等数字技术来维持智能电网安全可靠高效运行，从而提升电网调控水平。当前，数字技术在电网调度中已有诸多应用，例如围绕电网调度控制典型业务场景，依托知识图谱、自然语言处理和语音识别等技术手段和调度控制业务规约，综合处理电网运行、检修计划、发电计划和电网拓扑信息数据，实现设备故障智能辨识、停电范围智能计算和负荷精准预测。通过人工智能技术在调度控制领域的应用，替代人工自主完成计划检修许可、故障警告、故障抢修指挥、发停电策略编排等工作，实现调度枢纽顺畅，缩短停电时间，保障调度高效稳定运行。

应用场景：智慧电力调度

智慧调度⁷是将电网调度中心各项业务与各个环节智能化与精益化，实现数据挖掘、系统分析、计划制定等的智能化分析、智能化预警以及智能化控制，具备风险分析、辅助决策、全景监控等功能，从人员物资调配等方面实现了

⁶ 田莉, 綦雪松, 孙佳, 李梦琪. 电网调度自动化主站系统应用及发展研究[J]. 科技风, 2021(35):193-195.

⁷ 李里. 可视化技术在电网调度中的应用及问题分析[J]. 科学技术创新, 2019(16):183-184.

各环节效率提升和成本节约，整体上实现了降碳。

电力调度可视化——智能电网中存在大体量、多种类的电力调度数据，通过人机交互和可视化技术能够将电力大数据中挖掘的预警和故障信息以生动形象展示⁸，实现调度流程的动态可视化，增强电力调度水平。一是二维可视分析，主要有动态潮流法、单品图法和等值线法。以等值线法为例，通过将线路负载率、变压器负载率、节点电压等电力调度不同类型数据直观呈现，辅助调度人员准确及时掌握智能电网运行情况。二是三维可视分析，主要通过虚拟显示技术构建电力运行区域三维模型，例如图形三维旋转全方位展现电力图，辅助电力调度决策。三是地理图分析，通过引进地理图实现地理图形和区域电力系统的有机结合。在电力调度时，地图可以实时展现电力线路、电力设备等出现的故障，利用大数据快速定位，及时发现并解决故障。电力调度可视化实现了设备信息、状态、重载率等数据的有效融合，以调度职能为视角，组织、提取、集成、展示电网运行关键技术指标，采用数据挖掘、信息聚合和可视化技术，直观展示电网不同层面信息的全景视图和生产经营状况，显著提高电网企业运营管理效率。

湖南省电力公司研发的电网一张图，基于百度地图，湖南全省电力核心设备信息实现可视化，设备信息、状态、

⁸ 冯磊,黄其兵.基于智能的配电网电力大数据三维场景可视化分析[J].自动化与仪器仪表,2020(01):189-192.

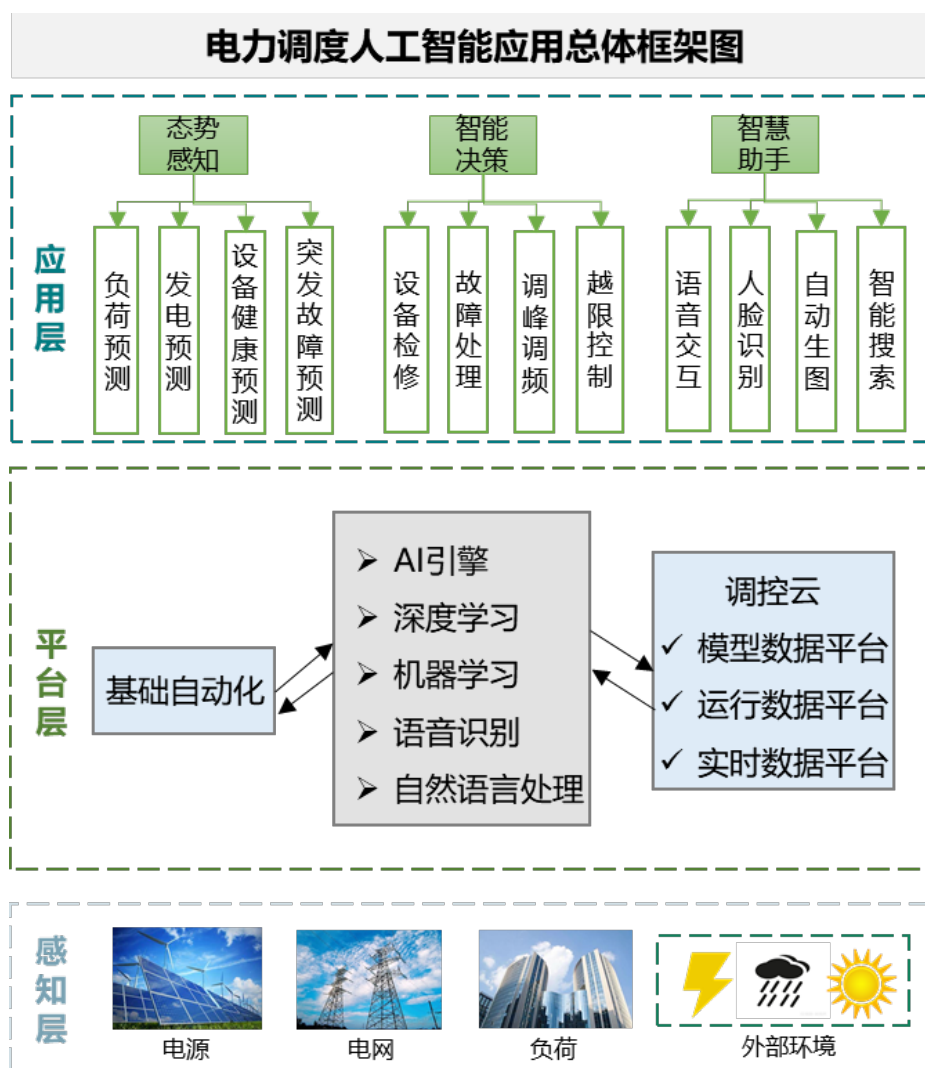
重载率等数据都可以通过地图查看。当客户报修故障时，平台能够自动精准定位，并基于交通拥堵情况智能选择抢修人员前往路线并预测到达时间，保持客户端、供电服务指挥系统信息一致，大幅提升抢修响应效率，自动记录接单至抢修完成的所有动作轨迹。

基于人工智能的电力调度系统——电网企业利用人工智能技术模拟人的思维，通过学习海量电网运行数据和运行经验来发现规律，从而形成知识并指导电力调度，整个技术应用架构包括感知层、平台层和应用层。感知层广泛采集电源、电网、负荷、外部环境等各类信息，通过信息通信网络汇聚形成调控大数据，平台层则提供从数据集选择、开发、训练到服务的全流程一站式管理，最后实现电网运行控制、分析决策和管理应用。基于三层的总体系统架构，依托泛在电力物联网信息全面感知的有利条件，深度融合人工智能技术，能够提升对复杂大电网特性和规律的认知能力，支撑智能电网的调度控制，典型应用场景包括态势感知、智能决策和调度助手等。其中，**态势感知**采用人工智能算法训练分析大量历史样本数据，能够进行负荷预测、故障预测、安全评估、用电行为分析等；**智能决策**利用人工智能对经验型调度模式进行训练学习，建立电网调控知识谱图，基于知识谱图分析得出更优的实施策略，更好的满足调度运行需求；**调度助手**通过应用虚拟现实、语音识别

等技术使调度系统的人机交互性能得以显著提升，实现以语音交互为特征的智能助手功能。智慧调度实现了电力调度的优化配置，通过学习系统中采集的大量历史供电数据，可以预测并结合实际情况进行电力调度，在满足生产生活安全稳定用电的前提下，提高电能利用效率，减少电力资源损失。

山东省电力公司搭建了企业 AI 中台，实现了快速的业务建设与应用。基于 AI 中台搭建输电通道可视化平台，轻松实现了户外各种复杂场景下的安全巡检，将可视化监拍装置拍照间隔从半小时缩短到 5 分钟，并且 5 秒内就能识别出吊车、导线异物、烟火、塔吊、各类施工机械等安全隐患，为输电线路安全、稳定运行提供可靠的保障。经过人工智能模型的持续迭代，前端智能分析的识别准确率大幅上升，各类施工车辆的识别准确率由 80%提升到 95%，烟火识别准确率由 70%提升到 90%，导线异物识别准确率由 60%提升到 80%。

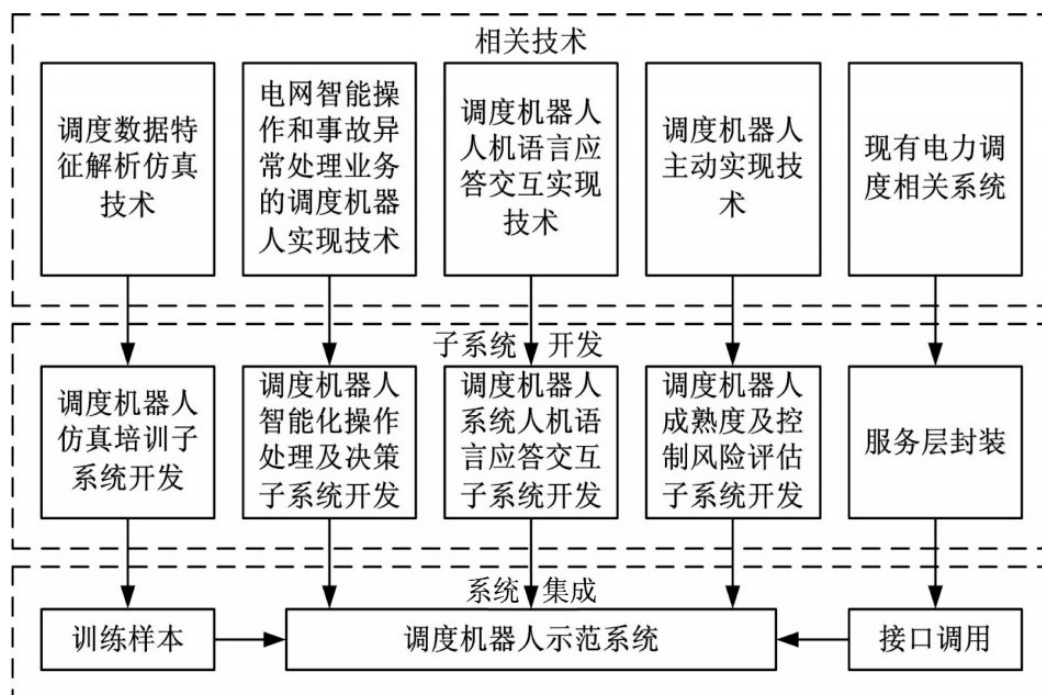
图 12 电力调度人工智能应用总体框架图



电力调度机器人——调度机器人一项面向智能电网实时调控运行的人工智能技术应用，集成了智能化操作处理及决策、人机语音交互、成熟与风险评估等子系统，能够主动感知电网运行状态，实现自主调度与控制。调度机器人的应用具体表现在三个方面：一是基于智能监视获得电网自身运行信息(频率偏差、电压异常等)与外部环境信息(恶劣天气等)，通过综合分析与运行演变特征提取，判断电网运行状态；二是综合考虑有功和无功预测、清洁能源消纳、

现货市场交易、重载越限等因素，优化制定调度策略；三是通过电网实时计划跟踪、静态安全在线决策和枢纽节点无功电压优化，执行电网实时平衡控制和安全自校正控制。例如国网公司虚拟 AI 配网调度员“帕奇”解决了调度枢纽堵塞问题，辅助配网调度员减轻 45% 的业务负担。

图 13 电力调度机器人示范系统构建框架



未来应用展望：现阶段数字技术在电网调控领域应用已有初步成果，但整体应用深度和广度都相对不足，对调度业务支撑的范围和程度还不够，且应用较为零散，未来需聚焦电网运行特性认知水平的提升、调度控制效率的提高、运行管理智能化等方面，综合业务需求和技术成熟度开展系统性研究和应用，建成高度集成、一体化的智能调度系统。典型的应用场景如下：

智能电网仿真样本管理与生成——面向在线和离线数据，构建海量仿真样本的系统性存储和高效访问机制，利用人工智能方法，自动实现仿真样本补充和样本分布改造，提升仿真样本库的均衡性、多样性和合理性。

基于大数据的设备状态趋势感知——构建统一的监控设备模型，将多源数据关联融合，利用大数据分析技术实现设备状态趋势评估，辅助识别设备故障及缺陷等造成的电网风险隐患，提前进行风险预防。

电力市场运行数据分析——基于对电力现货市场历史数据的挖掘，研究市场主体的报价策略、交易行为对电力市场运行的影响，研究电力现货市场运营风险类型识别与预判告警技术，建立电力现货市场运行风险防范机制和应急预案。

新能源资源分析及预测——基于数据挖掘技术实现新能源资源和运行数据的有效利用，建立资源及出力特性分析模型，提取影响新能源资源及出力波动的关键特征，通过深度学习等智能算法，不断优化新能源功率预测模型，提高功率预测精度，扩展预测期。

（二）特高压数字化装备

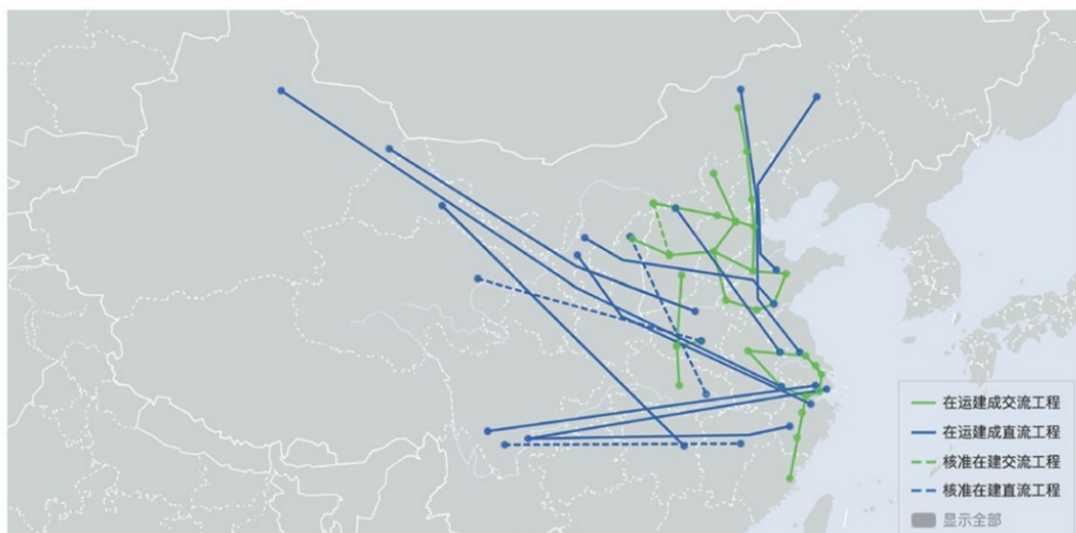
特高压相比常规高压输电⁹，具有输电距离远、容量大、效率高、占地少等综合优势，适用超远距离、超大容量的“点

⁹ 张素香,刘雯静,赵子岩,等.科技创新驱动电力行业高质量发展[J/OL].电信科学:1-12[2021-12-29].

