

中国能源数字化转型的理论阐释与现实策略

——数字资本主义视角下的全球能源转型

陈星星 李天翼*

摘要:能源数字化转型是促进传统能源产业智能化、现代化的重要途径。随着互联网、大数据、人工智能和区块链等先进技术的快速发展,中国亟须把握能源数字化转型的战略机遇,推动能源产业从传统技术应用转向新兴技术融合、从单点技术场景转向全链条技术融合、从集中式生产到分布集中式协同以及单一能源供应转向综合能源服务跃迁。本文提出能源数字化转型是通过数据要素驱动能源生产、存储、传输、交易和消费全链条的智能感知、协同优化与决策管理过程,是以数据要素为基石、数字技术为引擎,驱动能源产业在技术架构、业务流程、商业模式、治理体系与价值创造等维度发生的深刻变革。当前,数字资本主义的结构性矛盾加剧了能源数字化转型现实困境,形成了全球能源市场的垄断性话语权,加重了能源资源分配的不平等。中国需健全法律法规体系与市场激励机制,加快能源新型基础设施建设,打造数字能源融合发展的物理载体,以数据要素价值释放为抓手,构建包容有序的产业生态和自主可控的产业体系,培育新质生产力的绿色动力。

关键词:能源数字化;能源转型;数实融合;数字资本主义;新质生产力

一、引言

党的二十届三中全会明确提出,加快规划建设新型能源体系,积极稳妥推进碳达峰碳中和。能源数字化转型不仅是推动能源行业向绿色、低碳、高效方向发展的关键路径,也是能源产业推动发展新质生产力的关键着力点(王于鹤等,2021)。在当前全球科技日新月异、环境

*陈星星,中国社会科学院数量经济与技术经济研究所,邮政编码:100732,电子信箱:chenxingcindy@126.com;李天翼,中国社会科学院大学应用经济学院,邮政编码:102401,电子信箱:litianyiee@163.com。

本文获得国家自然科学基金青年科学基金项目“数字化绿色化协同转型与企业绩效高质量发展”(72403249)、国家自然科学基金项目“增强国内大循环内生动力和可靠性与提升国际循环质量和水平研究”(22VRC082)、中国社会科学院经济大数据与政策评估实验室(2024SYZH004)的资助。感谢匿名审稿人提出的宝贵意见。文责自负。

挑战日益严峻的形势下,全球能源行业正经历广泛而深刻的变革。通过能源数字化转型,企业不仅能提升经济效益,还能有效提高资源使用效率和生产活动的安全性,带动整个能源行业向智能化绿色化发展模式迈进。发达经济体在推动全球能源数字化转型方面发挥了显著作用,在政策制定、市场融合和发展模式等方面取得了诸多突破。例如,美国和欧洲一些国家在智能电网建设、可再生能源数字化管理以及能源大数据分析等方面处于领先地位,通过投资税收抵免(ITC)等政策促进节能技术发展;日本利用物联网等分析技术优化电力系统运行,推动分布式能源系统的数字化升级;德国作为工业4.0的先驱,积极推进“智慧能源——能源转型数字化”项目(SINTEG),实现能源系统的全方位优化升级(曹慧,2019;Hayashi et al., 2013;Otoum et al., 2022)。这些技术不仅提高了能源效率,降低了碳排放,也为全球能源数字化转型提供了宝贵的示范经验。然而,随着数字资本主义的兴起,发达经济体和一些跨国公司逐渐将数字技术优势转化为对全球能源市场的垄断性话语权,通过数据垄断、技术封锁和市场控制等手段,扩大数字鸿沟,限制了其他国家的发展机会,加剧了全球能源资源分配的不平等。分析全球能源数字化背景下中国能源的转型具有极为重要的意义,这不仅有助于推动中国能源产业的高质量发展,培育新质生产力的绿色动力,还能增强中国在全球能源领域的竞争力和话语权。面对全球能源数字化转型的浪潮,中国拥有丰富的能源资源,庞大的市场需求和强大的数字技术基础,这为中国能源数字化转型提供了广阔的机遇。与此同时,中国能源数字化转型也面临着数字技术与能源系统的深度融合,数据安全与隐私保护,以及发达国家技术市场竞争等诸多压力。在复杂多变的国际形势背景下,中国通过加强能源技术自主创新,深化数据要素价值释放,加快实现能源体系智能化、绿色化发展,有望在能源数字化转型中取得突破,为全球能源可持续发展贡献中国智慧和力量。

本文从全球能源数字化转型的内涵特征和发展现状出发,分析了全球能源数字化转型的经济贡献和潜在风险,并通过借鉴美国、日本、欧盟等发达经济体能源数字化转型的发展经验,结合中国能源数字化转型现状和挑战,提炼全球能源数字化转型的中国策略。相对于已有研究,本文的主要创新贡献有以下几个方面。一是聚焦互联网、大数据、人工智能和区块链等先进技术,从能源数字化转型的概念内涵出发,构建了能源数字化转型的理论框架。现有文献研究能源数字技术应用或企业能源转型案例(Olabi et al., 2023;数字能源高质量发展课题组,2023),尚未梳理能源数字化转型的理论体系。本文通过将能源与数据要素放在统一研究框架,体现了能源数字化转型是涵盖能源行业全方位、全流程、全要素的深度变革。二是从数字资本主义加剧全球能源资源分配不平等的视角出发,研究了中国在发达国家利用数字技术优化自身运营优势,但挤压其他市场参与者生存空间的背景下,如何释放能源数据要素价值,增强中国在全球能源领域的竞争力和话语权。三是分析欧美等发达经济体在能源数字化转型方面的典型经验,为因地制宜发展中国能源产业数字化提供现实借鉴。既往文献多侧重

能源政策比较或技术经济分析(Avgerinou et al., 2017; 曹慧, 2019),尚未提炼全球能源数字化转型背景下的中国策略。本研究根据美国、日本和欧盟等发达经济体的现实经验,为中国能源数字化转型政策提供现实借鉴。

二、能源数字化转型的概念界定与现状特征

当前,新一轮科技和产业革命加速兴起,数字化技术与能源产业有机相融,全球能源数字化转型进入崭新的发展阶段。厘清能源数字化转型的内涵特征,明确全球能源数字化转型的发展现状和经济贡献,对推动能源数字化转型至关重要。

(一)能源数字化转型的内涵特征

随着互联网、大数据、人工智能和区块链等先进技术快速发展,传统能源产业面临转型升级的压力,亟须通过数字化手段提高效率、降低成本、减少碳排放,同时提升能源供应的安全性、可靠性和灵活性。能源数字化转型正是在此信息技术发展背景下,能源产业与数字技术深度融合的产物。

