

我国能源互联网产业发展形态与路径分析研究

徐双庆^{1,2}, 张哲³, 张绚^{1,2*}

(1. 清华大学电机工程与应用电子技术系, 北京 100085; 2. 郑州工程技术学院气候变化与碳中和研究院, 郑州 450044; 3. 华北科技学院经济管理学院, 河北廊坊 065201)

摘要: 能源互联网是实施能源革命战略、推动能源转型的重要工作之一, 已实现从技术到系统再到产业的跨层面、多维度发展; 然而涉及技术、政策、商业等领域且覆盖面较宽, 加大了理论探讨产业内部复杂协调关系的难度。本文辨识了能源互联网的技术、系统、产业三重指代含义, 提出了能源互联网产业的技术-机制-模式分析模型以及合理简化的“吊钟”模型, 归纳出模式探索型、政策引导型、技术研发型、模式成熟型、政策缺位型、技术优势型等能源互联网产业发展形态以及相应的产业实践案例。在此基础上, 应用“吊钟”模型分析了我国能源互联网产业发展的可行路径, 重点讨论了可再生能源产业、电动汽车产业、氢能产业的发展案例, 提出了技术补强、机制补强、模式补强等具体发展路径建议。相关研究结果有助于深入理解我国能源互联网产业发展逻辑, 可为深化能源互联网应用探索、壮大能源互联网发展规模提供有益参考。

关键词: 能源互联网; 产业形态; 政策机制; 商业模式; 路径分析

中图分类号: T-9; F40 **文献标识码:** A

Development Patterns and Paths of China's Energy Internet Industry

Xu Shuangqing^{1,2}, Zhang Zhe³, Zhang Xuan^{1,2*}

(1. Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100085, China; 2. Institute of Climate Change and Carbon Neutrality, Zhengzhou University of Technology, Zhengzhou 450044, China; 3. School of Economics and Management, North China Institute of Science and Technology, Langfang 065201, Hebei, China)

Abstract: Energy Internet is crucial for promoting energy transition and revolution, and it has achieved multi-dimensional development in terms of technology, system, and industry. The development of energy Internet involves a wide range of aspects including technology, policy, and business; however, there are relatively few theoretical discussions on the complex coordination relationships within the energy Internet industry. This study identifies the implications of energy Internet from the technology, system, and industry aspects, proposes a technology-mechanism-mode analysis model and a simplified “hanging bell” model for the energy Internet industry, and summarizes the development patterns of China's energy Internet industry as pattern exploration, policy guidance, technology research and development, pattern maturity, policy deficiency, and technology advantage types; practice cases are also summarized. On this basis, the feasible paths for the development of China's energy Internet industry are analyzed using the “hanging bell” model, focusing on the development cases of the renewable energy, electric vehicle, and hydrogen industries, and specific development paths such as technology enhancement, mechanism enhancement, and mode enhancement are suggested. This study is expected to help understand the development logic of the energy Internet industry and provide references for further exploring

收稿日期: 2023-10-07; **修回日期:** 2024-03-30

通讯作者: *张绚, 清华大学电机工程与应用电子技术系副研究员, 研究方向为能源与气候变化政策; E-mail: zhangxuan02@tsinghua.edu.cn

资助项目: 国家自然科学基金项目(72273138)

本刊网址: www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

the applications and promoting the development scale of the energy Internet.

Keywords: energy Internet; industry pattern; policy mechanism; business mode; path analysis

一、前言

2014年,我国能源革命战略启动实施,对能源产业、相关经济社会发展作出总体安排,兼顾经济发展、环境治理、社会进步等方面^[1,2]。在推动能源转型过程中,能源互联网获得高度关注并被寄予厚望^[3],从2013年学术界广泛讨论相关概念开始已发展超过10年,实现了从虚拟概念到技术形态再到产业发展的重大转变。2020年,碳达峰、碳中和(“双碳”)成为国家重大战略目标,要求筑牢经济高质量发展的物质基础,同步推进生态文明建设。能源是相关建设工作的动力来源,《关于推动能耗双控逐步转向碳排放双控的意见》(2023年)进一步将“双碳”目标与能源革命方向统一起来。我国能源互联网的发展方向,与当前能源产业发展趋势、能源革命提出的未来能源发展目标高度一致,如建立多元供应体系,加强能源输配网络和储备设施建设,形成煤、油、气、核、新能源、可再生能源“多轮驱动”发展格局^[2]。