对点”电能输送。经过多年的发展，中国特高压取得了较为显著的进步，在过电压控制、外绝缘配置、成套设备研制、试验检测能力等方面取得了重大创新突破。截至 2021 年，中国已累计建成了 32 条特高压输电工程，输电线路总长度达到 4.6 万千米，累计输电超过 2 万亿千瓦时。

特高压输电的大规模能源互联能够构建起电力传输网络，实现跨区电力资源灵活调配，成为新能源输送与消纳的“高速公路”，有效解决新能源电力消纳难题。未来，大规模新能源电力消纳势必会成为中国新型电力系统快速健康发展的关键，需要特高压输电具备更高效、更经济、更稳定的长距离输电能力，数字技术将为其注入新动能，在高效管理、安全稳定、经济运行等方面发挥重要作用，提高特高压输电的运行质效。

图 14 国家电网特高压工程建设示意图



数据来源：国家电网

特高压装备数字管理——在特高压输电工程中，特高压换流变压器、大容量换流阀、大容量直流断路器等是关键设备，这类设备内部结构复杂、制造成本高。通过对原料采购、部件安装、出厂检测、售后跟踪等生产全环节进行建模与数字化监管，提高特高压关键设备的生产管理水平，能够大幅降低特高压设备制造企业的生产成本，提高企业产能，助力中国特高压工程快速发展。电力装备数字化管理在数据、模型、平台等方面都面临着巨大挑战，例如当前数据监测量不足以支撑起全尺度模型的构建、全尺度多物理场耦合模型难以建立并实时求解等，因而特高压装备的数字化管理尚处在起步阶段，有待进一步突破发展。

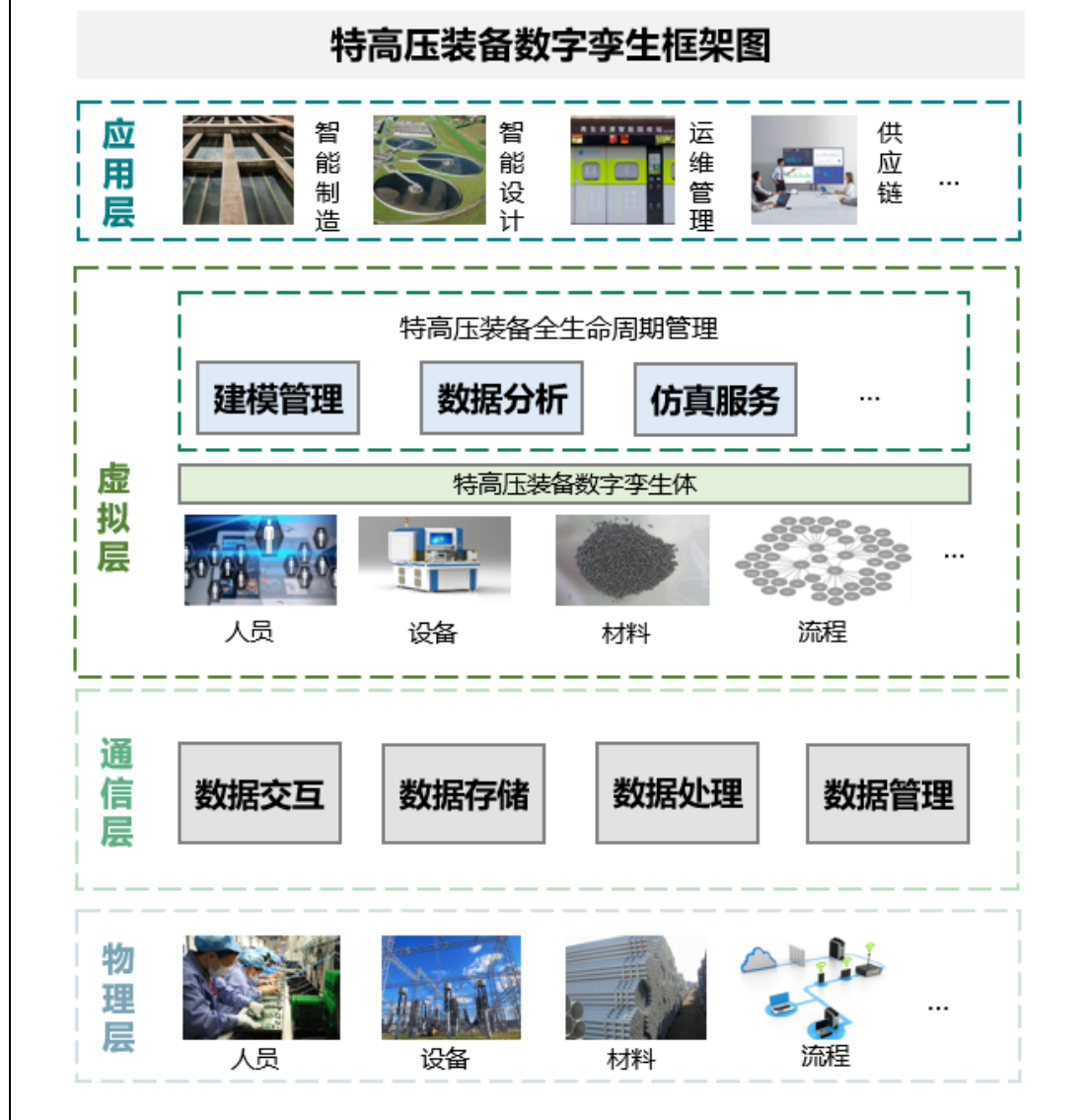
前沿技术应用展望：特高压装备数字孪生的实现

数字孪生可服务于复杂电力装备的协同设计与生产制造、数字化交付以及高价值电力装备的预测性维护与报废回收，能够实现对电力装备全生命周期信息的闭环管理，在变压器、大容量直流断路器等关键特高压装备领域具有广阔应用价值。

特高压装备数字孪生的框架包含特高压装备全生命周期各环节，需要构建包括物理层、通信层、虚拟层和应用层在内的技术框架。物理层是实现特高压装备基本功能的实体保障，通信层具备存储、管理、处理孪生数据功能，是物理层和虚拟层的“数据桥梁”，虚拟层包含互映射建模管理、

仿真服务、数据分析等模块，满足对特高压装备全生命周期数字化管控的高精度要求，应用层则在数字孪生建模仿真的基础上，支撑特高压装备全生命周期过程中不同环节的业务。未来，特高压装备数字孪生的实现能够畅通各环节信息的交互，打破产业链之间的隔阂，提高特高压装备的生产效率和管理水平，其典型的应用场景包括智能制造、智能设计、运维管理、智能设计、运维管理等。

图 15 特高压装备数字孪生构建架构



智能制造——开展生产流程再造，数字孪生技术对特高压装备生产流程中的每个环节进行建模仿真，模拟不同生产工序的配合情况，预测加工后的特高压装备物理实体的形态和装配效果。开展产能预测，数字孪生技术构建数字化的特高压装备生产线，对工厂产能进行预测，同时也根据产能需求对人员、原材料等资源要素进行分析，促进生产管理的智能化。进行生产质量把控，特高压装备数字孪生模型对运行过程中的故障临界状态进行参数仿真，与实际数据对比分析，进而保证特高压装备制造质量和不同批次一致性。

智能设计——数字孪生技术可为特高压装备多场作用下的运行仿真提供有效的工具，助力设计的便捷化和精确化。针对特定用户的特定需求，数字孪生技术能在标准化数字孪生体的基础上，对特定的指标和参数进行修改。并根据大量标准化产品的应用经验来指导定制化产品的设计，以提高定制化产品的研发速度和质量。

供应链动态管理——特高压装备制造商和零部件供应商通过数字孪生技术能够对订单和物料进行高效管理，根据历史订单数据以及在线更新资料来预测未来订单量，依据物料种类、生产厂家、对应批次等历史信息以及预测的订单量来管理场内物料，能够实现物料采购和消耗的动态平衡，降低制造商的周转资金。电网公司物资管理部门利

用数字孪生技术对在役特高压装备的性能进行评估，并对其运行寿命进行预测，从而合理估算出阶段需求情况，实现电网公司物资资源的优化利用。

特高压装备状态感知——特高压装备运行过程中数据的精准获取是特高压输电系统高效稳定运行的基础，自从智能电网建设以来，中国各省市输变电系统均配置了多类型的电力装备多状态量传感器，而现阶段受限于传感器自身的测量精度和特高压装备复杂的结构，操作人员容易对特高压装备的隐患、缺陷、故障分析等进行误判。数字技术能够在特高压装备状态感知方面发挥巨大作用，准确稳定地获取特高压装备物理量，从而对信号的无线传输及状态数据实现精准挖掘，最终提升特高压输电系统的运行可靠性与运维经济性。

前沿技术应用展望：特高压装备的全面感知

数字技术能够提高特高压装备的状态感知水平，5G 通信技术可用于特高压电力装备的状态信息高速低功耗广域传输，实现特高压电力装备的实时感知，人工智能与大数据挖掘技术可用于特高压装备的状态评价与运维决策、电力系统的故障诊断与运行优化等，为特高压输电设备管理与电网运行提供新方法。

换流变压器——换流变压器中采用的感知手段主要包括油中气相色谱、局部放电识别与定位、绕组光纤测温、铁芯振动等，能较好地对变压器内部存在的隐患、缺陷进行

感知。然目前超特高压换流变压器中使用的套管设备市场几乎被国外垄断，由于套管故障导致的换流变压器事故也曾发生，亟需加强对换流变套管的全方位状态感知，包括对电流、局放等电气量与气体、温度、压力等非电气量进行高精度与高稳定性测量。

输电线路——特高压输电线路的传统在线监测系统主要包括雷电在线测量系统、输电线路环境监测系统、导线微风振动检测系统及输电线路视频监控等，在线监测技术较为成熟。然而随着无人机技术的广泛应用，架空输电线路及电缆隧道的带电巡视技术也得到新的发展，传统低效的人工巡视逐渐被高效的无人机巡视所取代。架空输电线路无人机巡检系统进行作业时，主要由地面操作人员根据视觉与回传图像进行无人机飞行与拍摄，因此近年来无人机自主巡检开始被广泛研究并进行试点应用，但目前无人机自主巡检技术仍处于起步阶段，主要基于巡检影像对绝缘子、输电杆塔、输电导线、架空地线、金具及其他附属设施等进行缺陷识别与标记，然而目前识别准确率较低，仍需大量人工干预。

直流断路器——特高压直流断路器是特高压直流输电系统中的关键开关设备，起系统保护与控制作用，目前对于断路器的状态感知主要集中在断路器的机械状态上，主要通过选取合适量程与灵敏度的加速度传感器获取断路器

的振动信号，研究断路器的振动信号特征与诊断方法。

特高压输电智慧运维——特高压电力装备和线路的运维检修策略有故障检修、定期检修和状态检修，当前定期检修是主要的特高压装备检修方法，是在一定的检修周期内对设备和线路进行检修维护，其检修效率低下，达不到实时监测、及时检修的目标。未来，随着人工智能等数字技术的深入应用，能够根据特高压输电过程中运行状态感知信息，在装备或者线路发生故障隐患前安排运维检修，实现“主动式”维修。

前沿技术应用展望：特高压装备的智慧运维

数字孪生、大数据、人工智能等数字技术为特高压输电注入了新的血液，丰富了特高压输电的内涵，能够实现特高压装备的智慧运维管理。

智慧运维管理——数字孪生技术构建了特高压装备及运行环境的数字化镜像，可以在孪生系统中按照现有的管理规定，设置虚拟的巡视策略，并采集巡视人员、检测人员在日常巡视和检测过程中所关注的所有参量，自动报警特高压装备的异常状态，实现数字化技术与现有管理规定的无缝匹配，大幅降低巡视工作对于人力的依赖。

差异化决策——大数据、人工智能技术可实现特高压装备的综合状态感知与状态评价，结合设备台账、运维检修记录等静态数据及在线监测等动态数据，基于同类故障

研判、运行状态推演等方法实现特高压装备的风险评价与聚类，充分考虑特高压装备与输电系统的可靠性与经济性，对各类别、各区域、各运行状态下的特高压装备进行差异化运维检修。

机器人巡检——随着工业机器人制造技术的飞速发展，架空线路无人机巡检、管廊隧道机器人巡检已逐步代替人工巡检投入工程应用。机器人巡检包括巡检定位、图像采集、路线优化、自动充电等，在特高压输电工程的线路运维中，可结合边缘计算与机器人技术，实现“自主巡视—智能诊断—消缺报告”一体化功能，有效降低运维成本，减少人工巡视带来的个体差异性，提高特高压输电系统的运行可靠性与经济性。百度研发的智能巡检机器人，目前应用覆盖我国两条特高压智能化线路、超过 150 个智慧变电站、4 万多条输电线路，累计发现隐患 2000 余处，每天代替人工巡视能源线路超过 7 万公里。

（三）微电网智慧管理

微电网是由多种分布式电源、储能系统、能量转换装置、相关负荷以及监控保护装置汇集而成的小型发配电系统¹⁰，有并网运行和孤岛运行两种模式¹¹。当前，中国微电网示范建设正如火如荼地开展，已研究验证了多项微电网关键技术，

¹⁰ 郑晶,李赓,张艳华,刘林.微电网研究综述[J].电气开关,2016,54(02):1-3.

¹¹ 王成山,王守相.分布式发电供能系统若干问题研究[J].电力系统自动化,2008(20):1-4.

示范项目数量与日俱增，建成了一批边远地区微电网、海岛微电网以及城市微电网。微电网不仅能够有效集成管理分布式电源，还能够根据用户的实际需要定制电能质量服务¹²，促进能源消费者向能源“产消者”转变，提高地区用电的可靠性，同时减少长距离输电带来的损耗和资本浪费。

虽然微电网在推动分布式可再生能源的就地消纳和并网中已经取得了一些成效，但仍面临诸多挑战，例如能量控制和调度效率低、可再生能源渗透率有限、大规模可再生能源带来的不确定性等，成为了制约中国微电网发展的瓶颈。未来，数字技术的融合应用能够打破当前发展的僵局，微电网也将向着高精度、智能化、智慧化方向发展，使得微电网在新型电力系统发展中更好地发挥关键作用。

表 4 中国部分微电网建设情况

名称	类型	系统组成	主要特点
西藏阿里地区狮泉河微电网	边远地区微电网	10MW 光伏电站，6.4MW 水电站，10MW 柴油发电机组，储能系统	“光水火”多能互补、海拔高
西藏那曲地区丁俄崩贡寺微电网	边远地区微电网	15kW 风电，6kW 光伏发电，储能系统	风光互补、西藏首个村庄微电网
青海海北州门源县智能光储路灯	边远地区微电网	集中式光伏发电和锂电池储能	高原农牧地区首个此类系统，改

¹² 张冬卉.智能微电网关键技术的研究[J].中国新技术新产品,2021(13):45-47.

微电网			变了目前户外铅酸电池使用寿命在两年的状况
内蒙古呼伦贝尔市陈巴尔虎旗微电网	边远地区微电网	100kW 光伏发电, 75 kW 风电, 储能系统	并网型微电网
新疆吐鲁番新城新能源微电网示范区	边远地区微电网	13.4MW 光伏容量(光伏和光热), 储能系统	当前国内规模最大、技术应用最全面的太阳能利用与建筑一体化项目
浙江鹿西岛微电网	海岛微电网	300kW 光伏发电, 1.56MW 风力发电, 1.2MW 柴油发电, 4MWh 铅酸电池储能系统, 超级电容储能	微电网并网与离网模式的灵活切换功能兼备
海南三沙市永兴岛微电网	海岛微电网	500kW 光伏发电, 磷酸铁锂电池储能系统	位于中国最南部的微电网
北京延庆智能微电网	城市微电网	1.8MW 光伏发电, 60kW 风力发电, 储能系统	结合中国配网结构设计, 多级微电网架构, 分级管理, 平滑实现并网和离网模式切换
天津生态城公屋展示中心微电网	城市微电网	300kW 光伏发电, 648kWh 锂离子	“零能耗”建筑, 全年发用电量总

		子电 池储能系统，超 级电容储能系统	体平衡
江苏大丰市风电 淡化海水微电网	城市微电网	2.5MW 风力发 电，1.2MW 柴油 发电， 1.8MWh 铅碳蓄 电池储能系统， 海水淡化负荷	研发并应用了世 界首台大规模风 电直接提供负载 的孤岛运行控制 系统

数据来源：赛迪顾问整理，2022.08

微电网能量管理——分布式可再生能源的不确定性给微电网能量管理带来了挑战，能量管理系统是微电网稳定运行的保障，设计有效的控制策略并在有限时间范围内实现预定目标、建立适当的平衡是需要解决的难点。当前主要的方法是通过 DG 的数学建模，制定合理的能量管理策略，但模型的适用性较窄，精确度不高，难以满足微电网高效管理的要求。数字技术的应用能够快速、准确、高效地提取有效特征量，深入挖掘历史数据潜在规律，基于专家决策系统指导高效能量管理策略的制定。

应用场景：基于云平台的微电网能量管理系统

基于现有微电网体系架构，建立基于云平台的微电网能量管理系统，能够降低新能源发电的不确定性影响，减少大规模新能源介入对电力系统的冲击，指导微电网制定高效的控制策略，充分发挥微电源的潜力，提高可再生能

源消纳率。整个系统架构包括数据采集、系统控制、人机交互三个功能模块，首先实时采集设备信息、环境数据和状态参数，通过大数据挖掘对未来微电源系统运行情况进行预判，再利用机器学习、大数据挖掘技术建立起一套完整的控制策略专家库，对微电源能量进行协调管理，最大限度的利用分布式可再生能源。当前，该系统已在国家电力研究院和多个能源电力公司推广运行，达到其微电网的经济最优运行，有效辅助微电网推动分布式可再生能源的就地消纳和并网，助力绿色、节能微电网的发展。

微电网智能调控——随着负荷侧新能源电力高比例接入，微电网源荷特征发生深刻改变¹³，运行控制方式由分布式电源优化控制转变为荷随源动优化控制，使微电网系统稳定控制面临巨大压力。当前，负荷响应分布式发电就地消纳调控主要是通过建立优化调度数学模型，采用某种优化算法制定各类型负荷调控策略，但数学模型优化求解存在运算量大、过程复杂、变量不可微、易陷入局部最优解等问题，难以满足当前日益复杂的微电网高效、高精度优化运行的需求。人工智能的应用能够打破传统的基于物理原理通过建模求解调控策略的思路，借助数据驱动的思维来提高微电网智能化调控性能，为制定微电网负荷调控策略提供新思路。

¹³ 陈志杰,李凤婷,等.考虑源荷特性的双层互动优化调度[J].电力系统保护与控制,2020,48(01):135-141.