能源数字化转型的内涵在中国最早由智慧能源体系衍生而出。智慧能源体系是由智能电网、能源互联网等构成的新一代能源体系,能够在不同类型、不同规模的能源及需求之间,平滑、快速地实现实时调度、优化配置及安全运行(童光毅,2021)。这一论断与能源数字化转型内涵颇有重合。而后,数字经济、企业数字化转型概念与能源企业深度融合。数字能源高质量发展课题组指出,数字能源是指能源企业应用新兴数字技术优化能源生产、传输、交易和消费环节的资源配置能力、安全保障能力和智能运营能力,从而实现能源企业数字化智能化生产,数据化信息化管理,以及能源行业智慧化发展形态(数字能源高质量发展课题组,2023)。王于鹤等(2022)主要对企业数字化转型中的能源企业进行研究并作了案例分析。国外对能源数字化转型概念亦颇有关注。能源数字化转型是指人工智能、机器学习、深度学习和数字孪生被有效地用于精确建模和优化可再生能源的各种过程,以提高绩效并减少对环境的影响(Olabi et al., 2023)。纵观能源数字化转型概念发展历程,本文认为,能源数字化转型是指能源产业主体利用尖端数字技术与能源系统深度融合,通过数据要素驱动能源生产、存储、传输、交易和消费全链条的智能感知、协同优化与决策管理,实现能源效率提升、资源配置和安全保障优化以及低碳可持续发展的系统性变革过程。能源数字化转型涵盖能源系统各环节,是涉及能源全链条的智慧型能源生态网络系统。因此,能源数字化转型本质上是一场以数据要素为基石、数字技术为引擎,驱动能源产业在技术架构、业务流程、商业模式、治理体系与价值创造逻辑等维度发生的全方位、全流程、全要素的深刻范式跃迁,其广度与深度远超单一技术应用层面的改良。

具体而言,能源数字化转型的基本特征表现为以下三个方面:一是利用数据要素驱动精

准决策。通过覆盖数据全生命周期的管理机制,构建了全域感知体系,能够实时采集能源生产、传输和消费环节的各类数据,并借助人工智能算法深度解析系统运行规律,将碎片化的信息转化为可量化、可追溯的决策参数,从而推动能源规划、调度和交易从传统的模糊经验判断向培育碳足迹核算、能耗监测等智能应用场景的数据驱动模式转变。二是构建系统互联实现协同运行。依托数字技术,打破传统能源系统垂直分割的壁垒,通过统一的数据接口和通信协议,将发电机组、输配电网、储能设施和用能终端连接起来,形成跨设备、跨区域、跨能源品种的协同网络。这种协同网络能够实现源网荷储的动态匹配、聚合互动与多能互补,显著提升能源资源配置的系统性效率,支撑能源系统灵活适应时空需求变化。三是构建安全体系防范生产风险。数字技术使得能源设备的远程控制和自动化操作成为可能,同时,通过数字技术,能源企业可以建立智能应急管理系统,实现对突发事件的快速响应。物联网实时监测与AI分析预测能够在设备故障发生前精准预警,变被动处置为主动防控。能源数字化转型不仅提高了生产安全性,还降低了维护成本,为能源行业的可持续发展提供了强有力的支持。

(二)全球能源数字化转型的发展现状

全球能源数字化转型将信息技术与能源系统深度融合,实现能源生产和消费过程的智能化、高效化和可持续化。这一转型涉及多个层面,并通过数字化手段优化能源结构,提高能源效率,增强能源系统的安全性和稳定性。下文从产业规模现状、技术发展现状和典型项目建设等方面分析全球能源数字化转型的发展现状。

1.全球能源数字化转型的产业规模现状

根据彭博新能源财经(BNEF)的数据^①,数字技术在能源领域应用广泛,2017年的市场规模达到520亿美元,约占全球数字技术应用市场的44%。其中,化石能源电厂的运行管理占46%(240亿美元),智能电表占35%(180亿美元)。预计到2025年,全球能源领域的数字化市场规模将增长到640亿美元,该数字技术应用包括大数据、机器学习、人工智能、区块链等。其中,电网自动化预计将占100亿美元,家庭用能系统的规模也将达到110亿美元,超过风电光伏运行以及间歇性接入60亿美元的市场规模。

ICT产业市场支出规模逐年上升,零碳网络规划显著降低电力消耗。ICT产业作为数字经济的核心驱动力,推动了全球经济的数字化转型,其重要性日益凸显。IDC(International Data Corporation)2023年V2版《全球ICT支出指南企业规模和行业》数据显示^②,2022年全球ICT市场总支出规模约为4.7万亿美元,并有望在2027年增至6.2万亿美元,五年复合增长率

^①数据来源:《分析I全球能源数字化技术发展方向及应用趋势》,<https://news.bjx.com.cn/html/20190919/1008197.shtml>。

^②数据来源:《中国ICT市场支出持续向好,预计2027年超7200亿美元》,<https://www.cace.org.cn/News/NContent?key=545baea797c32420d0036ca49eea7af0>。

为5.7%。而随着ICT产业规模的不断扩大,其能耗问题也日益突出,为了实现可持续发展,全球各大电信运营商纷纷推出零碳网络战略规划,着手在包括基站、数据中心、机房等关键ICT设施中大规模采用光伏。例如,在巴基斯坦,运营商在应用光伏技术的同时结合AI智能管理,将油机的工作时间压减至原运行时间的十分之一以内,节省运营费用开支81%。ICT产业的发展推动了全球经济的数字化转型,改变了人们的生活方式、工作模式,促进了信息的全球化流通。

数据中心能源消耗大幅增加,构建绿色数据中心是企业实现可持续发展的内在要求。数据中心的能耗与其处理能力、存储容量和运行时间密切相关。《数字能源十大趋势白皮书》指出,2025年全球数据中心的能源消耗将从2020年的6700亿千瓦时显著增长至9500亿千瓦时,届时将占据全球电力消耗总量的约3%;与此同时,全球站点能源消耗也将从2020年的2030亿千瓦时大幅度攀升至2025年的6600亿千瓦时,占全球总电力消耗的比例接近2%(见图1)。构建绿色高效乃至零碳数据中心和零碳网络,不仅是企业践行可持续经营理念、优化运营成本的内在要求,更是企业承担社会责任、助力全球环保事业的必然选择。以中国电信在青海海东市打造的中国首个“零碳数据中心”——中国电信(国家)数字青海绿色大数据中心为例,其通过使用100%清洁能源,依托自然冷源制冷和余热回收技术,建立PUE的AI计算模型以及自建“分布式光伏+电化学储能”的绿电供应系统,助力了“零碳数据中心”的实现。

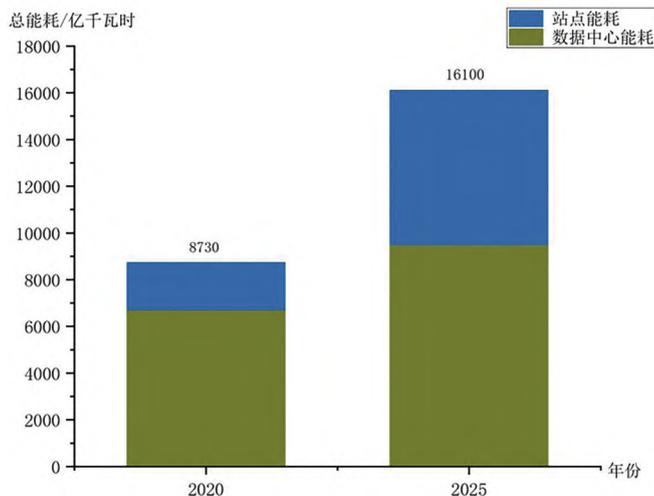


图1 全球数据中心与站点耗电量

资料来源:《数字能源十大趋势白皮书》。

2.能源数字化转型的技术发展现状

随着大数据、人工智能等技术在能源领域深度融合,全球能源产业正见证着层出不穷的科技创新浪潮,实践应用形式愈发多样。能源数字化转型技术发展主要体现在大数据与人工

智能、区块链与能源交易、物联网与能源设备互联、5G与卫星通信和虚拟电厂四个方面。

(1)大数据与人工智能助力能源预测和运行维护。能源大数据分析技术通过收集、处理和解析海量能源数据,帮助决策者制定更精准的能源政策和运营策略。人工智能技术被广泛应用于能源领域的设备诊断、智能调度、发电优化等场景,显著提升了能源系统的整体效率和可靠性。在欧美国家,一些大数据公司已经将电力企业大量庞杂无序的智能仪表数据与天气数据、建筑物信息等结合,经过深度分析挖掘,实现商业智能分析,从而辅助管理人员决策,对生产业务进行智能调控。例如,谷歌的DeepMind与英国电网合作,利用AI预测风力发电量,通过分析天气预报数据和历史风力发电数据,提前预测风电产出;西门子使用“主动网络管理”(ANM)软件,实时监测电网与不同负载间的交互效应(见表1);中国国网大数据中心的能源大数据应用平台开展能源数据汇聚、共享,培育了碳足迹核算、能耗监测等典型应用场景。

(2)区块链技术与能源共享交易模式促进能源市场公平开放。区块链技术以其去中心化、公开透明等特性与能源互联网理念相符,在能源数字化转型领域得到持续关注。分布式能源共享模式是目前区块链在能源行业的主要应用场景,区块链的去中心化和分布式特点,可以大幅度降低电力交易成本,提升交易效率,同时为社区、城市及其他地区的能源交易奠定基础^{①②}。荷兰PowerPeers公司通过搭建数字化能源区块链平台,连接太阳能、风力与水力发电企业,用户可以分享交易多余电力,提升能源利用效率与服务。美国能源咨询公司Indigo Advisory的统计数据显示,在能源领域使用区块链技术的案例总数已超100个,其中40%为分布式发电,20%为电网管理和电动汽车充电,10%为能源基础设施和物联网设备的连接。从全球角度来看,目前世界上较为成型的能源区块链项目主要集中在欧美国家和澳大利亚,这些地区的政策支持较为开放。我国目前在能源区块链领域也进行了一定探索,例如能链科技推出的碳票项目,浙江电力营销合同管理应用项目等。

(3)物联网与能源设备互联助力智能基础设施和智慧城市建设。通过物联网技术,能源设备能够实现互联互通,从而提高能源管理的效率和精准度。这种互联不仅优化了能源使用,还能够通过智能交通、智能建筑等应用,提升城市的整体运行效率和居民生活质量。当前物联网技术在能源行业的广泛应用主要体现在智能电网构建、智能家居系统优化、智慧能源管理解决方案实施等多个层面。瑞士电表Landis+Gyr通过智能电网系统连接公用事业及消费者装置,每天传输5.13亿笔读取数据,所有信息通过Landis+Gyr公司的前端系统以及电网

①“Blockchain technology in the energy sector: A systematic review of challenges and opportunities”, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032118307184>.

②“From blockchain to microgrids: Technologies that will revolutionise energy”, <https://www.forbes.com/sites/mike-hughes/2019/01/16/from-blockchain-to-microgrids-technologies-that-will-revolutionise-energy/#c96a9a24f071>.

数据管理解决方案处理,大幅提升了电网效率。2021年亚太地区占全球能源物联网市场的份额为20%左右,以欧美地区为代表的全球其他地区合计占有约80%的比重^①。2022年,全球能源物联网行业整体规模达到1325亿美元,同比增长约20.5%。华为预测,到2025年,物联网设备的数量将接近1000亿个,整体规模超过2000亿美元,55%的物联网应用将集中在工商业领域。

(4)5G、卫星通信与虚拟电厂为远程监控和管理提供支持。高速、低延迟的5G网络与卫星通信技术大幅提升了能源设施远程监控和管理的效率,降低了运维成本,也为边远地区和海上能源项目高效运行提供了技术保障。同时,虚拟电厂通过先进信息通信技术和软件系统,实现分布式能源资源的优化调度。德国Next Kraftwerke虚拟电厂平台通过远程控制与数据通信网络,将各种分布式能源和负荷单元连接成一个协同运行的“虚拟电站”,像调度单一大型电厂一样统筹控制它们的输出和负荷,解决新能源分散性所导致的发电量不可控问题。根据GIR(Global Info Research)的调研数据,2021年全球虚拟电厂收入约为6.21亿美元,预计2028年达到22.96亿美元。从全球看,供需潜力释放将促进虚拟电厂市场规模持续高速增长。

表1 全球能源数字化转型典型项目

技术应用	企业名称	项目内容	转型效果
区块链	荷兰 PowerPeers	搭建数字化能源区块链平台,连接太阳能、风力与水力发电企业	用户可以分享交易多余电力,提升能源利用效率与服务
大数据、人工智能	西门子	使用“主动网络管理”(ANM)软件	动态调整电网中可调部件的运行状态,实时高效整合多类型能源
物联网	瑞士电表 Landis+Gyr	连接公用事业及消费者装置,所有信息通过前端系统以及电网数据管理系统处理	促进能源设备互联互通,大幅提升电网效率
信息通信	德国 Next Kraftwerke	形成虚拟电厂平台,远程控制数据通信网络,将分布式能源负荷单元连接成“虚拟电站”	解决新能源分散性所导致的发电量不可控问题

资料来源:作者整理。

(三)全球能源数字化转型的经济贡献

当前,全球能源数字化转型进入新阶段,随着能源产业从实物资产向数字资产转化,能源数字化转型在全球经济可持续发展中扮演着至关重要的角色,对全球经济发展造成了深刻影响。首先,能源数字化转型极大提升了能源行业的运营效率和经济效益。第一,通过智能电网、能源互联网、大数据分析等技术手段,能源企业得以优化能源生产、传输和消费全过程,提

^①数据来源:《2023年全球及中国能源物联网行业发展现状及前景分析》,<https://wap.stockstar.com/detail/IG2023080100014388>。