前沿技术应用展望：基于人工智能的微电网协调控制

人工智能能够模拟人的思维进行快速判断和高效决策，其中图像识别是应用深度学习算法的一种实践，通过对图像进行处理、分析和理解以达到识别各种不同模式目标和对象的目的。基于图像分析技术能够识别微电网源荷特征的匹配图片，提出相应控制电源波动策略，提高微电网协调控制能力。在微电网负荷的优化策略模型构建中，需要完成二个重点步骤。一是构建**微电网源荷综合特性图像**。以两种特征图叠加为例，根据分布式电源与可调控负荷多维运行数据，例如太阳辐射强度、风速、温度和湿度等因素，结合分布式电源与负荷功率数据构建反映源荷波动情况的图像。同时根据负荷启停状态、类型、剩余可用时间、上调与下调潜力等可调控负荷运行状态因素，构建可调控负荷运行状态图像，叠加两种图像生成下一调控周期微电网源荷综合特性图像。二是基于**人工智能算法匹配特征图像**。例如采用神经网络、加速鲁棒特征等算法提取源荷综合图像特点，并通过欧式距离判别法得到两张图像特征点的粗匹配对，采用 K 均值聚类算法和随机抽样一致算法提取有效的匹配对，完成特征点匹配对的精细筛选，从而达到借鉴历史相似运行状态的微电网调控策略制定下一周期负荷响应分布式电源波动调控策略的目的。

多微电网系统——由于单个微电网集成各类分布式发电系统的能力有限，在大规模提高可再生能源渗透率上仍有一定的局限性，导致了弃风、弃光现象仍然比较严重。多微电网系统能够通过单个微电网间的有效互联消纳更多的可再生能源，但由于其结构相对复杂，仍面临诸多挑战。其中多微电网系统能量管理水平的提高是亟待解决的问题之一，当前主要方法是基于能量管理数学模型来设计并指导多微电网能量管理，现阶段中国已经建立了随机规划模型、鲁棒优化模型等部分多微电网的能量管理模型，但模型的精确度不高，难以应用于多微电网复杂的运行环境。人工智能算法的应用能够显著提高模型的精确度，有效地处理多微电网运行过程中出现的各类不确定性问题，实现多微电网协调稳定运行。

前沿技术应用展望：基于增强学习的多微电网能量管理

增强学习是机器学习的一种，具备对事物较强的感知和决策能力，在复杂的多微电网运行体系中能够精准制定能量管理策略，提高多微电网系统消纳分布式可再生能源的能力。在满足多微电网负荷需求、系统稳定运行的基础上，基于增强学习的最优能量管理模型主要训练二个方面的能力，一是在增强学习的模型框架下，通过分析凝练不同场景下的典型能量管理优化模型，针对典型问题训练相应的增强学习模型方法，例如综合使用有模型和无模型的

强化学习方法，提高深度强化学习网络泛化能力，使其在能量管理建模中更加鲁棒；二是采用先进的智能优化方法，优化深度增强学习的网络结构，提高基于增强学习的能量管理控制优化策略的准确性。

微电网运行与保护——安全平稳运行是保障微电网经济效益提升、推动微电网快速发展的关键要素，当前主要方法是基于经济模型来设计并指导微电网运行，现阶段中国已经建立了部分微电网的经济性运行模型，并模拟不同场景下的微电网系统运行效率以及分布式电源的出力波动性情况，逐步形成了基础的运行理论，但模型的适用性较窄，精确度有限。同时，复杂的网络结构、多变的电力潮流方向、不同的故障特性给传统继电保护下微电网的速动性和可靠性带来了挑战。人工智能算法的应用能够快速、准确、高效地提取有效特征量，建立起精确度高的模型，指导微电网高效运行和安全保护方案的制定。

前沿技术应用展望：微电网智慧管理

微电网智慧运行——在满足负荷需求、系统稳定运行的基础上，进行不同智能算法下最优经济调度仿真，以微电网运行综合效益成本最低为优化目标，确定其经济运行的运行目标函数和约束条件，分别对该微电网系统在正常、异常环境下的经济运行方式展开仿真研究，采用不同人工智能算法对同一工况条件下的微电网系统运行方式进行寻

优，从而制定微电网最优经济运行方式。

基于智能算法的保护——通过小波变换对电流信号进行处理，提取特征值，再结合仿真数据和历史数据，建立不同状况下的微电网特征集合，并将其作为神经网络的输入，在大量的离线训练后可实现故障位置和故障类型的智能判断，最后使用 PSCAD 对典型的微电网进行建模与仿真。

微电网电能交易——微电网电能交易是其接入大电网后必不可少的环节，当前微电网的交易模式仍处在初级阶段，内部交易体制还存在着许多困难¹⁴，例如交易的方式比较单一、交易模式不灵活、电价不透明以及结算时的不对等和不及时等问题，使微电网大规模推行面临阻碍。区块链技术具备可靠性、加密性、不可篡改性、可追溯性的特征，能有效解决目前中国微电网存在的数据孤立、分布不均衡以及能源浪费等诸多问题，同时区块链技术自身特质与微电网存在多种相似特征¹⁵，将其运用到微电网中能够解决电量交易过程中存在的诸多问题，进而满足能源交易与需求量的实时要求。

前沿技术应用展望：区块链中的微电网电能交易

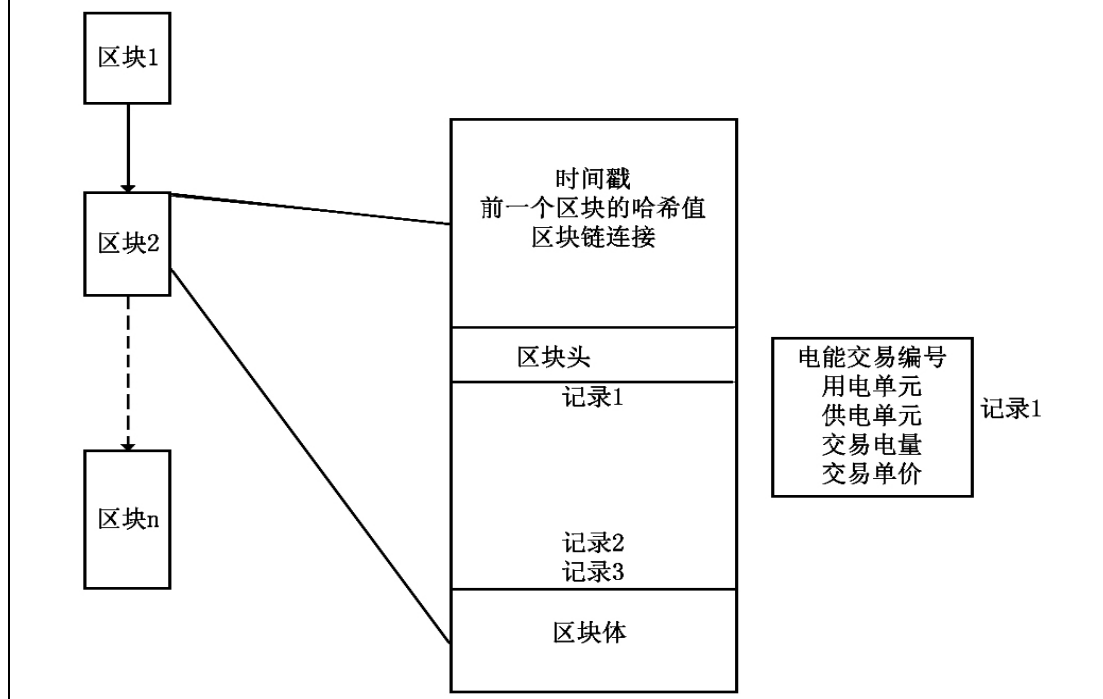
区块链在交易过程中可以实行加密的存储方式，每名用户都可通过自己的区块在微电网中寻求交易对象，选择适合自己的价格和模式，从而实现整个交易过程的隐秘性，

¹⁴ 吴斌,杨超,唐华.区块链技术在微电网中的应用初探[J].电力大数据,2018,21(06):17-22.

¹⁵ 严道波,梅欣,雷庆生,等.电力能源区块链体系结构及应用研究[J].湖北电力,2021,45(04):1-7

同时区块链包含有在一定时间内无法被修改的信息¹⁶, 因此将其应用到微电网的电能交易中具备优势。区块链技术通过各节点单元处的采集装置将资金、信息和电能连接起来构成电能交易体系, 各节点单元通过网络实现能量流、信息流以及资金流的流动。在能量流方面, 区块链和物联网信息技术相融合, 通过哈希运算生成的数据包打包进入区块链, 与用户处的硬件通讯系统结合控制电能的流动。在信息流方面, 引入区块链后可以保证信息的透明和电能来源的追溯, 加盖时间戳的区块链信息通过智能合约自动执行解决纠纷, 并且追溯能量流和数据流。

表 5 微电网电能交易区块链基本架构



¹⁶ 长铗,韩锋,杨涛.《区块链:从数字货币到信用社会》[J].中国信用,2020(03):126.

四、措施建议

当前数字经济的发展为电网数字化发展提供了良好的外部环境，数字技术为新时期智慧电网构建提供了新的技术支撑，特别是人工智能、大数据、云计算等技术的有效应用，为智能电网调度、特高压输电以及微电网建设提供了必要的技术保障。新型电力系统的电源结构变化以及运行环境日益复杂，电网数字化转型仍面临诸多问题，为进一步打造坚强智能电力之“网”，数字电网建设应从数据安全、平台搭建等方面出发，以满足实际建设需求。

加强电网数据安全共享。构建电网数据安全综合防御体系，综合利用数据源验证、大规模传输加密、非关系型数据库加密存储、追踪溯源等先进技术，升级现有电网数据安全体系，实现纵深防御，全面提高电网数据安全技术保障能力。强化电网数据平台安全保护水平，采用接口鉴权等机制、通道加密等手段，提升信息传输过程的机密性和完整性，保障平台数据传输交换安全，建立更加完备的数据访问控制机制，完善平台数据设置备份与恢复机制，加强平台数据存储安全。加强电网数据采集、运算、溯源等关键环节的保障能力建设，强化电网数据安全监测、预警、控制和应急处置能力，以数据安全关键环节和关键技术的研究为突破点，完善电网数据安全技术体系。

搭建数字电网服务平台。加快建立数字电网服务中心，

涵盖智慧电网调度、电网信息安全、电力调度机器人、特高压装备、微电网、智能终端等领域，形成数字电网研发总部集聚和多元化孵化平台，为电网企业提供从孵化、研发到中试产业化的环境与条件。围绕电网企业数字化发展，积极提供在政策、资金、技术、市场等方面的共性服务，协助电网企业争取国家、省级等各类科技项目支持，帮助电网企业获得社会资本的投资，加大电网企业与国家级科研院所及高校的交流互通，构建数字电网招商引资、人才培养、产品展示、产业集聚示范等多层次的创新创业平台体系。

五、本章小结

本章梳理了数字电网发展过程中面临的主要问题，分析了智能电网调度、特高压输电、微电网等重点任务工程建设现状和发展瓶颈，并结合应用场景分析了数字技术在其中的应用情况和前瞻性应用场景。在智能电网建设方面，数字技术深度赋能提质增效，通过营造出一个健康良好的电网运行环境来减少不良因素的干扰，充分利用人工智能、大数据等数字技术来维持智能电网安全可靠高效运行，从而提升电网调控水平。目前数字技术在电网调度的应用案例已有很多，大多都是聚焦智慧调度业务场景，典型的应用场景有电力调度可视化、电力调度智慧系统、电力调度机器人等，但整体应用深度和广度都相对不足，对调度业务支撑的范围和程度还不够，未来需聚焦电网运行特性认知水平的提升、调度控

制效率的提高、运行管理智能化等方面，综合业务需求和技术成熟度开展系统性研究和应用，建成高度集成、一体化的智能调度系统。在特高压数字化装备方面，特高压装备和输电线路的运维管理是两个关键环节，未来特高压输电需要向着高效管理、安全稳定、经济运行、无人值守等方向发展，数字技术成为其快速发展的新动能。目前数字技术应用在特高压输电中的案例较少，基于当前发展的关键问题我们提出了前瞻性的应用场景，例如特高压装备数字孪生的实现能够畅通各环节信息的交互，打破产业链之间的隔阂，提高特高压装备的生产效率和管理水平，其典型的应用场景包括智能制造、智能设计、运维管理等。在微电网智慧管理方面，运行控制矛盾突出、供电可靠性不高、安全保护性能弱、可再生能源渗透率有限等问题阻碍了中国微电网进一步发展。未来，微电网需要向着高精度、智能化、智慧化发展方向，数字技术的融合应用能够打破当前发展的僵局，促进微电网的快速发展。目前数字技术在微电网中的应用尚处于起步阶段，实际应用案例几乎没有，针对微电网能量管理、微电网智能调控、多微电网系统、微电网运行与保护、微电网电能交易等重点关注的五大应用领域，我们提出了前瞻性的应用场景，分别是基于云平台的微电网能量管理、基于人工智能的微电网协调控制、多微电网系统、微电网智慧管理、区块链有效满足微电网电能交易要求。最后针对当前数字电网建设过程

中存在的不足提出了两方面措施建议，即加强电网数据安全共享、搭建数字电网服务平台。

第四章 数字技术支撑多元互动电力之“荷”

一、内容概述

多元互动电力之“荷”是构建以新能源为主的新型电力系统的重要支撑，本章内容总结了电力负荷侧面临的三大挑战，即电力系统低碳发展对绿色用能提出更高要求、新型电力系统与电力市场建设需要协同推进、数字基础设施规模化发展导致用电负荷增长等三个方面，并基于关键问题提出了数字化的解决方案，包括数字技术在工业、交通、建筑和民生等用电领域中的应用，同时结合相应的案例应用进行分析，说明当前相关数字技术应用现状，提出前瞻性应用场景展望，最后总结在电力负荷侧数字技术应用的不足之处，并提出相关建议。

二、面临挑战

（一）电力系统低碳发展对绿色用能提出更高要求

推动电力系统整体实现低碳发展，需要供需两端同步发力，工业、商业、居民生活等重点用电领域推行绿色用能模式，推进用电负荷精准管控，挖掘需求侧资源潜力至关重要。随着分布式电源和电动汽车的快速发展，负荷曲线发生根本性变化，用电设备隐蔽性也不断增加，要求监测手段具备较高灵活性，对需求侧资源进行识别和分析建模。未来，随着需求侧用电规模的不断增长以及用电模式的日趋多样，需求响应的复杂性、互动性和灵活性也不断增强，各类传统和新