升能源产业运营效率^①。根据国际能源署(IEA)《数字化和能源》预测,数字技术的大规模应用将使油气生产成本减少10%~20%,全球油气技术可采储量提高5%^②。第二,能源运营效率的释放催生结构性产业变革。能源数字化转型催生了新兴产业生态链,如能源大数据服务、智能电网设备制造、能源管理软件开发等行业,为全球经济注入了新的活力。其中,能源管理系统市场规模预计2024年为550.3亿美元,预计到2029年将达到1138.5亿美元,在预测期内(2024—2029年)复合年增长率为15.65%^③。随着全球能源数字化转型进程的加快,这些新兴产业将进一步发展壮大(Lee et al., 2023),为全球经济增长提供持久动力。

其次,能源数字化转型有力推动了新能源产业的发展。数字化技术使可再生能源的高效利用和并网成为可能,促进了太阳能、风能等清洁能源的广泛应用,推动绿色经济增长。世界经济论坛数据显示,到2030年,能源领域受益于信息和通信技术减少的碳排放量将超过18亿吨。从发电行业来看,IEA预测,数字化技术可使2016年至2040年的年发电成本降低800亿美元,相当于全球发电总成本的5%^④。数字技术在能源革命战略中正发挥着重要作用,成为引领能源产业变革的原动力。

最后,能源数字化转型在保障能源安全稳定供应方面发挥积极作用。通过实时监测、预测和调度,数字化技术能够有效应对能源供需波动,提高能源系统韧性和应急响应能力,从而维护宏观经济稳定运行。例如,智能化电网系统的应用发展将实现对电力系统实时监测、分析、分配和决策等,实现电力分配、使用的效率最大化。同时,通过区块链加密可以实现能源数据的端到端保护,结合数字模拟推演构建多层级应急预案,提升能源系统在遭受攻击时的关键功能运行率。

(四)全球能源数字化转型的挑战和潜在风险

尽管全球能源数字化转型指向了低碳、高效、可持续的未来,但其绝非简单的技术政策叠加,而是复杂的技术整合、利润博弈和体制重构。这一进程事实上面临着多重矛盾交织的系统性风险。正视这些风险和挑战,能源数字化转型才能真正成为可持续发展的变革性力量。

首先,数字资本主义的结构性矛盾正加剧转型的现实困境。数字资本主义的本质在于通过技术手段强化资本对资源的控制(陈文旭、徐天意,2020),少数跨国能源巨头通过掌控能源数据平台和智能电网技术,构建了对全球能源市场的垄断性话语权,进一步加剧了能源资源

① “Digitalisation to improve energy efficiency”, <https://www.iea.org/policies/11798-digitalisation-to-improve-energy-efficiency?s=1>.

② Digitalization and energy, <https://iea.blob.core.windows.net/assets/b1e6600c-4e40-4d9c-809d-1d1724c763d5/DigitalizationandEnergy3.pdf>.

③ 数据来源:《北美能源管理系统市场规模和份额分析—增长趋势和预测(2024—2029)》, <https://www.mordorintelligence.com/zh-CN/industry-reports/energy-management-systems-market>.

④ 数据来源:《能源产业加速拥抱数字时代》, https://www.nea.gov.cn/2021-09/18/c_1310196329.htm.

分配的不平等。与此同时,数字技术的引入并未消除传统资本主义的剥削关系,反而通过自动化和智能化手段强化了对劳动者的控制(菲利普·斯塔布等,2019),能源工人被边缘化为“赛博无产阶级”(Dyer-Witheford,2014),其劳动价值被进一步压榨。要真正实现能源数字化转型的普惠性和可持续性,必须超越数字资本主义的逻辑,构建以公平、共享和可持续为核心的能源数字经济体系,为全球能源公平与可持续发展提供新动能。

同时,全球能源数字化转型正面临技术分歧、应用不足、资金短缺与安全风险等多重挑战。第一,技术标准分歧与应用不足严重制约产业协同发展(谢谦、金才淇,2024)。一方面,各国在智能电网协议、物联网通信接口、数据交互格式等核心领域尚未形成统一规范,这种分歧导致跨国能源基础设施难以实现互联互通。例如,美国和欧洲在智能电网协议上的技术标准存在显著差异。美国主要采用IEEE Std 2030.5-2018标准,而欧洲则更倾向于IEC61850协议。这种协议的不统一导致了设备和系统之间的互操作性问题。另一方面,数字技术的应用程度、普及速度、效能提升幅度也存在众多不确定性。全球仅有12%的油气田完成了数字化改造,发展中国家智能电网覆盖率低于40%,以及复合型人才缺口大等因素,导致能源行业人工智能技术普及率低于其他行业。能源领域的新技术商业化往往需要数十年,其商业转化周期较长,数字技术在能源领域的应用程度依然具有较大的提升空间^①。第二,资金缺口与投资风险形成财务瓶颈。彭博新能源财经2025年3月20日首届北京峰会上的数据显示^②,2024年全球能源转型投资首次突破2万亿美元,但增速从过去年均20%以上骤降至10.7%,暴露出转型动力衰减的风险。发达国家虽具备资金优势,但私营部门对长周期、高不确定性的数字化基建项目普遍持审慎态度,增长明显放缓。发展中国家则陷入更严峻的融资困境,主权信用评级限制使其难以获得优惠贷款,而数字能源项目特有的技术复杂性又抬高了风险溢价。第三,数据安全威胁叠加系统脆弱性催生新型风险。随着能源数据的体量和类型不断增加,数据安全和隐私保护成为重要问题。更复杂的是能源数据的战略属性:电力消费数据可反推工业生产情报等,这使得能源数字化转型不可避免地卷入数据主权争端。欧盟正在推进的能源数据空间(Energy Data Space)计划就因涉及第三国企业数据回传问题,引发多国监管部门的安全性质疑,这种数据流动与主权管辖的冲突在数字能源时代将愈发频繁。

三、发达经济体能源数字化转型的经验及比较

(一)美国借助区块链技术建立去中心化交易平台

美国作为全球能源消费与技术创新双重引领者,依托页岩气革命奠定的能源自给基础,

^①数据来源:《人工智能提速全球能源行业变革》,<https://www.news.cn/tech/20250415/8784ecc5aaac4eb1980eb-ef80dc04347/c.html>。

^②数据来源:《全球能源转型投资首次突破2万亿美元大关,但“碳中和”之路仍面临多重挑战》,<https://baijiahao.baidu.com/s?id=1827191250767669774&wfr=spider&for=pc>。

其能源体系加速向“清洁能源+数字技术”双轮驱动模式演进。美国实施了一系列措施以促进能源数字化转型,在智能计量网络、税收抵免和补贴贷款等方面提供了丰富的发展经验(见表2)。第一,构建智能计量网络优化能源管理。政府支持智能电表安装、通信网络建设和信息管理系统搭建,采集消费者能源使用数据,协助定制个性化服务方案。同时,推行同步相量测量计划,打破地域信息屏障,提升数据整合水平。在市场建设方面,通过动态调整电价和区块链技术建立去中心化交易平台,促进市场竞争和资源优化配置。第二,实施税收抵免政策激活光伏市场活力。美国通过ITC联邦投资税收抵免政策,对安装光伏系统的家庭和企业给予26%~30%的税收抵扣,自2006年实施以来,光伏产业增长超过100倍^①。配套的净计量政策允许用户将多余电力以零售价回售电网,进一步推动分布式光伏发展。第三,提供补贴与贷款担保降低储能投资风险。美国政府提供大量研发资金支持高效光伏电池、储能解决方案及智能电网技术等领域的创新。2022年11月,美国能源部(DOE)先后宣布投入共约4.2亿美元资金,支持长时储能技术示范及电池回收利用等项目^②。

(二)日本构建虚拟电厂实现分布式能源高效聚合

日本作为一个岛屿国家,国土面积狭小,能源资源匮乏,所需能源大量依赖进口。福岛核电站事故后,核能在日本能源结构中的比重显著下降,能源自给率一度降至6%~7%^③,这对国家能源安全构成严重挑战。近年来,日本能源转型持续推进和深化,在政策补贴激励、产学研合作、虚拟电厂和区域能源互联网平台等方面提供了丰富的发展经验。第一,构建虚拟电厂实现分布式能源高效聚合。日本将分散的储能资源、分布式能源和用电设备聚合起来,模拟传统电厂的功能,参与电力市场的调度和交易。例如,日本关西电力等企业与多家公司合作开展VPP实证业务,通过物联网技术连接并调控分布在用户端的储能系统,使其作为一个整体参与电网运行和电力市场互动。第二,打造区域能源互联网服务平台。日本通过构建综合能源服务平台,联通并整合同一区域内多个用户的能源需求与供给,促使他们通过网络化方式实现能源共享与交易互通。同时,日本颁布《能源基本计划》等政策文件,明确要求所有用电客户采用智能电表和新一代能源服务平台,以实现能源信息的双向交流与反馈。第三,推行FIT和FIP机制促进可再生能源自主普及与市场自由竞争。日本通过固定电价补贴(FIT)制度长期激励分布式光伏项目发展,2021年引入溢价补贴(FIP)形成“政策双轮驱动”,既保障基础收益又引入市场竞价机制,为能源

①数据来源:《光伏行业专题报告:寻找超预期之美国,既向朝阳,何起尘沙》, <https://new.qq.com/rain/a/20220518A02JAZ00>。

②数据来源:《美国能源部资助4.2亿美元支持电池技术》, https://casisd.cas.cn/zkcg/ydkb/kjqykb/2023/kjqykb202301/202304/t20230403_6726421.html。

③数据来源:《日本能源互联网发展现状及经验启示》, <https://guangfu.bjx.com.cn/news/20200507/1069525.shtml>。

数字化转型奠定发展基础。第四,强化产学研协同创新攻克储能核心技术。日本政府和产业界高度重视产学研合作,通过政策措施鼓励大学、科研机构与企业紧密协作,共同推动储能技术研发和产业化。这种密切合作模式有利于快速迭代储能技术,并培育出具有竞争力的产品和服务。

(三) 欧盟推广集成智能光伏组件打造零能耗建筑

欧盟能源结构长期依赖化石燃料进口,地缘政治波动加剧了供应风险,推动数字化与可再生能源整合成为战略重点。2022年,欧盟委员会发布“能源系统数字化行动计划”,通过对能源系统的深度数字化改造,提高能源自给程度^①。欧盟的能源数字化转型涉及零能耗建筑、绿色数据中心规模发展以及区域能源协同整合等方面。第一,推动建筑一体化转型零能耗建筑。欧盟鼓励和推广在新建和现有建筑中集成智能光伏组件,使之成为建筑物的一部分,实现绿色建筑和零能耗建筑的目标。为提高建筑物能效,欧盟提出《建筑能源绩效指令》(EPBD),2030年起所有新建建筑应为零碳建筑,既有建筑到2050年也应改造为零碳建筑^②。第二,构建绿色数据中心规模发展体系。欧盟严格遵循高能效与低环境影响的标准,率先推出一系列绿色数据中心规范和倡议。例如,通过执行严苛的PUE标准,促使数据中心运营商采用高效制冷系统、余热回收、可再生能源供电等绿色技术。2024年欧洲绿色数据中心市场规模估计为88.9亿美元,预计到2029年将达到127.6亿美元,年增长率为7.5%^③。第三,深化区域能源协同整合创新模式。欧盟创建能源系统双向互动标准接口,使数据中心配置区域热网连接装置,实现建筑余热转化社区供暖覆盖。欧盟构建统一的电力市场,要求成员国深化电力市场化改革,依托统一的标准架构统筹协调能源生产和供应环节,积极推动传输网络的有效分割,加速统一电力市场的构建进程。第四,建立标准化政策体系遵循顶层设计。欧盟地平线计划确定了开展研究与创新资助的绿色转型、数字化转型等战略方向。通过出台《欧盟数据中心行为守则》,规范场地利用效率、数据中心基础设施效率等一系列量化指标,形成覆盖能源生产、输送、消费全链条的规范约束体系(Avgerinou et al., 2017)。2023年欧盟公布《数据法案》,为包括企业和个人在内的各方主体设定了访问、获取和共享数据的具体规则,以促进数据的合理流通,提升数据作为资源在欧盟经济社会中的使用效率。

(四) 德国创新一体化能源服务模式共享节能效益

德国工业4.0以物联网、大数据、云计算等尖端技术为羽翼,助力生产过程实现数字化、网

^① Digitalization and energy, <https://iea.blob.core.windows.net/assets/b1e6600c-4e40-4d9c-809d-1d1724c763d5/DigitalizationandEnergy3.pdf>.

^② 数据来源:《零碳建筑 | EU“减碳55%”提案加速推进:建筑减排雄心加码,2050碳中和目标达成能否加速?》, <https://finance.sina.com.cn/esg/2024-08-01/doc-inchcxfz4661407.shtml>。

^③ 数据来源: Mordor Intelligence, <https://www.mordorintelligence.com/zh-CN/industry-reports/europe-green-data-center-industry>。

络化、智能化的蜕变(Otoum et al., 2022)。德国能源数字化转型涉及能源合同管理、一体化服务和竞拍模式等方面。第一,创新合同能源管理模式共享节能效益。德国在商业模式方面发展出包括合同能源管理、能源绩效合同、能源托管服务等多种创新综合能源服务模式。合同能源管理模式下,能源服务公司为客户改造或新建能源设施,并承诺如达成一定的能源节省目标,可从中分享节能所带来的经济效益。在德国能源署合同能源管理白皮书的案例中,通过合同能源管理,企业整体的能源支出显著下降,节能效益为30%。在合同期内,客户和承包商按一定比例分享了节约的费用,双方均获得相应的利润。节能合同到期后,节能服务公司退出合同,客户仍然能继续享有节能成果^①。第二,构建一体化能源服务模式实现多能协同。德国在综合能源服务领域率先实现了一体化服务模式。德国企业通过集成供热、供电、制冷等多种能源服务,结合高效的能源管理系统,为客户提供一站式、个性化的能源解决方案。其次,政府和企业共同推动了一系列综合能源服务示范项目。如C/sells项目,它将光伏发电、储能和智能微网等要素结合,构建了具有高度互动性和灵活性的能源系统,实现了用户、生产商和电网之间的高效互动。第三,实施竞拍模式推动光伏产业有序竞争。德国政府长期对光伏产业给予强有力的政策支持,通过实施“Energiewende”(能源转型)战略,积极推广分布式太阳能光伏系统。而随着产业成熟,德国政府适时转向竞拍模式(Auction System),通过引入可再生能源竞拍机制实现补贴政策优化,以确保补贴政策的合理化和光伏产业的健康竞争。