兴资源的检测、识别和管理的要求也不断提高，极大地增加了协调控制和运营管理的难度。

（二）新型电力系统与电力市场建设需要协同推进

当前中国电力市场正处于改革发展的关键阶段，随着现货市场的逐步放开，国内电力市场的业务体系也逐渐得到丰富与完善。随着分布式电源、微电网、虚拟电厂等更多灵活资源接入电力系统，供电端新能源电力占比快速提高，电力市场中将会出现更多的如电网企业、负荷集成商、服务提供商、第三方机构等交易实体，未来电能服务的交易方式、调度方式、定价机制将会发生较大的变化。电力交易新业务将对需求响应的精准性与可靠性提出更高的要求，例如现货市场需要精准地匹配负荷目标曲线，辅助服务市场对负荷响应的时效性提出了要求，容量市场则需要售电商对于长期的负荷变动及响应能力有着较为精准的估计。

（三）数字基础设施规模化发展导致用电负荷增长

中国数字经济的蓬勃发展带来了数字基础设施规模的快速增长，近年来以大数据中心、5G基站、新能源充电桩等为代表的“新基建”大规模落地实施，伴随而来的是用电负荷大幅提升。现阶段需求响应水平尚不能满足快速增长用电需求，对于未来的新型电力系统，需要根据不同应用场景，对需求侧资源的控制模式、响应性能、量级要求和运行方式等进行更为严格的管理。

三、数字化解决方案

(一) 工业领域

工业是中国最大的电力消费行业，随着中国工业化进程的深入推进，工业用电量快速增加，从 2012 年的 36061 亿千瓦时增长到 2021 年的 55090 亿千瓦时，年均增速达到 5.28%。虽然近年来在技术进步和国家高标准严要求双重加持下，中国工业节能降耗持续深入推进，但近十年间万元工业增加值电耗年均下降仅为 1.43%，下降速度持续放缓进入平台期，在进一步提高工业电能利用效率方面面临瓶颈，而数字技术的融入有望为工业节能注入新活力。当前，工业用户是需求侧资源利用的主体，也是率先实行需求侧数字化管理的重要对象，尤其在响应能力方面，工业用户与商业、居民等类型用户相比，具有响应容量大、负荷稳定和自动化水平高等优势¹⁷。现阶段数字技术在工业用电管理中已有应用，但工业负荷数据波动性强、数据缺失多、数据不透明等问题依然突出，数据采集和深度感知也是目前亟需解决的难题。

应用场景：工业负荷资源潜力挖掘

负荷短期预测——电力负荷的精确短期预测是电网经济安全运行的有力保障，作为占比最大的用电类别，工业负荷的 70%集中于工业园区¹⁸，其参与电网需求侧响应的潜

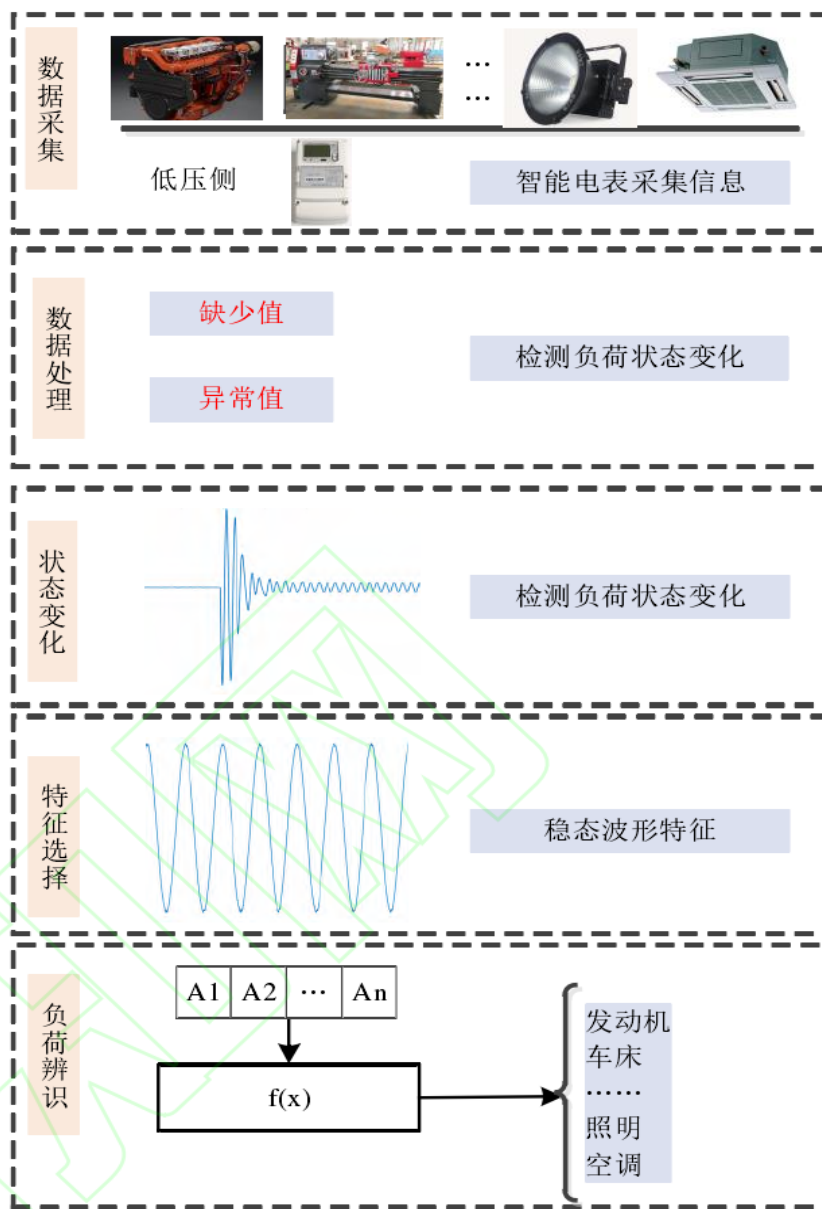
¹⁷ 姚明涛,胡兆光,等.工业负荷提供辅助服务的多智能体响应模拟[J].中国电机工程报,2014,34(25):4219-4226.

¹⁸ 刘思彤. 基于深度学习的短期负荷预测研究[D].沈阳工业大学,2021.

力巨大，对当地电网负荷曲线的影响也十分明显。在电力大数据的环境下，综合分析工业园区负荷特性和多样性，尤其是不同类型工业负荷的特点与各种外在因素之间的密切关系，对工业负荷进行分类，选取影响工业负荷的主要外在因素。基于数据挖掘的理念，依据园区历史负荷数据分析影响电力负荷的主要因素，再基于神经网络、长短期记忆等人工智能算法创建短期负荷模型，得到用户用电缺口。

负荷精确辨识——传统的负荷监测一般安装在设备侧，不需要进行负荷辨识就可以收集设备运行数据情况，其成本高、安装不便，难以满足工业负荷高效安全的运行要求。人工智能技术在工业负荷辨识中已有相关研究和应用，例如非介入式工业负荷辨识，其具备成本低、安装方便、易推广等优势，在工业负荷辨识中有广阔应用情景。非介入式工业负荷辨识包括数据采集、数据处理、状态变化、特征选择和负荷辨识五个环节，智能电表通过低压侧获取有功、无功、电压、电流等工业设备电气特征数据，基于人工智能算法训练测试辨别设备种类，其中随机森林算法辨识准确率可达到 90%以上，辨识时间 3.36s，贝叶斯辨识算法的准确率可达到 60%以上，辨识时间为 6.15s。

图 16 非介入式工业负荷辨识



需方智能响应——工业负荷是实施需方响应的良好平台¹⁹，而传统的价格响应方式存在缺陷，用户对电价的响应过于理想化。结合人工智能智能算法技术，构建智能响应体系，提高供需双向的互动能力，使响应更为准确。例如价格型需方智能响应方面，基于人工智能领域的多智能体系统的理论，构建分时电价调整系统，供电侧能根据用户对

不同电价的响应，按照一定的规则对电价进行调整。工业用户针对不同的电价做出响应调整生产，供需双方能以此进行双向的互动，同时为了防止电价的过度调整，可以设计监督系统的干预功能，防止出现越界现象，最后在多方互动下达到良好的负荷削减效果。

用电智慧管理——通过智能电表采集工业用户用电数据，基于数据挖掘理念，利用人工智能算法搭建高精度分析与预测模型，建立智能用电系统，帮助有节费空间的企业在零投入、零风险、零维护的情况下直接节省基本电费支出，并助力企业从长期稳定的各类增值能源服务中受益。例如中车长江车辆有限公司株洲分公司建设智慧能源管理系统，实现了企业能源精细化管理，用电安全提前预警，降低用电风险，每月基本电费节约 15 万元以上，人员抄录、能源成本核算较原来降低 20%。

（二）交通领域

新能源汽车的规模化发展是大势所趋，而新能源汽车充电随机性、不确定性的特点，为电网安全稳定运行带来巨大挑战。新能源汽车和电网互动（V2G）技术可以有效缓解此问题，利用 V2G 技术可以实现车与网的双向通信和双向能量流，有效管理新能源汽车充放电过程，最小化随机充电负

¹⁹ 史俊祎,文福拴,崔鹏程,孙磊,尚金成,何洋.参与需求响应的工业用户智能用电管理[J].电力系统自动化,2017,41(14):45-53.

荷对电网的冲击，发挥削峰填谷的重要作用。当前，新能源汽车与电网融合在中国仍处于探索期，在安全保障、技术支撑等方面尚不成熟，高效的充放电调度策略将对 V2G 模式的推广应用起到至关重要的作用。此外，新能源汽车的高速发展也势必激发新能源汽车充电桩的庞大市场需求，当前中国充电桩的建设进程较为滞后，存在充电桩网络离线率较高、远程运维管理能力不足、整体利用率低等问题。数字技术的融合应用能够进一步提升充电体验、运行维护、车网协同方面的能力，实现区域、企业、充电桩网络集约运行、智能出行。

应用场景：数字技术在新能源汽车用电中的应用

智能车网互动——V2G 技术包含了功率变换的能量流和能量管理体系的数据流与信息流，传统的电力调度策略已不满足 V2G 模式下的电力调度需求，物联网、大数据等数字技术的应用能够精确预测新能源汽车充放电需求，提升控制策略的鲁棒性。基于 V2G 的系统运行架构搭建新能源汽车充放电大数据平台，聚合分散资源，通过数字化智能化终端，提升区域车网互动分析决策处理能力。整个系统架构包括五个功能模块，先是对区域电网调度系统、配电系统、负荷系统等各单元参数进行采集，再基于深度学习、神经网络等大数据分析技术精准分析不同新能源汽车个体特征数据的准确性，对新能源汽车充放电能量需求及

故障概率进行预测，从顶层控制新能源汽车按统一的调配输出或存储期望的电能，最终达到充放电统一调度的要求。

充电桩智慧运营——利用云计算、大数据、物联网等数字技术搭建智慧充电管理平台，通过终端数字化运营，提高充电桩利用效率，保障充电过程与信息系统安全，实现“车-桩-网”协同高效运行。一是**双向互动**，通过采集来的实时数据，利用边缘 AI 算力进行新能源汽车充电趋势和配电网用电负荷趋势的预测，基于多维度多策略响应充电功率控制算法，对充电运行平台和用户进行智能编排，能根据电网负荷情况，智能协调充电时间，优化充电负荷大规模接入对电网带来的冲击。二是**智能评估**，基于充电场站内多个系统的数据采集和数据融合，构建充电桩健康度评估、充电场站评估模型，对充电桩及充电场站的运行情况进行精确判断，实现主动预警、主动预告。三是**故障研判**，基于图像识别智能算法，建立充电桩起火、异常运行模型，持续训练提升准确度，并通过智能边缘计算物联网联动控制充电场站，实现智能控制。四是**充电桩选址优化**，充分利用周边社区用能情况等海量数据资源，基于数据挖掘的理念，利用机器学习算法进行训练优化，建立充电桩建设合理性评价分析模型，自动判断拟建设充电桩选址的可行性，进一步优化充电桩位置布局，合理配置空间资源，提升充电桩利用率。

（三）建筑领域

建筑能耗约占社会总能耗的 30%，建筑的用电需求增长速度远大于供电的增长，其用电能耗贯穿于从建筑设计、建筑施工到建筑运维全生命周期。近年来，中国各地区为约束公共建筑用能，开展了差别化电价、能耗限额管理²⁰、节能改造等一系列措施，并持续尝试一些多样化的市场激励手段来促进建筑节能。在建筑设计阶段，传统的规划设计较为简单，更多关注建筑整体的美观安全，不过多考虑能耗管理和当地气候特征对可再生能源使用的影响，且建模和定量化的分析较为薄弱，建筑材料设计存在信息不对称问题，低能耗材料和低碳技术的精准选择尤为困难。在建筑施工阶段，传统建筑现浇式施工方式需运行大量施工机械，现场安装时将消费大量能耗，不利于建筑低碳发展，而装配式建筑施工采用机械化安装方式，大幅度规避了建筑废弃物出现且能耗减少超过了 20%，是迎合建筑绿色低碳发展的主流施工方式。在建筑运维阶段，各类型建筑主要设备开机时间较为接近，而由于运行模式不同，主要设备关机时间相差较大，且用电高峰维持时长差异较大。如果公共建筑用户能够积极参与需求响应，“压平”电力负荷曲线，不仅可以实现需求侧的精细化管理，还能大幅提高用电效率。数字技术的应用能够对建筑各

²⁰ 周浩,林波荣,等.基于实测数据的北京市公共建筑电耗限额制定优化方法研究[J].暖通空调,2019,49(03):21-28

环节进行优化调整，将有效改善建筑高能耗现状，并不断推动建筑节能的标准迈向超低能耗和近零能耗。

应用场景：数字技术在建筑用电中的应用

建筑设计——利用大数据、云计算对建筑环境、系统和设备进行规范建模，并通过大数据计算出逐时能耗，综合考虑不同区域、不同气候对可再生能源使用的不同影响，再结合当地环境特征判断建筑适用的系统模型，以此评判新技术与零碳建筑的适配性，对建筑的系统设计方案进行定量优化。根据不同地域气候条件和纳入国家标准的建筑新材料、新工艺和新技术，建立区域建筑大数据管理平台，在确保建材安全性等基础条件上，选择使用节能型材料和技术。

建筑施工——装配式建筑是由预制部品部件在工地装配而成的建筑，其施工方式具有节能环保特点，未来能够发展成为传统现浇式的完美替代品。数字技术的应用主要体现在装配式建筑施工方式当中，通过工业互联网平台对装配式建筑构件全流程周期进行数字化管理，实现构件的协同设计与生产制造、数字化交付以及再生回收利用，提高运营管理效率，显著减少施工过程中的能耗。

建筑运维——建筑运维是用电能耗最多的一个环节，物联网、大数据、云计算等数字技术的应用能够对整个建筑实时监测、预测和反应，降低运维的总体能耗。一是**基线**

负荷预测，由于建筑特性、客户特征、缩减策略及需求时间特征多样性，估算建筑的基线负荷难度较大²¹，现阶段预测更多是基于历史负荷数据和气象数据建立预测模型，其准确度有待提高，机器学习、深度学习等人工智能算法具备强大的非线性拟合能力，能够综合考虑多种因素条件，尤其对于日负荷差异较大的建筑，能够使得预测结果更为精确。首先用聚类算法将建筑负荷特性归为几类，综合考虑当地天气和建筑特征等因素，随后通过大量的样本训练，建立基线负荷关于历史负荷、天气、节假日、日期等因素的神经网络预测模型，利用该模型对参与电力需求响应的公共建筑进行基线负荷预测，其预测精度能够达到 90%。二是**能耗监控**，通过连接电表、水表、流量计、燃气表等装置采集实时能量使用情况，使用计算机数据录入转换，自动生成各种形式的图表，并传输至大数据监控系统中，实现对建筑设备的远程集中控制管理，同时基于机器学习算法建立能耗预警模型，根据实际情况自定义时段、自定义策略、自定义阈值，对能耗过大、能效过低的现象进行预警，实现对建筑设备的自动化节能调控。

“光储直柔”系统——“屋顶光伏发电-建筑储电-直流电系统-柔性供电用电”的系统模式，使建筑从电力消费者转变为电力系统生产者、消费者和储存调控者。大数据、云

²¹ 宇春霞.基于电力需求响应的建筑基线负荷预测方法研究[J].绿色建筑,2017,9(04):43-45.