表2 发达经济体能源数字化转型经验比较

经济体	重点领域	发展经验
美国	去中心化交易平台、智能光伏、智慧储能	构建智能计量网络、实施税收抵免政策、提供补贴与贷款担保
日本	虚拟电厂、智能储能、能源共享交易	产学研协同创新、打造区域能源互联网服务平台
欧盟	零能耗建筑、绿色数据中心	建立标准化政策体系、深化区域能源协同整合创新模式
德国	智能光伏、综合能源服务	构建一体化能源服务模式、创新综合能源服务

四、中国能源数字化转型的发展现状与挑战

能源作为经济社会发展的基础支撑,其产业与数字技术的融合是推动我国能源产业基础高级化、产业链现代化的关键引擎,是国家实现高质量发展和绿色低碳战略的重要抓手(王于

^①数据来源:《探寻建筑能源管理的商业模式——合同能源管理》, <https://news.bjx.com.cn/html/20200219/1044880.shtml>。

鹤等,2021)。通过融合数字技术,能够提升能源产业的核心竞争力,促进能源产业的高质量发展,对于构建现代化能源体系、提升能源安全保障能力具有重要意义。

(一)中国能源数字化转型的发展现状

随着低碳发展的长期趋势逐步确立,中国能源数字化市场规模不断扩大。根据亿欧智库发布的《2021 能源电力数字化转型研究报告》,2020 年中国能源电力数字化市场规模达到 2213 亿元,2025 年中国能源电力领域数字化市场规模将增长至约 3700 亿元,CAGR 为 10.8% (数字能源高质量发展课题组,2023)。从中国能源数字化转型的发展现状看,源网荷储一体化建设、新三样和传统能源行业在数字化转型等方面具有较为明显的优势。

第一,源网荷储一体化与新型电力系统建设加速推进。源网荷储一体化通过优化整合本地电源侧、电网侧、负荷侧资源,以先进技术突破和体制机制创新为支撑,探索构建新型电力系统发展路径。例如,云南省规模最大的源网荷储一体化新能源集群项目建成投产,通过将楚雄片区光伏电源、500 千伏输变电工程等项目整体规划建设,实现电能的智能化管理和高效利用。厦门供电公司打造高能级配电网示范样板,针对白鹭体育场的国际赛事用电高要求,构建“全领域用电优化、全要素互联互通、全等级网架支撑、全场景数字赋能、全类型资本参与、全方位机制创新”的新型电力系统,片区内供电可靠性及供电品质持续位居国内前列。第二,新三样与数字化技术融合发展迅速。新三样,即电动载人汽车、锂离子蓄电池和太阳能蓄电池,作为我国外贸出口的“主力军”,其数字化转型成效显著。易控智驾已实现超千台无人驾驶矿卡在全国 20 多座矿山的常态化运行应用,累计里程超过 3000 多万公里,破解了矿山的招工难题^①。上海运湖科技的无人驾驶卡车系统在复杂环境感知算法等关键技术上取得突破,将在封闭场景工业物联网中发挥重要作用。此外,新能源汽车与电网融合互动发展迅速。2024 年 5 月,南方电网公司在深圳开展全国最大规模的车网互动应用,1473 辆新能源汽车以有序充电和反向放电两种方式响应电网削峰需求,实现新能源汽车与电网的“双向奔赴”^②。这些数字化转型成果不仅提高了生产效率,还增强了产品的市场竞争力,推动了我国新三样产业的高质量发展。第三,传统能源数字化转型成效显著。《国家能源局关于加快推进能源数字化智能化发展的若干意见》提出,要根据电力、煤炭、油气等行业数字化智能化转型发展需求,加强能源领域数字化智能化技术的融合应用。例如,在煤炭行业,中国煤科在黄陵一号煤矿开创了“一人巡视,无人值守”的生产模式,服务矿方建立了我国第一个“无人化采煤”工作面,大大提高了煤矿安全保障。能源数字化转型不仅提升了传统能源行业的生产效率和安全性,还为能源行业的可持续发展提供了有力支撑。

^①数据来源:《央视〈焦点访谈〉聚焦易控智驾矿山无人驾驶!》, <https://mine.iyiou.com/news/1092012>。

^②数据来源:《全国最大规模车网互动在深实现应用 1473 辆新能源汽车参与,削峰电量可供 548 户家庭使用》, https://csg.cn/xwzx/2024/gsyw/202405/t20240517_340558.html。

(二)中国能源数字化转型面临的挑战

中国能源产业在数字化转型进程中已取得阶段性成果,但在相关法律法规、关键技术自主化、基础设施建设和数据资源整合利用等领域仍存在发展不平衡现象。这些结构性矛盾正成为能源产业迈向高质量发展过程中需要协同推进的重要课题。

首先,中国能源产业数字化法律法规和市场激励机制不够完善。一是法规政策与标准体系尚未完全建立。在能源数字化转型进程中,涉及的数据安全、数据权属、交易规则、市场准入等方面相关法律法规与政策体系尚未完全建立,应对能源数字化转型带来的新问题和挑战存在一定困难,能源数字化转型所需的各类技术标准、安全标准、评估标准等也尚待进一步完善和统一。二是经济激励机制与市场环境尚未成熟。能源数字化转型的推进离不开合理的经济激励机制和健康的市场环境。目前,我国在能源数字化转型项目投融资、成本核算、利润分配等方面缺乏有效的激励政策,社会资本对能源数字化转型项目的投资意愿受到一定影响。同时,市场竞争机制尚不完善,部分领域垄断性强,新兴的能源数字化转型企业进入市场门槛较高,市场活力和创新能力有待进一步激发。三是网络安全和隐私保护压力较大。随着能源系统的数字化程度加深,能源基础设施和网络系统面临的网络安全威胁和挑战日益严峻。一旦发生网络攻击或数据泄露事件,不仅可能导致能源供应中断,造成严重的经济损失和社会影响,还可能危及国家安全和公众利益(王于鹤等,2021)。我国在能源领域网络安全防护体系的建设和运行、数据安全和个人隐私保护等方面的工作仍需加强。