计算等数字技术能够赋能建筑柔性用电，使建筑用电从刚性负载转变为柔性负载，激发建筑用户负荷调节潜力。当前数字技术支撑“光储直柔”建筑柔性用电已有部分示范应用，例如在深圳市每年 350-400 万平方米新建建筑中，通过该项技术应用，直接碳减排量可达到 10 万吨/每年，相当于减少深圳市每年碳排放增量的 12-15%。

（四）民生领域

近年来，居民生活电气化水平普遍提升，居民的用电需求呈现多样化和个性化，用电负荷呈现高速增长的态势²²，随着未来控制技术和管理手段的丰富完善，居民用户的资源利用潜力也将快速释放。现阶段数字技术在居民用电中已出现智能用电大数据分析、多元用电服务等应用，但由于居民用户具有数量多、分布广泛、随机性强等特点，面向居民用户的智慧能源服务需要针对不同用户的用能需求开展专业化精准服务，需要物联网、大数据、人工智能等数字技术的综合运用，才能实现居民用户与电网的友好互动。

应用场景：数字技术在居民用电中的应用

居民智能用电——运用物联网、大数据、人工智能等数字技术，构建家庭物联网，将各类家庭电器设备串联成一个有机整体，全面推进数据融合贯通和信息感知、采集能力提升。通过全息感知家庭水、电、气、热等多源用能数

²² 李琳,姚国风,唐新忠.中新天津生态城智慧家庭用电互动服务系统建设[J].供用电,2016,33(01):61-66.

据，深度挖掘数据背后的核心价值，刻画居民精细化用能画像，获取居民精准用能需求，充分调动系统内外部服务资源，为家庭用户提供定制化的智慧用能服务。

图 17 居民侧智能用电系统架构



居民用电分析——通过泛在感知终端全面采集居民家庭内部的用电数据，基于大数据分析充分挖掘居民用户用能、需求响应等行为特性，对用户数据进行聚类分析，构建用户智能画像，为用户提供能源监测、精准推送、能源优化规划、诊断分析等优质用电服务。用户画像的建立可帮助电网企业对于不同的居民用户针对性提出智能用电需求响应及调控措施，并根据智能用电互动效果开发新型服务模式及商业盈利模式，从而达到节能减排、改善负荷曲线的目的。

居民能效管理——通过智能电表等终端感知设备收集用户的能耗信息，基于数据挖掘技术分析居民家庭内部的

节能潜力，从而定制能效提升策略，例如提醒用户及时关闭待机、为热水器设定符合用户使用习惯的定时方案等。另一方面，通过数据挖掘技术将具体的能耗信息进行对比分析，主要是分别与国内外的标准进行同期对比，从而得到负荷侧设备是否具备节电潜力，基于分析结果采用有效措施来引导用户应用先进的节能技术和设备，以便提高终端用电率。

居民侧需求响应——用户细分方面，利用数据挖掘技术中的聚类算法将用户进行合理分类，针对每一类用户分析其相关关系来确定不同的分时电价范围。峰谷电价方面，基于用户细分分类，根据边际成本分摊的峰谷定价模型来确定不同分时电价的峰谷电价。峰谷时段方面，采用模糊聚类的方法，构建含有用户对峰谷分时电价响应度的模型，再根据该模型进行二次聚类分析，最后求得最优化的峰谷时段划分。

智能用电服务——基于大数据、人工智能技术建立智能客服应用系统，覆盖全渠道、全流程、全数据的营销业务，实现业务办理智能辅助、智能客服、精准营销、流程自动化等应用，为用户提供统一的智能化服务。例如国家电网客服中心构建了人工智能服务体系，搭建 AI 基础平台和 AI 运营平台，在智能客服、智能座席等多方面得到应用。智能客服方面，实现了智能语音对话服务场景，代替传统

IVR 按键场景，目前天津、北京、河北、山西等 27 个省(市)公司已完成智能客户建设，上线 15 个智能服务场景，日均服务量超过 5 万人次。智能座席方面，实现了智能人机辅助、智能座席工作台、客户服务轨迹展示、回访座席辅助及智能座席应用统计等多项功能，共支持 78 个服务流程和 2 万条信息的实时获取。

四、措施建议

随着中国电力消费需求的增长，电力系统用电负荷不断增加，负荷侧资源的利用潜力巨大。虽然数字技术在工业、居民、交通等重点用电领域中均有应用，但应用程度尚不深入，随着分布式能源、新能源、储能等发展和数字技术的不断创新，电力消费模式正在发生深刻变化。随着更多的电力用户参与到电力生产中，将形成虚拟电厂、负荷聚合商、综合能源系统等多种新业态，更加注重需求响应和精准实时负荷控制在保障电力系统安全稳定经济运行中的作用，需要政府企业、金融机构等主体共同发力，构建完善的市场体制机制和金融支撑体系，推动负荷侧实施更为广泛深入的数字化管理，实现负荷侧资源高效挖掘。

健全市场机制。通过电力市场体制机制的不断完善，推动新兴市场主体参与电力市场交易，利用价格信号激励需求侧积极实施数字化管理，挖掘负荷侧响应资源，主动参与系统调节，减少系统运行峰谷差。从交易主体、交易规则等角

度出发完善市场体系，一方面将新兴市场主体纳入电力市场交易主体范围，允许新兴市场主体参与电力现货市场、辅助服务市场等，为新兴市场主体提供价格信号和经济激励；另一方面完善调度规则，将新兴市场主体资源利用纳入电网调度，精准掌握新兴市场主体的资源规模和可利用潜力，率先在重点省市开展试点，总结试点经验，形成规范化的新兴市场主体资源利用工作体系，逐步推广应用。

加大金融支持。引导基金投资方向，重点关注大数据、人工智能、物联网、云计算等技术赋能负荷侧数字化发展，加大在工业、建筑、交通等领域数字技术应用方向的投资力度，重点在数字技术提升电力需求响应方面提供资金支持。推动更多财政资源向用电数字化管理方向倾斜，加强科技专项引导，通过研发补助、贷款贴息、项目奖励等方式，支持数字技术赋能负荷侧资源高效挖掘的创新应用开发。鼓励开展公私合作，围绕数字化用电管理、工业智能响应、车网智能互动、居民智慧用电等重点方向，实施一系列地方示范工程项目，调动社会资本和产业投资的积极性。

五、本章小结

本章梳理了电力负荷侧发展过程中面临的主要问题，围绕工业、交通、建筑、民生等重点领域分析用能特征和现状，并结合应用场景分析了数字技术各领域的应用情况和前瞻性应用场景。在工业方面，工业用户是现阶段需求侧资源利

用的主体，具有响应容量大、负荷稳定和自动化水平高等优势，现阶段数字技术在工业用电管理中已有大量应用案例，典型应用场景有工业负荷短期预测、工业负荷精确辨识、工业需方智能响应，但工业负荷因行业不同具有不同特性，导致负荷辨识、短期预测、需求响应等方面均难以精准实施。面向工业负荷资源的有效挖掘，数字技术应更多聚焦于通过模拟微观个体的行为反映宏观系统，不断提升模型的精确度，准确掌握工业行业用电规律，从而高效管理工业负荷资源。

在交通方面，新能源汽车充电存在随机性及不确定性等特点，使得电网安全稳定运行面临巨大挑战。现阶段数字技术其中有少部分应用案例，典型的应用场景有智能车网互动、充电桩智慧运营、新能源汽车负荷预测等，但更多是停留在相关文献研究，未来有待进一步融合发展。

在建筑方面，用电能耗贯穿于建筑全生命周期，其中建筑运维阶段能源消耗最为突出，建筑基线负荷难以预测阻碍了公共建筑参与电力需求响应，人工智能技术的发展为其提供了一条可行的路径，通过智能算法建立的模型能够有效预测建筑基线负荷，从而有效参与到需求响应中来。

在民生方面，居民侧是电力服务的核心对象，综合运用物联网、大数据、人工智能等数字技术，能够实现居民用户与电网的友好互动。现阶段数字技术在居民用电中已有很多应用案例，典型的应用场景有居民智能用电、居民用电分析、居民能效管理、居民侧需求响应等。

最后针对当前负荷侧数字化建设过程中存在的不足提出了二方面措施建议，即健全市场机制、加大金融支持。

第五章 数字技术赋能安全可靠电力之“储”

一、内容概述

安全可靠电力之“储”是构建以新能源为主的新型电力系统的重要保障，本章内容总结了我国储能发展面临的三大挑战，即提升新型电力系统电力供给能力和品质、增强新型电力系统电网灵活性和安全性、探索新型电力系统消费新场景和新模式等三个方面，并基于关键问题提出了数字化的解决方案，包括数字技术在电源侧储能、电网侧储能、负荷侧储能中的应用，同时结合相应的案例应用进行分析，说明当前相关数字技术应用现状，提出前瞻性应用场景展望，最后系统总结在储能侧数字技术应用的不足之处，并提出相关建议。

二、面临挑战

（一）提升新型电力系统电力供给能力和品质

储能技术是实现能源多样化的核心，风电和光伏都具有不稳定性、不连续性的特点，而大规模的新能源电力并网必然会对原有电力系统造成一定的冲击。储能技术可以平抑新能源发电出力波动，大大减轻电网稳定运行的压力，提高电网对新能源的消纳能力，储能技术响应速度极快，而且储能系统可帮助实现自动化信息化智能化，方便电网进行调度。但与此同时，面对发电端不同状态和类型的运行机组，需要储能在其中发挥动态调节作用，合理有效配置资源，这对发

电侧储能系统容量合理配置提出了更高要求。

（二）增强新型电力系统电网灵活性和安全性

电网是一个发输配用瞬间完成的动态供需平衡系统，除去功率上平衡之外，为保证电网安全，电网的电压波动和频率波动也要控制在一定的范围之内，同样重要的电能质量参数包括电网谐波、三相平衡度等。目前电网维持这种供需平衡和控制电能质量水平在很大程度上依赖于各级调度部门。电网侧配置的分布式或独立式电池储能电站可以增强新型电力系统电网灵活性和安全性，同时代替现有火电调频机组、调峰机组、无功发电机组、事故备用机组、可控负荷等，具有一定的经济价值。但作为一种电力电子技术与动力电池技术相结合的新型电能装置，在发挥保障电网安全运行作用的同时，如何保障其运行的高效性和安全性是个难题。

（三）探索新型电力系统消费新场景和新模式

负荷侧储能是商业化应用最早领域，从现实需求来看，储能可帮助用户“削峰填谷”，节省用电成本，有利于电力系统均衡供应电力，降低生产成本并避免部分发电机组频繁启停造成的巨大损耗等问题，从而保证电力系统的安全与稳定。随着电力体制改革的推进，负荷侧储能多重价值显现，微电网、增量配电网、用户主动参与辅助服务都将给储能带来机会，负荷侧储能必将成为最有潜力的储能发展领域。而多元化的储能用户必然带来配置不合理、主体分散、布局困难、

传统市场交易模式不匹配等诸多问题，这将使未来负荷侧储能的发展面临巨大挑战。

三、数字化解决方案

（一）电源侧储能

目前，中国可投入商业化应用的储能技术有抽水蓄能、压缩空气储能、飞轮储能、电池储能、蓄热储能等，其中除抽水储能外均可应用于电源侧储能。储能技术在电源侧可发挥平滑波动、一次调频、减少弃电的功能，能够提高紧急无功支撑，解决大规模新能源并网问题，从而提高电网对新能源的消纳能力。然而，诸多电源侧储能项目未考虑到可再生能源的广域自平滑特性，导致出现储能项目布点位置不合理、容量配置过大等问题。当前数字技术在电源侧储能问题解决中已有部分应用，例如通过大数据分析在布点位置选取、容量配置、运行调控等方面进行优化，从而保障储能项目高效、经济运行。

应用场景：大数据技术在电源侧储能中的应用

通过能源互联网进行数据采集、分析，建立电源侧机组节能调度多目标优化模型，运用遗传算法等大数据分析算法进行求解，提出储能充放电策略，以成本最低、低碳效益最大等为优化目标，利用粒子群算法、遗传算法等解决储能系统容量配置的一系列优化问题，将不同运行状态和类型的机组优化组合，动态调整发电状态，提高能源利用

率，实现资源有效配置，从而提高发电商的供给补偿效益，达到节能减排目标。同时，大数据技术还能够支持新能源配额交易、绿电交易、互动用电、节能服务、分布式供电设施的监测与运维等多种新型业务。

未来前沿技术应用展望：未来，电源侧共享储能将是重要的应用方向，通过整合电源侧储能站，为新能源电场提供弃风弃光的电量释放与存储，缓解清洁能源高峰时段的电力电量消纳困难从而实现电源侧“储能于厂”。同时储能技术响应速度极快，可实现信息化、自动化和智能化，储能的调峰调频能力方便电网进行调度。

（二）电网侧储能

电网侧储能区别于电源侧和负荷侧，是应用于输配电领域的储能类型。作为输配中优质的有功无功调节电源，它的主要功能是有效提高输配安全运行水平，实现电能的时间和空间上的负荷匹配，增强可再生能源消纳能力，在提高电网安全稳定运行水平、增强电网薄弱区域供电保障能力、提升电力系统应急保障能力等方面意义重大。现阶段电网侧储能的研究和应用较少，尚处于初步发展阶段，相比源、荷侧储能，电网侧储能的应用需结合区域输配的特性与储能多功能应用需求，聚焦储能选址和储能配置问题的解决。目前中国电力行业处在建造智能输配时期，数字技术已有部分应用，例如大数据技术可以加强电力系统中的输电能力，降低输电

环节电力的损耗，未来数字技术也将在电网侧储能问题的解决中发挥关键作用。

应用场景：大数据技术在电网侧储能中的应用

通过数据采集、传输、处理、服务等大数据技术获取能源互联网中输配、天然气网、信息通信网、电气化交通网、运行状态数据，经过数据处理、聚类、数据分析，提供改进的控制策略。大数据的价值主要体现为提升输配企业经营管理效率以及服务输配企业用户，例如在输电阶段通过数据采集输电环节的各个线路实时信息数据，制定合理的输电方案，大大降低电力线损率。

未来前沿技术应用展望：未来，电网侧共享储能尤为重要，利用输配现有资源，在变电站设置可供储能接入标准的插座，整合中小储能企业移动式储能资源，吸收弃风弃光的电量，根据国网三站合一建设要求及输配需求放电，实现灵活移动的共享储能在电网侧“储能于站”。人工智能技术通过集成简化技术的方式改善现有的储能技术，包括可再生能源的微输配、抽水蓄能、公用事业规模的电池储能等。随着储能技术的进步和成本的逐渐下降，智能储能在输配辅助服务中的作用越来越重要，当有供需缺口的时候，AI可以实现有效分配并且可以节省功耗供以后使用。集成不同的多个存储系统可以最大程度地发挥作用，而且智能能量存储系统通过改善间歇性发电引起的电压控制和

频率可以进一步提高安全性。

（三）负荷侧储能

目前，中国很多地区工业用电实行峰谷电价政策，不同时段电价不同。储能技术可实现在电价低谷期时将电储存起来，在电价高时再释放出来。随着储能技术不断发展，电池成本的不断下降，企业利用储能技术实现电价“削峰填谷”已成为可能，也是目前负荷侧储能的“常规动作”。现阶段负荷侧储能数字化解决方案已有较多案例，例如储能大数据平台、用电智能监测等，未来数字技术有望与负荷侧储能深度融合，助力其全面发展。

应用场景：数字技术在负荷侧储能中的应用

大数据技术的应用——储能可通过“削峰填谷”为消费者节省用电成本、降低消费停电风险、降低容量电费、提高电能质量、并参与需求侧响应，可通过节省扩容费率、峰谷电价差、用电响应、等降低用电成本从而发挥多重价值。目前，负荷侧储能产业领域缺乏规范的互联网平台来拓展业务。设计以云服务器为主站，移动端应用作为交互前端，以“政府、输配、消费、商家”为服务对象，采集系统的大数据，接入用电信息，贯通储能从“设计、接口、建设、运维”环节，实现引导负荷侧储能合理布局，精准测算出消费储能经济效益并智能感知工商业消费储能配置需求。实现储能主体广泛互联、储能运营主体智慧互动、储能效益价

值共创产业生态圈，以储能基础设施和输配为依托，以大数据技术为基础，储能电力云交易作为主要业务收入盈利模式，构建大数据平台商业运营模式。依托大数据平台开展储能电站的并网检测，对不同厂商设备的技术评估，建立储能标准体系，有序的参与电力市场交易，提升储能效益和效用价值，助力储能产业的商业化进程。

物联网技术的应用——物联网技术在清洁能源生产中连接发电、输电、配电和储电设备上的传感器，远程实时监控设备工作，可以降低运营成本。通过能源物联网连接各类新型业务需要深度和广度的数据连接支持（包括智能电表、碳排放、智能运维、能效管理、能耗监测、负荷侧电器、充电桩等），可以为智慧储能的许多应用场景提供基础数据连接，实现高效化、清洁化、市场化的开发应用，促进节能减排，辅助实现能源电力的高效化消费。目前，智能小区是物联网重要应用之一，包含用电信息采集、互动服务、配电自动化、储能负荷侧分布式电源、电动汽车充电、智能家居等新技术，综合计算机技术、通信技术、测量技术、控制技术等多学科技术领域，是多系统、多领域协调的集成应用。用户可以利用这些信息识别用电浪费，尤其是一些耗电设备，从而节省能源费用。

未来前沿技术应用展望：区块链技术的迅猛发展为储能商业模式注入新的信息驱动力，利用区块链的共识算法、

加密技术、分布式存储、智能合约实现多主体交易的智能研判和快速融合，形成交易全过程的大账本，能源数据的不可篡改和精准追溯，最终满足能源交易公正、公平、公开的要求。“区块链+负荷侧共享储能”将是储能的一种创新商业模式，当新能源高发时段吸收电力，利用智能楼宇或电动汽车等储能装置，对电动汽车进行充电，其他时段释放电力，实现负荷侧“储能于荷”。在区块链技术的保障下，新能源和储能就像买卖股票一样，轻松便捷的进行市场竞价交易。

四、措施建议

储能处在快速发展过程中，数字技术融合发展进程加快。当前储能呈现多元化发展趋势，在电源侧、电网侧、负荷侧皆发挥重要作用，且数字技术在其中都有不同程度的应用。但不同的储能类型均有其各自优缺点，并没有十全十美的储能技术，对于数字技术在储能中的应用，应聚焦于应用场景或需求，综合考虑储能容量、功率、效率、寿命、成本及存储时间等因素，创新储能新模式。现阶段已有的数字化技术已不满足储能发展新要求，针对数字储能存在的突出问题，尤其是负荷侧储能领域，亟需加强系统基础理论研究，加快前沿适用技术开发，提升数字化储能创新能力支持，同时培育储能数字服务企业，强化数字技术赋能供给。

加强基础研究和前沿技术布局。强化储能基础理论研究，

构建以市场为导向、企业为主体，产学研相结合的科技创新体系，重点围绕发电侧储能系统容量合理配置、电网侧储能安全高效运维、负荷侧储能成本布局等问题开展学术研究。推进“以合作带研发，以研发促成果”的发展模式，利用高等院校、科研机构的科技研发实力，重点推进负荷侧储能的创新，加速成果转化。着眼数字前沿领域，在数字储能领域超前布局未来数字技术发展，加大云计算、物联网、大数据、人工智能、下一代信息通信等技术研发和试验力度，推动技术升级迭代，满足未来储能数字化发展复杂多变的要求。

加快先进适用技术开发和应用。强化关键技术开发，加大储能接入电力系统的大数据实时交换、信息处理与融合等技术攻关，提高储能系统数据信息感知能力。加大区块链在储能领域中存储、加密、共识、跨链等技术研发，助力储能深度参与电力市场交易。积极推进大数据技术在储能的深度应用，主要聚焦储能数据汇聚、监测管理、建模分析等方面，提升应用水平，扩展应用广度。面向电源侧、电网侧、负荷侧储能，开展重大储能数字化技术示范应用，引导储能企业积极主动开展数字转型升级研究。

培育数字储能第三方服务主体。丰富储能数字技术服务供给，增强数字化储能产品和解决方案的供给能力，最大程度发挥供给端牵引作用，促进数字技术进步拉动储能数字发展。积极开展组织供需对接，建立数字化储能可信服务商、

优秀数字化储能产品与服务评价体系，征集、培育和推广一批技术力量强、服务效果好、深受企业欢迎的数字化储能服务商、优秀数字化储能产品与服务。通过在线直播、视频展播、线上对接等形式，实现数字化储能技术、产品、服务展示互动与对接交易。鼓励支持数字技术企业创建储能服务公司，提升技术创新水平，培育推广一批符合电源侧、电网侧、负荷侧储能需求的数字化平台和系统解决方案。

五、本章小结

本章梳理了储能侧发展过程中面临的主要问题，分析了电源侧、电网侧以及负荷侧储能发展现状，并结合应用场景分析了数字技术在各领域的应用情况和前瞻性应用场景。在**电源侧储能**方面，诸多电源侧储能项目未考虑到可再生能源的广域自平滑特性，导致出现储能项目布点位置不合理、容量配置过大等问题。数字技术在电源侧储能问题解决中已有部分应用，例如通过大数据分析在布点位置选取、容量配置、运行调控等方面进行优化，从而保障储能项目高效、经济运行。未来，电源侧共享储能是重要的应用方向，通过整合电源侧储能站，为新能源电场提供弃风弃光的电量释放与存储，缓解清洁能源高峰时段的电力电量消纳困难从而实现电源侧“储能于厂”。在**电网侧储能**方面，储能选址和储能配置是面临的主要问题，数字技术已有部分应用，例如人工智能技术通过集成简化技术的方式改善现有的储能技术，包括可再

生能源的微输配、抽水蓄能、公用事业规模的电池储能等，当有供需缺口的时候，AI可以实现有效分配并且可以节省功耗供以后使用。同时电网侧共享储能尤为重要，如何实现灵活移动的共享储能在电网侧“储能于站”将是未来的研究方向。在负荷侧储能方面，企业利用储能技术实现电价“削峰填谷”已成为可能，现阶段负荷侧储能数字化解决方案已有较多案例，例如储能大数据平台、用电智能监测等，未来数字技术有望与负荷侧储能深度融合，助力其全面发展，“区块链+负荷侧共享储能”就是储能的一种创新商业模式，当新能源高发时段吸收电力，利用智能楼宇或电动汽车等储能装置，对电动汽车进行充电，其他时段释放电力，实现负荷侧“储能于民”。最后针对当前数字储能建设过程中存在的不足提出了三方面措施建议，即加强基础研究和前沿技术布局、加快先进适用技术开发和应用、培育数字储能第三方服务主体。

第六章 数字技术助推“源网荷储一体化”

一、内容概述

“源网荷储一体化”是中国新型电力系统建设的重要内容，也是推动新能源顺利承担起主力能源地位的系统性解决方案。本章内容总结了我国“源网荷储”一体化建设面临的三大挑战，即重塑“源网荷储”电力系统新架构、转变“源随荷动”的传统运行模式、强化“源网荷储”一体化运维管理等三个方面，并基于关键问题提出数字化的解决方案，包括数字技术在协同体系规划设计、深度互动系统搭建、运行系统高效管理等方面中的应用，同时结合相应的案例应用进行分析，说明当前相关数字技术应用现状，提出前瞻性应用场景展望，最后系统总结在“源网荷储”一体化建设中数字技术应用的不足之处，并提出相关建议。

二、面临挑战

（一）重塑“源网荷储”电力系统新架构

我国传统的电力系统架构是以大电网为主体，整体呈现集中式形态，内部控制是以模型预测为核心，系统运行过程各要素确定性强，源网荷各环节界限分明。未来随着新能源电力、微电网、分布式电源、储能等新要素不断融入电力系统，大量数据信息将贯穿电力系统全局，能量与信息交织互动将更加紧密，将逐渐形成具有“能源电力一体化”“大电网+主动配电网+微电网”“泛电气化”等特征的电力系统新架

构。在新型电力系统架构下，传统电力运行模式不再适配，系统不确定因素增多，运行风险大幅提升，如何规划建设基于系统全局的“源网荷储”融合发展体系，从而提升电力系统整体运行效率和平衡稳定能力成为亟待解决的一大难题。

（二）转变“源随荷动”的传统运行模式

在传统电力系统中，主要调控模式是“源随荷动”，即通过可控的火电发电系统去匹配不可控但可预测的用电系统，时刻保持电能生产和需求平衡。近年来，电力系统中新能源装机占比及用户侧间歇性负荷快速增长，源荷两侧的不确定系数显著增大，为保障电力系统的平稳运行，传统的“源随荷动”运行模式亟需向“源网荷储”多元互动运行模式转变。运行模式的转变需要电力系统整体升级和各参与主体共同发力，对“发-输-配-售-用”各系统环节的配合度提出了更为严格的要求，尤其在超前预判、精准控制、快速优化、实时响应等多方面均面临严峻的挑战。

（三）强化“源网荷储一体化”运维管理

“源网荷储一体化”系统能够将自备电厂、微电网、传统高载能工业负荷、工商业可中断负荷、电动汽车充电网络等分散性资源紧密聚合，形成具有庞大规模的市场主体，主动参与系统调节，提升电力系统“韧性”。但这些灵活性资源普遍具有规模小、难管理的特征，不利于“源网荷储”一体化高效运行，例如分布式能源的随机性、波动性、间歇性的

特点造成聚合利用时效性差，新能源时空不匹配，运行系统很难达到理想的能源利用效率。与此同时，目前“源网荷储一体化”主要通过双向通信技术实现“发-输-配-售-用”各环节大量数据与信息交互，但是缺乏针对“源网荷储”网络信息安全的专用保障体系，存在关键数据的非授权获取和被非法篡改的风险，威胁“源网荷储一体化”系统运行的安全。

三、数字化解决方案

（一）协同体系规划设计

系统规划设计是推进“源网荷储一体化”建设的前提和保障，能够指导新形势下新型电力系统的构建。在传统的电力系统架构中，源网荷储之间的连接互动较为简单，没有涉及多元协同融合以及过程中的电能存储分配，并且不需要考虑供需两侧在变化过程中的动态平衡，因而电力系统规划模型构建和分析方法简单容易。在“源网荷储一体化”的框架下，传统的电力规划不再适配，单一仿真手段难以达到理想效果，适时引入大数据、云计算等数字技术到规划体系中，能够优化模型并大幅提高运行数据结果的精确性，模拟“源网荷储”一体化多类型复杂运行场景，满足复杂情景分析、精细化设计等方面的要求，高效指导“源网荷储一体化”建设项目的推进。

应用场景：基于云计算的电力规划决策平台

综合考虑安全、经济、绿色目标，集成融合能量管理系统、地理信息系统、用电信息采集等业务系统数据，建立“源网荷储”协同的电力系统规划模型，结合高效率、高精度机器学习算法，能够快速收集、筛选、分析、汇总、展现决策者所需要的信息，模拟规划后“源网荷储”一体化运行场景，实现复杂情景的可视化。同时，利用智能云技术，实现规划数据资源的分布式维护和结构化管理，动态分配计算校核、规划方案优选等计算任务，满足源网荷储不同层次、不同业务类型的计算需求，为区域、市县、园区等不同层级的“源网荷储”一体化规划项目辅助决策提供全面支撑。

（二）深度互动系统搭建

源网荷储各环节友好互动是传统“源随荷动”调度模式转变为“源网荷储”的关键，对“源网荷储一体化”系统高效稳定运行至关重要。现阶段中国“源网荷储一体化”项目中普遍存在多元协同控制能力弱的问题，系统各环节互动不足，数字技术为其提供了有效的解决方案，即通过利用现代信息通信技术、人工智能技术、大数据技术、物联网技术等，运用“互联网+交互管理”的新模式，能够充分提高系统实时响应能力，实现互联网式的多向交互。目前建立在数字技术基础上的源网荷储友好交互系统在实际示范项目中已有应用，并取得了较好的应用效果，随着电力企业应用运行模式

的成熟和配套管理制度的不断完善，未来将在源网荷储深度互动方面发挥巨大潜力。

应用场景：“源网荷储”的智能互动

基于“源网荷储”资源数据接入标准，结合云计算、物联网、区块链等数字技术，建设“源网荷储”泛在资源互动管控云平台，打通不同调控主体间的信息壁垒，实现海量新能源和可调资源的汇聚和在线感知，为各应用场景下泛在资源友好互动响应创造了优势条件。利用大数据技术进行数据清洗，在传统调度数据的基础上结合接入的分布式电源、电动汽车、储能、综合能源体等资源特性，从而更充分的挖掘各类数据应用价值和深度，推动智能电网进一步扩展为“源网荷储”智能互动多元协调的调度控制中心，更好的促进清洁能源的消纳。目前在华东电力调控分中心建设了全国首套完整的“源网荷储”多元协调控制系统并进行了资源响应示范应用，该平台的应用能够使得新能源出力占用电负荷比例提高至 50%左右。

（三）运行系统高效管理

各类灵活分散的资源聚合为一体增加了系统的复杂性和不确定性，这必然给“源网荷储一体化”运行带来了管理维护上的难题。数字技术为其提供了行之有效的解决方案，即通过数字化的精细管理提升系统整体运行的效率，并不断优化提升运营管控能力，在确保系统安全稳定运行的基础上

最大程度的促进新能源消纳。现阶段数字技术在“源网荷储一体化”运维管理中已有部分案例，例如通过物联网和云计算技术搭建“源网荷储”综合资源管理系统，实现源、网、荷、储各环节运行态势全景感知；通过引入边缘计算和区块链技术，完善源网荷储的调度控制架构，更大程度的提升系统运行实时性、扩展性和安全性，实现运行优化升级。

应用场景：“源网荷储”资源智慧管理

利用物联网、云计算等数字技术，将集中式新能源场站、分布式电源、储能、电动汽车、负荷聚合商、智能楼宇、非工空调、工业大用户、虚拟电厂等新型能源、用能设备等信息汇聚接入，并通过边缘计算实现业务的实时性和数据优化，打造“源网荷储”独立资源综合管理平台。平台的应用对内可为电网运行、调度管理、计划检修、市场交易提供基础数据与技术支撑，对外可为电力企业和电力用户提供电力交易所需电网运行信息，实现资源合理高效配置。同时利用大数据及人工智能技术，采用仿真分析和事件驱动的模式，对“源网荷储一体化”运行的实际情况及故障反演其发展过程，形成不同运行场景下的控制策略，有效支撑系统在真实运行场景下安全稳定经济运行。目前华东电网已有相关项目示范，相比传统调峰模式，在同一时间段之间，通过源网荷储综合资源管理平台发布调峰需求引导新兴市场主体参与调峰，能够使新能源消纳比例提高至 60%

左右。

四、措施建议

“源网荷储一体化”建设正处在加速推进阶段，已有多 个示范项目投入建设，例如三峡能源内蒙古乌兰察布“源网荷储一体化”综合应用示范基地项目、新疆巴州 1GW“源网荷储一体化”项目等。目前数字技术在“源网荷储”一体化建设过程中已发挥了重要的支撑作用，且在系统规划设计、运行模式转变、管理效率提升等方面都有不同程度的应用，但仍存在应用范围小、融合程度不深等突出问题。未来随着新型电力系统不断发展成熟，源网荷储各环节必然会向着深度融合方向发展，亟需从体制机制、规划统筹、标准体系等政策制度方面着手，强化关键要素保障，夯实数字技术与“源网荷储一体化”深度融合基础，加快形成系统完整的数字技术支撑体系，全面赋能“源网荷储一体化”建设。