其次,能源产业数字化自主研发能力存在明显短板,核心技术领域“卡脖子”问题亟待突破。自主研发能力的提升是推动能源数字化转型的核心驱动力,尽管中国在5G、云计算、人工智能、大数据等前沿科技领域取得了长足进步,但在能源数字化转型领域的关键核心技术,如智能电网、能源互联网、储能技术、新能源并网控制技术等方面,与国际先进水平仍存在一定差距,现阶段我国对某些关键设备和系统的国产化率、自主知识产权拥有率尚待提高。例如,在能源互联网领域,工业控制系统的实时操作系统(RTOS)国产化率低于35%,国内工业实时操作系统产品的水平依然落后于发达国家,在产品可靠性、三维图形支持能力等方面与国外软件存在差距,同时缺乏完善的软硬件生态系统。国内市场依然主要依靠美国 VxWorks、 $\mu\text{C}/\text{OS}-\text{II}$ 等产品(孟嫣等,2024)。一些关键领域的技术短板可能会形成系统性风险。

最后,能源数字化转型基础设施建设(张恒硕等,2022)和能源大数据价值挖掘有待提高(蔡跃洲、马文君,2021)。一是能源基础设施与设备的数字化升级改造难度大、成本高。中国的能源基础设施庞大而复杂,包括电网、油气管网、新能源发电设施等,其中许多设施年代久远,设备老化,数字化改造的难度和成本较高。此外,部分偏远地区、农村地区的能源基础设施建设相对落后,接入数字化网络的困难较大,这在一定程度上制约了能源资源在全国范围

内的优化配置和高效利用。二是能源产业数据质量和数据融合程度较低,数据价值挖掘不足。当前,能源产业内部与其他行业间的数据共享和融合程度较低,“数据孤岛”现象普遍存在,能源大数据的价值尚未得到充分挖掘,数据的完整性、准确性以及实时性均有待提高。缺乏统一的数据标准、数据交换平台和有效的数据治理体系,使得能源数据在跨部门、跨领域的流动和应用受到限制,影响了能源系统的智能决策和优化运行。

五、全球能源数字化转型的未来趋势与中国策略

能源数字化转型是实现更高效、更清洁、更可持续能源未来的关键路径。随着全球能源数字化转型迈入新阶段,各国政府和国际组织积极推动能源部门现代化,相继出台多项纲领性文件,这不仅为全球能源转型提供了政策支撑,也体现了各国政府在推动能源数字化转型方面的决心。

(一)全球能源数字化转型的发展趋势

未来,全球能源数字化转型将以云计算、大数据、人工智能等新兴信息技术与传统能源行业的深度融合为主体,能源生产、传输、存储乃至消费的各个环节将出现革命性变化。这一变化将重塑全球能源产业价值链,以智能光伏、智能储能、AI监测以及综合能源服务等领域为代表,为全球经济和社会发展注入新的活力。

第一,智能光伏优化运维,数字化平台助力创新。智能光伏通过云计算、大数据等技术实现全生命周期智能化管理,显著提升光伏电站的稳定性和安全性。未来,智能光伏系统将集成高清遥感、无人机巡检和嵌入式智能传感器等技术,实时监测电站运行状态,优化能源产出并提前预防潜在故障,同时推动组件、逆变器和控制系统的模块化、标准化发展,以适应大规模部署需求。区块链等技术将催生去中心化能源交易模式,未来的智能光伏系统也将更适应低温、高温等特殊环境,并在建筑一体化、农业光伏等领域实现交叉创新。第二,智能储能多维并进,提供新型解决方案。智能储能技术聚焦于高能量密度、长寿命新型储能技术的开发与商业化应用,同时与微电网、分布式光伏等形成多维度融合,提供跨领域、跨行业的综合解决方案。通过云端智能管理,储能系统实现实时监控、远程诊断与优化控制,提升安全性和运维效率,并支持需求响应、电网调频等增值服务。智能储能在虚拟电厂中作为核心部件,通过算法优化实现储能资产的集群调度,积极参与电力批发市场和辅助服务市场,提高电力系统运行效益。第三,AI监测优化能源效率,循环经济助力零碳实践。绿色数据中心通过AI实时监测与分析优化能源使用效率,同时加大可再生能源采购力度,力争实现100%清洁能源供电和零碳排放目标。AI技术与循环经济相互协作,通过余热回收为周边社区供暖或制冷,实现能源梯级利用,并通过材料回收和再利用提升资源效率。边缘计算技术助力数据中心分布式部署,减少数据传输距离和能源损耗。碳足迹量化

管理与碳中和承诺进一步推动数据中心的低碳转型,为构建可持续发展的信息技术基础设施奠定基础。第四,能源服务跨界融合,资源共享助力效率提升。综合能源服务通过横向融合电力、燃气、热力等多种能源形式,以及纵向耦合能源与交通、建筑、制造业等行业的资源,实现全社会能源利用效率的最大化。数字化平台通过大数据分析、AI算法等技术手段提供精准化的能源管理服务,包括能源审计、成本优化建议等。智能电网技术有效调动用户侧资源,实现主动式需求响应,鼓励用户根据实时电价信号灵活调整能源使用。同时,加强对分布式能源资源的统筹管理,形成区域内的多能互补和供需平衡,推动能源服务产业的全面革新。

(二)全球能源数字化转型的中国策略

借鉴发达经济体能源数字化转型经验,未来中国能源数字化转型将深化数据要素价值释放,打造数字能源融合发展的物理载体,构建自主可控的产业体系和能源数字化转型市场机制,推动能源产业从“规模驱动”向“创新驱动”跃升。

第一,深化数据要素价值释放,培育能源数字经济新动能。加快构建国家级能源大数据中心,破除“数据孤岛”,建立覆盖发输配用各环节的数据中台,开发电力碳计量、需求侧响应等数据产品。针对数据质量痛点,需制定能源数据采集国标体系,推广智能电表、物联感知终端等数字化计量设备。借鉴欧盟绿色数据中心建设规范,在西部可再生能源基地布局算力基础设施,发展“东数西算+源网荷储”协同模式。同时,重点培育能源数据服务新业态,建立基于区块链的绿电溯源交易平台,开发负荷预测、能效诊断等数据增值服务,形成千亿级能源数字经济市场。

第二,加速新型基础设施建设,打造数字能源融合发展的物理载体。加速新型基础设施建设是构建新型能源体系的关键,中国需深化能源基础设施“智改数转”专项行动,创新投融资模式破解改造难题。借鉴德国多能协同发展经验,在工业园区、城市新区等场景推广数字新基建,将5G基站、边缘计算节点与分布式光伏、储能设施等同步规划、协同运行。针对农村能源数字化转型滞后问题,设立专项债券支持偏远地区智能微电网建设,将数字化改造与乡村振兴战略深度融合。此外,应建立新型电力系统专项投资基金,重点支持柔性直流输电、车网互动(V2G)、虚拟同步机等融合基础设施建设,通过“以奖代补”方式激励电网企业加快数字化转型。

第三,构建自主可控的产业体系,增强全球能源领域的竞争力和话语权。聚焦关键领域“卡脖子”技术,实施“揭榜挂帅”重大攻关工程。借鉴日本区域能源互联网平台建设经验和欧盟地平线计划实施路径,整合国家实验室、高校、科研院所和企业等各方资源,组建跨学科数字能源创新联合体,开展协同攻关,加快突破关键共性技术、前沿引领技术,如能源数字孪生平台、高精度电力市场仿真系统等基础工具链的开发。集中突破能源路由、功率