强化机制保障。以“源网荷储一体化”发展为建设目标，发挥国家能源主管部门的统筹协调作用，健全高效的“源网荷储”数字化组织协调机制，梳理和界定相关部门职责，统筹各级各部门力量，形成上下协同、多部门联动协同的组织体系，全面推进数字技术在“源网荷储一体化”中的应用。依托行业协会、科研院校和龙头企业，建立“源网荷储一体化”和数字化专家咨询委员会，围绕当前数字技术在“源网荷储一体化”发展中的应用现状、未来趋势、标准规范、评

价考核体系等前沿、热点和重点问题开展研究，提出科学的咨询论证，加强数字技术在区域“源网荷储一体化”发展的战略布局。

统筹规划设计。统筹数字技术支撑“源网荷储一体化”发展总体规划，明确电源、电网、负荷、储能领域数字技术应用重点方向，科学规划新型电力系统数字技术支撑体系。加强“源网荷储一体化”项目规划与国家、地方电力发展规划、新能源发展规划、数字经济发展规划衔接，推动项目有序实施。统筹电力企业数字化转型创新发展激励政策，围绕新能源、特高压、智能电网、微电网、新型储能等重点发展领域，研究制定专项激励政策。制定“源网荷储一体化”发展行动计划，明确新型电力系统数字化建设未来发展总体目标及各个阶段目标，提出未来发展主要任务与工程。

构建标准体系。加快完善电力数字化相关标准体系，为“源网荷储”与数字技术融合发展提供支持。健全数字技术赋能“源网荷储一体化”建设的标准体系，联合能源电力和数字经济龙头企业、行业协会、高端智库，完善源网荷储资源数据与信息网络的接入标准，聚焦数字技术在源网荷储各环节融合发展中应用，绘制现有标准图谱，补充完善数字技术在“源网荷储一体化”项目中的应用标准。强化标准宣传推广，依托数字经济、新能源、储能等主题会议和高峰论坛，对标准内容、要求、应用成效等进行宣贯，更好发挥标准引

引领作用。

五、本章小结

本章梳理了“源网荷储一体化”建设过程中面临的主要问题和亟需优化提升的三大重点方面，并结合应用场景和应用案例分析了数字技术在其中的应用情况。在“源网荷储一体化”体系规划建设方面，传统的规划技术存在不匹配、低效率等问题，数字技术的引入能够优化一体化模型，并模拟“源网荷储一体化”多类型复杂运行场景，满足复杂情景分析、精细化设计等方面的要求，高效指导“源网荷储一体化”建设项目的推进。在“源网荷储”深度友好互动方面，“源随荷动”向“源网荷储”多元协同互动模式的顺利转变是关键所在，数字技术在这过程中发挥了有效的支撑作用，通过创新“互联网+”的新应用新模式，建立数字“源网荷储”友好交互系统，能够充分提高系统实时响应能力，实现互联网式的多向交互，满足“源网荷储”一体化推进过程中调控模式转变的要求。在“源网荷储一体化”运行管理方面，由于各类灵活资源聚合形成的新兴主体规模小、难管理，系统运行存在不稳定、不安全等突出问题，数字技术的应用能够实现各类资源的精细管理，提高系统整体运行的效率，优化提升运营管控能力，在确保系统安全稳定运行的基础上最大程度的促进新能源消纳。最后针对当前“源网荷储一体化”建设过程中存在的不足提出了三方面措施建议，即强化机制保障、

统筹规划设计、构建标准体系。

第七章 总结与展望

一、数字技术在新型电力系统中的应用现状和展望

从过去几十年间信息技术在中国电力系统中得到初步应用，直至如今数字技术与电力系统的融合日益加深，中国电力系统的数字化转型之路一直在随着技术发展不断向前延伸。当前，5G、大数据、人工智能等一系列数字技术在电力系统“源网荷储”各个环节均已实现不同程度的应用，所发挥的提质增效赋能作用逐渐凸显。随着技术成熟度和商业化程度的提升，数字技术在电力系统中的应用场景逐渐拓宽，形成了一批具有良好示范作用的新产品、新业态和新模式，为中国新型电力系统的建设和完善奠定了良好基础，也正在为解决构建中国新型电力系统过程中面临的突出问题提供强大的“智”力支撑。

■ 电源侧：

一是火电灵活性深度改造方面，以大数据为基础的燃料智能掺烧、锅炉低负荷稳燃、燃烧数据分析等技术，从火电锅炉运行过程的前中后端全方位提升能源利用效率和运行流程优化。滑压运行智能优化、安全智能诊断、辅机运行智能控制等汽轮机运行智能优化技术保障了汽轮机及其热力系统在调峰期间的运行经济性。

未来展望：当前，大数据技术从锅炉、汽轮机运行优化角度在火电灵活性改造中发挥积极作用并取得显著效果，数

字技术的融入使火电生产流程控制更加精细化、精准化和智能化。未来，在构建中国新型电力系统过程中，火电机组的灵活性需要更大程度的提升，通过数字技术的优化控制将从机组中的部分环节延伸至全流程。例如通过人工智能技术的介入，对火电机组整体实现预测控制及神经网络控制等，进一步提升各项控制指标，满足低负荷运行需求。

二是新能源电场高效运维方面，基于人工智能的光伏/风电功率预测以及电场微观选址技术，通过数据模型演算，在新能源电场建设初期提供更为科学精准的方案，为之后新能源发电功率保持较高水平提供前提保障。在大数据技术支撑下，新能源电场运行维护趋于智慧化，大数据平台通过对新能源发电装备运行数据的监测、收集和处理，能够对新能源机组状态开展科学评估，并且对未来一段时间的运行状况进行短期预测，使新能源电力供应能够更好地融入到电网大环境中。此外发电机组智能诊断技术能够替代人工检修，对故障的诊断维修更为迅速、精准。

未来展望：新能源将成为中国新型电力系统中的主力电源，对其发电能力和品质的要求将愈发提高，人工智能技术有望发挥更大作用。迁移学习和增量学习技术的介入将使人工智能对新能源电场发电功率预测方法更具普适性和实时性，同时能够提升对天气、光照幅度、风力资源分布等环境因素影响的精准度。在新能源电场运维中，依托人工智能技

术能够实现电场各系统间的协同联动，是电场具备自我决策能力，机器人也将更高程度地取代人工。

三是“风光水火储”多能互补体系建设方面，建立健全多能互补体系是构建以新能源为主体的中国新型电力系统的重要任务之一，是使未来新型电力系统有足够能力对经济社会发展提供可靠保障和有力支撑的必要条件。当前数字技术在这方面的应用程度尚浅，主要集中于产业园区等小区域内部对能系统控制，在多元能源监控、能量管理、能效管控和需求侧响应方面发挥作用。

未来展望：未来，数字技术应用将涉及到系统规划设计、数据安全、系统内部协调控制以及多能系统运行优化等诸多方面。例如数字孪生技术将通过大规模异构并行计算资源对海量数字孪生的场景进行仿真，在解决多能互补规划问题时提供一种全新思路，并且为多能系统运行优化提供方案。区块链技术将有效保障多能互补体系数据安全，实现新型电力系统中电力供应链各环节信息的安全流通和共享。

■ 电网侧：

一是**智能电网建设方面**，电力调度可视化、人工智能电力调度系统、电力调度机器人等数字技术和产品的诞生，使电力系统输配电各环节智能化水平大幅提升，供电可靠性显著改善，并且在一定程度上实现了“机器换人”。

未来展望：在中国新型电力系统中，数字技术在电网调

控领域的深度和广度将得到进一步提升，所发挥的功能和设计的业务范围将得到进一步扩大。智能电网仿真样本管理与生成、基于大数据的设备状态趋势感知、电力市场运行数据分析、新能源资源分析及预测将是智能电网调度的重点发展趋势，是电网具有更强的能力承担起在新型电力系统中的关键枢纽作用。

二是**特高压数字化装备方面**，新型电力系统对特高压长距输电的规模和技术水平提出更大需求，也是未来数字技术在电网侧应用的重点延伸领域。

未来展望：特高压装备数字管理、特高压装备状态感知、特高压输电智慧运维将是未来数字技术有望发挥关键作用的融合领域。例如数字孪生技术能够有效应对特高压装备的复杂性，开展针对性的智能设计、智能制造及供应链动态管理，全面涵盖装备制造、维护、报废回收等全生命周期。5G通信技术能够提高特高压装备的状态感知水平，实时准确地发现换流变压器、输电线路、直流断路器等关键设备的故障和隐患。在数字孪生、大数据、人工智能等技术的综合影响下，特高压装备的运行维护趋于智慧化，智慧运维管理、差异化决策、机器人巡检也将在特高压输电领域实现规模化应用。

三是**微电网智慧管理方面**，中国新型电力系统的结构特征和运行模式决定了未来将呈现集中式与分布式并存的总

体格局，分布式电源主要服务于周边地区，因此激发了对低电压区域微电网的建设需求。

未来展望：当前，我国微电网示范建设正在开展，已建成了一批边远地区微电网、海岛微电网以及城市微电网等示范项目。微电网所处区域和服务对象的类别繁多，呈现出不同的需求特征，因此未来多微电网系统、能量管理、智能调控、运行保护、电能交易将是未来数字技术有望发挥关键作用的融合领域。例如人工智能技术可以实现对微电网的协调控制，通过构建微电网源荷综合特性图像及人工智能算法匹配特征图像，实现对负荷侧新能源电力高比例介入下微电网的稳定控制、智慧管理及运行保护。区块链技术则能够在微电网电能交易中发挥关键作用，解决交易方式单一、交易模式不灵活、电价不透明以及结算时的不对等和不及时等问题。

■ 负荷侧：

一是工业领域方面，工业用户是现阶段电力系统负荷侧资源利用的主体，当前数字技术在工业用电管理中已有大量应用案例。基于大数据、人工智能和工业互联网等，工业负荷短期预测、工业负荷精确辨识、工业需方智能响应、工业用电智慧管理等一批新技术相继涌现，实现了对工业负荷资源的潜力挖掘。

未来展望：工业领域涉及行业范围广，不同行业具有不同的负荷特性，未来为了使中国新型电力系统能够更好地服

务于工业用户，数字技术将更多聚焦于对微观个体用能的监测、控制、调节，从而准确掌握和有效应对各行业的负荷特征差异。

二是交通领域方面，新能源汽车的大规模应用是中国实现“碳达峰碳中和”过程中的一项重要举措，也是未来中国新型电力系统在负荷侧展开数字技术应用的重点领域。

未来展望：智能车网互动、充电桩智慧运行有望成为数字技术深度应用的先发领域，有效解决新能源汽车负荷侧的关键瓶颈问题，实现“车-桩-网”的协调运行，同时也为社区新能源汽车集群调控和需求响应制定提供基础。

三是建筑领域方面，随着社会经济的持续发展，建筑的用电需求增长速度远远大于供电的增长，用电能耗贯穿建筑的全生命周期。在建筑运维阶段，建筑用户的需求响应将是未来中国新型电力系统中的重要组成部分，也是数字技术应用的重要着力点。

未来展望：未来建筑智慧运维是关键阶段，也是数字技术在建筑领域助力低碳发展的最主要应用方面，基于人工智能的基线负荷预测，将是现阶段基于历史负荷数据和气象数据的基线负荷预测方法的升级和进化，这是开展进一步精细化、实时化需求侧响应的先决条件，同时能耗的智能监控也将为建筑向低能耗转型提供重要技术支撑。

四是民生领域方面，当前物联网、大数据、人工智能等

数字技术在居民智能用电、居民用电分析、居民能效管理、居民侧需求响应以及智能用电服务等方面得到一定程度的应用，是电力系统负荷侧能够更好的满足居民对电能的多样化个性化需求。

未来展望：未来中国新型电力系统将面临更大的负荷需求和更复杂的负荷结构，面向居民用户的智慧电力服务需要针对不同用户的用能需求开展专业化精准服务，需要物联网、大数据、人工智能等数字技术更紧密结合，衍生出服务范围更广泛、服务目标更精准的数字化产品和模式。

■ 储能侧：

当前，数字技术已经应用到电源侧、电网侧及负荷侧的储能系统中，通过对运行数据的监测、统计和分析，在各环节发挥重要赋能作用。例如电源侧储能系统中，用大数据分析提出储能充放电策略，以成本最低、低碳效益最大等为优化目标，利用粒子群算法、遗传算法等解决储能系统容量配置的一系列优化问题。负荷侧储能系统中，在大数据技术支撑下，储能系统能够更好地发挥“削峰填谷”功能，物联网技术则使储能装备更加的智能化。

未来展望：在中国新型电力系统中，共享储能将成为电源侧、电网侧、负荷侧的需要实现的重要功能之一，也是数字技术赋能的重点领域。依托数字技术，新能源电场、输变电站、负荷终端将具备足够的的能力达成电力的就地储存，真

正实现“储能于场”“储能于站”及“储能于荷”。

二、数字技术与电力系统融合需要关注的其他问题

数字技术的融入为电力系统的发展带来了切实利好，在数字技术以及数据资源的赋能下，电力系统的运行效率和发展水平获得显著提升。未来，中国新型电力系统建设和完善中，将更加依赖数字技术所能发挥的有力支撑作用，更庞杂的数字技术体系和更广泛的电力电子设备将应用于电力系统中，基于此，数字技术与电力系统融合过程中面临的数据网络安全和数据产权等问题同样需要重点关注。

■ 数据网络安全：

以数字技术为媒介，数据网络和电力网络交叉融合，数据网络安全深刻影响着电力系统的安全，而电力系统的安全关乎经济社会的正常运行。近年来，全球电力行业受到网络攻击的事件频发，攻击类型主要包括勒索病毒、DDoS 攻击、APT 攻击、漏洞、恶意软件等，受攻击的对象不仅包括普通的电力企业，也涉及到核电站等要害部门，造成了巨大的潜在安全威胁。

2018 年 6 月——法国 Ingerop 公司核电站计划及工作人员的个人信息等信
息遭黑客窃取，严重危及到核电站所在地区安全以及公司工作人员的隐私。

2019 年 3 月——黑客利用思科防火墙中的已知漏洞针对美国犹他州的可再生能源电力公司发起了拒绝服务 (DoS)

攻击，导致该组织的控制中心和其各个站点的现场设备之间的通信中断。

2019年7月——南非最大的城市约翰内斯堡发生了一起针对 City Power 电力公司的勒索软件攻击，导致若干居民区的电力中断，受影响的服务和网络的完全清理花费了数周时间。

2020年4月——葡萄牙跨国能源公司（天然气和电力）EDP 遭 Ragnar Locker 勒索软件攻击，赎金高达 1090 万美金，攻击者窃取有关账单、合同、交易、客户和合作伙伴的机密信息。

从数据网络端发起的攻击为电力系统安全带来新的挑战，未来在构建中国新型电力系统过程中，数据网络安全问题不容忽视。

■ 数据确权：

数字技术应用使电力系统在运行过程中产生海量的数据信息，这些数据信息不仅成为了电力系统中的重要电力生产要素，也成为了电力企业重要的虚拟资产，因此在数据作为信息资源在电力系统中流通共享的同时，对它们进行合理确权十分必要，关乎电力系统每一个参与主体的切身利益。

问题一：数据资源开放共享缺乏有序规范，一是数据确权不统一，数据资源管理缺乏顶层设计，权属边界缺乏法律法规界定，数据定价受到来源、质量、应用场景等多种因素

影响导致商品化程度低。二是数据流通不顺畅，从目前的数据收集管理模式来看，数据垄断现象明显，数据管理者、市场、用户间共享程度较低，可共享、可交易数据的范围不清晰，阻碍了数据资源的有效流通。

问题二：数据资源管理缺乏安全保护机制，一是数据安全监管体系不完善，针对数据传输和访问等重点环节，亟需建立数据脱敏、身份认证、细颗粒度访问控制、操作安全审计等隐私保护机制和法律法规。二是数据安全技术保障体系不健全，数据安全抗风险能力有待提升，数据源验证、大规模传输加密、非关系型数据库加密存储、追踪溯源等先进技术应用和产权保护机制仍需完善。

三、推动中国新型电力系统数字化建设的措施和建议

构建清洁、稳定、安全、先进的以新能源为主体的中国新型电力系统，需要推动数字技术与电力系统更深层融合、更紧密联结、更频繁互动。建议持续完善“政企学研用金介”协同体系，多方发力、多措并举、携手共进，从要素、资金、人才、创新、示范、安全等多角度出发，综合施策、逐个突破，有序高效推动中国新型电力系统数字化建设。

（一）要素保障，优化电力数字融合发展环境

强化组织机制保障。一是建立健全电力系统数字转型多部门协同推进机制，落实生态、工业、能源、科技等主管部门主体责任，强化组织协调，明确责任分工，细化工作任务，

形成各司其职、各负其责、齐抓共管、运转高效的新型电力系统数字化建设工作推进新格局。二是邀请国内外数字经济和电力系统专家学者，组建电力数字化专家咨询委员会，充分发挥专家在电力系统数字化建设方面的咨询、规划、策划和技术指导作用。三是构建电力数字化专项政策体系，实施一批数字技术赋能新型电力系统建设的专项行动，明确未来电力系统数字化建设的阶段目标、主要方向和重点任务，统筹布局数字技术在电力系统各环节应用中的重点项目。

健全完善行业标准。一是健全数字技术赋能电力系统建设的标准体系，围绕数字技术在“源网荷储”中的典型应用场景，绘制现有标准图谱，补充完善数字技术在新型电力系统中的应用标准，构建精准的电力数据资源与信息技术网络接入标准。二是加强新型电力系统标准体系建设，围绕新型电力系统分析认知、规划设计、运行控制、故障防御、源网协调等重点领域，开展现有标准的适应性分析和未来标准的需求研究，加快形成覆盖全面、行之有效的通用标准。三是推进新型电力市场标准体系建设，加快制定电力市场基础及通用标准、市场接入技术标准、电力市场业务技术标准、电力市场运营技术标准等关键重点标准。

统筹协调规划设计。一是尽快完善新型电力系统数字化建设顶层设计，促进电力系统建设与低碳化、数字化齐头并进，面向国家“碳达峰碳中和”战略目标，因地制宜加快重

点地区新型电力系统中长期建设规划方案的研究制定，以支持性政策带动新型电力系统数字化建设。二是统筹电力系统数字化发展规划与国家电力发展规划、新能源发展规划、数字经济发展规划、新材料发展规划，开辟出一条目标引领、重点突出、实操性强的新型电力系统数字化建设工作路径。三是合理推动“源网荷储一体化”、“风光水火储”多能互补体系、“光储直柔”建筑等重大电力系统试点项目与地方其他重点工程、科技规划衔接，推动项目有序实施。

（二）资金支持，加大财政金融引导扶持力度

创新科技金融服务。一是鼓励政策性银行对虚拟电厂、微电网、智慧电网等领域的企业在贷款利率、期限、额度上给予政策倾斜，引导商业银行采用银团贷款、供应链融资等方式为电力行业数字技术改造重大项目提供信贷支持。二是鼓励金融机构为符合条件的科技型电力企业给予优先信贷支持，重点支持电力系统数字化基础设施建设和数字技术在电力系统中重点应用项目建设。鼓励政府性融资担保机构对电力数字化企业融资提供担保，解决企业前期融资难题。三是鼓励科技创新和科技成果转化，支持商业银行探索开展知识产权质押贷款新模式，为数字电力领域的科技型中小微企业提供便捷化科技金融服务。

营造良好投资环境。一是完善投融资政策，扩大投资主体、激发投资内生动力、提高投资效益，进一步确立电力企

业投资主体地位，更好地落实电力企业投资自主权。采取政府和社会资本合作（PPP）模式，鼓励社会资本参与新型电力系统数字化建设运营。二是引导基金投资方向，鼓励现有的互联网基金等关注大数据、物联网、云计算、人工智能等数字技术赋能电力系统数字化转型，加大相关方向的投资力度。三是建立多元化融资供给体系，构建以VC、PE等为主体的多层次股权融资体系，充分发挥股权融资在数字电力领域成长型及创新型企业的筛选和培育方面的功能。

设立电力发展基金。一是设立政府投资引导基金及子基金，发挥财政资金的引导作用，推动电力数字化加快建设。二是根据数字技术发展趋势和发展特点成立电力系统数字化建设基金，采用无偿支持、天使投资、风险投资、贷款贴息、科技金融等相结合方式，集中用于支持新型电力系统基础设施提升、公共平台建设、公共服务补助、政府购买服务、重点孵化项目、人才引进培养、龙头企业引进培育、初创企业补助、创业启动资金扶持、市场开拓等。三是设立电力系统数字化转型升级专项资金，鼓励电力企业进行数字化、智能化改造提升，对相关企业直接予以技改投资特定比例的资金奖励。

（三）智力支撑，健全新型电力系统人才生态

注重人才顶层设计。一是加快数字电力人才发展顶层设计，围绕“源网荷储”四大环节以及一体化发展，明确新型

电力系统数字化建设对研发型、技术型、应用型、创新创业型人才的需求。二是进一步细化电力系统、数字技术人才认定标准、人才培养资助方案等政策，对不同层次的人才在配套资金、住房补贴、个税优惠、职称评比、落户协助、社会保障、创新创业等方面提供不同的扶持措施。三是创新人才培育机制，针对电力数字化人才培养、引进、使用、留住、评价五个方面，突出体制机制创新，优化人才培育政策体系，推进“急需紧缺人才”“创新创业人才”“专家技能人才”“领军精英人才”等4项人才培养工程。

加强人才平台建设。一是围绕电力数字化发展需求，建立电力系统数字技术预备人才数据库。二是搭建区域性电力人才服务平台，为智慧电网、虚拟电厂、微电网等领域电力数字化建设相关人才提供一站式办事服务。结合人才自身的专业及需求，提供人才交流、生活娱乐、职位招聘等信息，定期组织开展区域相关电力数字化基础知识和技能培训，全方位服务区域人才。三是畅通线上人才交流渠道，积极搭建数字化的人才公共平台对接电力企业人才需求和高校人才资源，鼓励企业高校在学科设立和关联上探索合作机制，建立大学生培养基地和实习基地，构建定向培养发展机制，提高人才培养的针对性和有效性。

完善人才激励机制。一是完善电力数字化发展人才培养资助方案等人才政策，在举办和参加学术会议、行业峰会、

进修深造、论文发表和著作出版等方面，给予不同程度资助和津贴。二是完善科技人员股权和分红激励办法，实现技术、管理等要素参与分配，开展股权激励和科技成果转化奖励试点，支持数字技术相关企业采用期权、股权激励等方式吸引高级管理人才和技术骨干，进一步激发科技人员的创新积极性。三是完善企业人才激励方案，激励企业参与培训，推动一线电力工程建设管理人员、技术专家到高校院所参与培训，促进产业链发展与人才培育的衔接。

（四）创新加速，强化关键数字赋能技术供给

强化企业创新能力。一是着力培育发展一批核心技术能力突出、自主创新和集成创新能力强、能引领电力数字化发展的技术创新型龙头企业，推动企业的持续创新能力、自主知识产权获取能力、国际竞争能力全面提升。二是支持科技型中小电力企业申报国家、省级技术创新示范企业，鼓励企业建设高水平研发机构，开展研发活动，加大研发投入，提升创新能力。三是鼓励电力企业开展数字化基础研究和科学前沿探索，重点支持企业提升自主研发能力，对于突破业内核心关键技术、率先实现科研成果转化的高新技术企业和科技小巨人企业予以奖励。

完善产学研用机制。一是推进技术链、产业链、资金链与人才链“四链融合”，在智慧电网、电力物联网、能源互联网等重点领域积极打造并发挥国家级创新平台功能，构建集

政府、企业、科研院所、高校等在内的创新联合体，实现科技创新要素交流互通。二是重点推动创新载体建设，鼓励电力龙头企业建设面向电力数字化发展的企业工程技术中心、企业重点实验室等研发机构，开展前沿技术研发与重大战略产品开发。三是企业联合重点高校科研院所建立技术创新平台和联合重点实验室，实施电力数字化发展领域的“补短板”行动，并促进科技成果转化，提高科技成果转化率。

开展关键技术攻关。一是围绕新型电力系统关键技术突破、“卡脖子”问题解决，加强电力龙头企业、数字技术企业与高校院所深入战略合作，开展集中攻关，促进各类创新要素的集中集聚，突破并储备一批关键核心技术，主导制订一批技术标准，增强自主研发能力，提升产业竞争力。二是培育浓厚的创新文化氛围，支持中小企业围绕大企业大集团研发先进适用技术、工艺和设备，形成联合创新集聚效应。三是实施数字电力领域重大科技专项，梳理重点产业发展需求，发布关键核心技术需求榜单，采用“揭榜挂帅”等机制，集中力量开展技术研发攻关。

（五）示范引领，加快电力数字技术应用推广

开展项目示范建设。面向重点领域开展一系列试点应用，厘清电力系统开展数字化建设的着力点和典型应用场景，探索形成一批可复制推广的数字电力系统解决方案和创新应用。一是完善示范试点项目顶层设计，采取“自上而下”的

开展方式，发布利用数字技术促进电力系统转型升级的试点建设方案，明确重点方向、遴选要求、工作任务等内容。二是开展大规模项目遴选，鼓励重点领域开展电力数字化建设最佳实践项目试点，遴选一批火电灵活性改造、智慧电网、微电网、虚拟电厂、新型储能等领域先导试点应用，推进多维度数字技术应用和服务创新。

总结推广先进经验。基于重点领域试点示范项目建设，摸索总结一系列具有示范效应和普适推广价值的数字电力新技术、新应用、新模式，以点带面推广，加速推动先进数字技术在电力领域全面应用。一是政府主管部门联合行业协会、龙头企业等定期对示范项目推进情况进行总结，提炼先进经验和做法，开展试点评估，诊断当前电力数字化建设推进存在的核心问题和瓶颈，为后续政策制定优化提供参考依据。二是举办新型电力系统、数字技术等相关主题的行业峰会、高端对话、高峰论坛等，发布数字技术赋能新型电力系统优秀案例集，宣传推广数字技术在电力系统应用的新场景、新模式。

深化国际交流合作。整合发达国家在电力数字化发展领域的优势资源，强化在技术创新、标准制定、投融资等方面的交流合作，加速高效推进新型电力系统数字化建设。一是强化国际创新合作，聚焦电力前沿领域和前瞻性技术应用场景，开展项目合作共建，支持我国电力龙头企业参与数字技

术赋能电力系统建设的国际技术创新合作。二是加强国际交流推广，依托数字电力国际会议、圆桌论坛等，学习欧盟、美国等发达国家新型电力系统建设先进经验，结合我国电力系统建设实际和数字经济发展趋势，开辟适合我国数字技术赋能电力系统建设的新路径。

（六）分类施策，筑牢电力网络数据安全防线

构建电力数据安全综合防御体系。全面提高数据安全技术保障能力，构建贯穿电力数据应用云管端的综合立体防御体系，为电力数据资源共享提供扎实的保障。一是综合利用数据源验证、大规模传输加密、非关系型数据库加密存储、追踪溯源等先进技术，升级现有电力网络安全体系，实现纵深防御。二是引入数据脱敏、身份认证、细颗粒度访问控制、操作安全审计等隐私保护机制，从机制上防止电力数据的泄露和未授权访问。三是借助人工智能、大数据等数字技术，实现自动化威胁识别、风险阻断和攻击溯源，实现从被动防御到主动检测的转变，从源头上提升对未知威胁的防御能力和防御效率。

强化电力数据平台安全保护水平。密切关注数据攻击和防御两方面的技术发展趋势，设计构建更加完善的电力数据平台安全保护体系和系统安全管理机制，为电力系统各环节数字技术的融合应用提供更加扎实的安全防护。一是升级完善电力系统数据平台的软硬件基础设施，为数据平台的物理

安全、网络安全、虚拟化安全奠定基础。二是采用接口鉴权等机制、通道加密等手段，提升信息传输过程的机密性和完整性，保障平台电力数据传输交换安全。三是建立更加完备的电力数据访问控制机制，完善平台数据设置备份与恢复机制，加强平台数据存储安全。四是增强电力系统数据平台组件配置和运行过程中隐含的安全问题的关注，加强对平台紧急安全事件的响应能力。

完善电力数据安全核心技术体系。积极推动产学研用结合，以电力数据安全关键环节和关键技术的研究为突破点，尽快推动构建完整的数据安全技术体系。一是加快推动密文计算、多元计算机中的机密性保护、非结构化数据库安全防护、数据安全预警以及数据泄露应急响应等关键技术的研究与推广应用。二是加强电力系统数据采集、运算、溯源等关键环节的保障能力建设，强化电力数据安全监测、预警、控制和应急处置能力。三是制定电力大数据安全技术标准和测评标准，建立数据平台及数据服务安全评价体系，推进第三方评估机构和人员资质认证等配套管理制度建设，从平台防护、数据保护、隐私保护等方面切实促进电力数据安全保障能力的全面提升。

附件一：数字技术赋能电力行业碳减排量值测算

通过搭建数字技术赋能电力系统碳减排的计算模型，自下而上对电力行业碳排放结构及数字技术赋能减碳环节进行量化分析，基于电力生产、电力传输、电力消费三个环节能耗情况、碳排放来源及碳排放结构，研究分析数字技术赋能各环节内不同部分的减碳成效及占比，结合电力行业数字技术应用优秀典型案例和行业碳排放整体情况综合分析数字技术赋能整个电力系统碳减排效果。整体来看，通过数字技术赋能整个电力系统转型升级可实现减碳比例大致为26.8%-35.8%，具体计算过程如下：

电力生产：对电力生产各部分碳排放结构进行分析量化，数字技术主要赋能火电灵活性深度改造、新能源电场高效运维、“风光水火储”多能互补体系建设等重点方面，从减少平均供电煤耗和提高清洁电力替代两个方面实现减碳，结合各部分数字技术赋能成效和各部分的总体占比，通过数字技术赋能电力生产环节可使电力系统整体实现降碳约为12.8%-18.6%。

电力传输：对电力传输各部分碳排放结构进行分析量化，数字技术主要赋能智能电网建设、特高压数字化装备、微电网智慧管理等重点方面，从降低电力传输线损率角度实现节能降碳，结合各部分数字技术赋能成效和各部分的总体占比，通过数字技术赋能电力传输环节可使电力系统整体实现降

碳约为 4%-5.2%。

电力消费：对电力消费各部分碳排放结构进行分析量化，数字技术主要赋能工业需方响应、智能车网双向互动、“光储直柔”建筑系统、居民智慧用电等方面，从大幅提高电能利用效率角度实现节能降碳，结合各部分数字技术赋能成效和各部分的总体占比，通过数字技术赋能电力消费环节可使电力系统整体实现降碳约为 10%-12%。

表 6 数字赋能减碳指标情况

类型	环节	影响指标	赋能提升	减碳成效
电力生产	火电灵活性改造	锅炉热效率%	1%-3%	1%-2.91%
		汽轮机热耗率%	1.2%-2%	1.2%-2%
	新能源电厂高效运维	风电利用率%	10%	2.5%
		光伏利用率%	15%	3%
		发电设备利用率%	5%-15%	2.1%-5.2%
多能互补体系建设	综合能源利用率%	3%	3%	
电力传输	智能电网建设	电网管理效率%	20%	2%
	特高压数字化装备	线损率%	1%-1.94%	1%-2%
	微电网智慧管理	分布式发电应用比例%	5%-7.2%	1%-1.2%
电力消费	工业需求响应	工业电能利用效率%	4%	4%
	智能车网互动	负荷峰谷差削减率%	6%-18%	1%-3%
	“光储直柔”建筑系统	绿电利用率%	3%	3%
	居民智慧用电	节电效率%	2%	2%

数据来源：赛迪顾问，2022.11

附件二：新型电力系统数字化建设路线图

图 18 新型电力系统数字化建设路线图