半导体、宽禁带材料等核心技术,打造自主可控的技术体系。针对工业控制系统国产化率低的问题,建立“研发—验证—应用”全链条扶持机制,通过首套装备保险补偿、国产化替代目录等政策,推动自主实时操作系统(RTOS)在特高压换流站、新能源场站等场景的规模化应用。

第四,构建包容有序的产业生态,建立健全法规体系与市场激励机制。一是要构建适应数字时代的能源法治框架,加快制定能源数据确权、交易规则及安全标准,借鉴欧盟《数据治理法案》建立分级分类的数据流通机制,在保障国家安全前提下推动能源数据要素市场化配置,并设立数字化转型专项立法,明确数字孪生电网、分布式能源聚合等新业态的法律地位,为市场主体提供稳定预期。二是借鉴美国“税收抵免+贷款担保”组合政策经验,针对国内数字化项目融资难问题,建立专项产业基金与风险补偿机制,对能源物联网、虚拟电厂等新兴领域实施税收优惠。三是参考德国合同能源管理模式,建立基于节能效益共享的市场化激励机制,允许社会资本通过数据运营参与能源系统优化收益分配。

中国拥有丰富的能源资源,庞大的市场需求和强大的数字技术基础,在未来能源数字化转型中机遇广阔。一方面,要充分吸收发达国家在政策设计、技术研发、市场培育等方面的先进经验,通过制度创新、技术创新、模式创新协同发力,构建具有中国自主知识产权体系的能源数字化转型发展模式;另一方面,要警惕发达国家由数字资本主义带来的能源资源分配不平等,通过提高数字基础设施的质量并扩大覆盖范围,更好地应对数字资本主义带来的技术垄断和数据控制,为全球能源可持续发展贡献中国智慧和方案。

参考文献:

- [1] 蔡跃洲,马文君. 数据要素对高质量发展影响与数据流动制约[J]. 数量经济技术经济研究, 2021, 38(03): 64-83.
- [2] 曹慧. 特朗普时期美欧能源和气候政策比较[J]. 国外理论动态, 2019(07): 117-127.
- [3] 陈文旭,徐天意. 数字资本主义及其批判[J]. 国外理论动态, 2020(01): 61-67.
- [4] 程娜,杨嘉一. 数据垄断的资本逻辑与技术权力——形成机理与治理创新[J]. 工业技术经济, 2025, 44(04): 14-24.
- [5] 菲利普·斯塔布,奥利弗·纳赫特韦,鲁云林. 数字资本主义对市场和劳动的控制[J]. 国外理论动态, 2019(3): 27-37.
- [6] 孟嫣,李明时,邓昌义. 工业实时操作系统关键技术及发展趋势研究[J]. 新型工业化, 2024, 14(03): 14-22.
- [7] 数字能源高质量发展课题组. 以数赋“能”:数字能源发展现状与趋势(上)[J]. 智慧中国, 2023(09): 44-46.
- [8] 数字能源高质量发展课题组. 以数赋“能”:数字能源发展现状与趋势(下)[J]. 智慧中国, 2023(10): 36-39.
- [9] 董光毅. 基于双碳目标的智慧能源体系构建[J]. 智慧电力, 2021, 49(05): 1-6.

- [10] 王于鹤,王娟,邓良辰.“双碳”目标下,能源行业数字化转型的思考与建议[J].中国能源,2021,43(10):47-52.
- [11] 王于鹤,王娟.能源企业数字化转型的经验、挑战和建议[J].中国能源,2022,44(11):28-35.
- [12] 谢谦,金才淇.跨境数据流动的共同关切、面临挑战与中国应对[J].学习与探索,2024(08):114-125.
- [13] 张恒硕,李绍萍.数字基础设施与能源产业高级化:效应与机制[J].产业经济研究,2022(05):15-27, 71.
- [14] Avgerinou, M., P. Bertoldi, L. Castellazzi. Trends in Data Centre Energy Consumption under the European Code of Conduct for Data Centre Energy Efficiency[J]. Energies, 2017, 10(10): 1470.
- [15] Dyer-Witheford, N. Cyber-proletariat: Global Labour in the Digital Vortex[M]. Toronto: Pluto Press, 2014: 201.
- [16] Hayashi, M., L. Hughes. The Policy Responses to the Fukushima Nuclear Accident and Their Effect on Japanese Energy Security[J]. Energy Policy, 2013, 59: 86-101.
- [17] Lee, C. C., Z. W. He, Z. Yuan. A Pathway to Sustainable Development: Digitization and Green Productivity [J]. Energy Economics, 2023, 124: 106772.
- [18] Olabi, A. G., M. A. Abdulkareem, H. Jouhara. Energy Digitalization: Main Categories, Applications, Merits, and Barriers[J]. Energy, 2023, 271: 126899.
- [19] Otoum, S., I. A. Ridhawi, H. Mouftah. A Federated Learning and Blockchain-enabled Sustainable Energy Trade at the Edge: A Framework for Industry 4.0[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2022, 10(4): 3018-3026.

Theoretical Interpretation and Practical Strategies of China's Energy Digital Transformation: Global Energy Transformation from the Perspective of Digital Capitalism

Chen Xingxing^a, Li Tianyi^b

(a: Institute of Quantitative & Technological Economics, CASS; b: University of Chinese Academy of Social Sciences)

Abstract: The digital transformation of energy is an important way to promote the intelligence and modernization of traditional energy industries. With the rapid development of advanced technologies such as the internet, big data, artificial intelligence and blockchain, China urgently needs to seize the strategic opportunity of digital transformation in the energy sector, and promote the leap of the energy industry from traditional technology application to the integration of emerging technologies, from single-point technology scenarios to the integration of the entire chain of technologies, from centralized production to distributed centralized collaboration, and from single energy supply to comprehensive energy services. This paper proposes that the digital transformation of energy is a process of intelligent perception, collaborative optimization and decision-making management throughout the entire chain of energy production, storage, transmission, trading and consumption driven by data elements. It is a profound change that takes data elements as the foundation and digital technology as the engine, driving the energy industry in dimensions such as technical architecture, business processes, business models, governance systems and value creation. At present, the

structural contradictions of digital capitalism have exacerbated the dilemma of the digital transformation of energy, formed a monopolistic discourse power in the global energy market, and exacerbated the inequality in the distribution of energy resources. China needs to improve its legal and regulatory system and market incentive mechanisms, focus on breaking through key “bottleneck” technologies in critical areas, accelerate the construction of new infrastructure, create physical carriers for the integrated development of digital energy, take the release of data element value as the starting point, build an inclusive and orderly industrial ecosystem and an independent and controllable industrial system, and cultivate green power for new quality productivity.

Keywords: Digitalization of Energy; Energy Transition; Number Real Fusion; Digital Capitalism; New Quality Productivity

JEL Classification: L52, Q43, Q56

(责任编辑:卢 玲)