能源互联网覆盖面较宽,相关研究涉及技术、政策、商业等领域。前期研究侧重概念研讨,认为需要从技术、政策、商业等角度共同发力^[3,4];随后的深化研究多为细分领域的具体问题探讨,而未涉及跨领域的互动关系剖析。这是因为,随着相关研究的深入,客体及其关系变得更为复杂,不易聚焦且较难入手讨论。为此,本文着重进行同时涉及技术、政策、商业3个领域的综合性研究,剖析能源互联网产业在技术发展、政策机制、商业模式3个层面上的互动关系;构建能源互联网产业形态分析模型,结合我国能源互联网建设的经验和教训,阐明能源互联网产业发展中3个层面要素的相互促进与制约关系;进而把握能源互联网产业发展规律,提出能源转型进程中推动能源互联网产业发展的路径建议。

二、能源互联网的含义与产业形态分析模型

(一) 能源互联网的三重指代含义

能源互联网经历了4个发展阶段:概念孕育阶段

(1970—2003年)、初步研究阶段(2004—2013年)、启动建设阶段(2014—2015年)、实质性推进阶段(2016年至今)^[5]。在各阶段中,能源互联网的含义在不断变化,尤其在2014年后相应内涵与外延迅速扩大,被明确为未来新型能源的生产使用方式^[6]。在我国,能源互联网与产业实践的规模化扩展密切相关,指代含义主要涉及技术、系统、产业等形态。

一是指代技术含义。从最初的概念化设想式定义出发,经过业界实践形成具有较强技术特征的定义。有观点认为,全球能源互联网是以特高压电网为骨干网架、具有全球互联特征的坚强智能电网,成为清洁能源在全球范围内大规模开发、输送、使用的基础平台^[7]。与此对应,能源互联网是一种新兴技术。在能源技术快速发展的背景下,智能电网与互联网、物联网等信息技术相结合,推动能源互联网从概念走向现实^[8]。能源互联网关联领域众多,又借鉴互联网理念及技术来不断丰富自身内涵,涉及的技术门类及系统更为庞大^[8]。能源互联网技术体系从“能源+信息”的两层结构^[9]逐步发展到贯穿能源生产、传输、存储、消费等主要环节,“三横一纵”的矩阵式结构^[4,8]。此概念范畴下的研究聚焦技术本身^[10-12],主要有能源与信息技术融合发展^[13],新能源技术^[14]、储能技术^[15]、数字孪生^[16]、新型电力技术^[17]的融合应用,能源互联网建设的基础工作等^[18]。

二是指代系统含义。随着相关研究的深入,采用更具理论性的抽象定义方式将能源互联网的边界从单纯的技术层扩展到应用层。例如,能源互联网是一种互联网理念及技术,能源生产、传输、存储、消费,能源市场等深度融合的新型生态化能源系统^[19]。这种含义的扩展,使能源互联网从单纯的技术形态延伸到多个层面并以多种形态呈现,如区域的综合能源系统^[20]。相关研究的范围和内容也更加开阔:将能源互联网作为系统,研究其功能体系^[21]、评价指标体系^[22]、新型能源技术的发展^[23];也将能源互联网作为时代系统环境,研究此背景下传统能源发展^[24,25]、减排路径选择^[26]、相关产业发展^[25]、产业生态系统^[27]等课题。此外,在具体市场

应用中能源互联网的多种形态及模式问题也逐渐获得更多关注。

三是指代产业含义。将能源互联网视为能源产业发展的新形态^[5]，研究视野继续拓展至企业、产业范畴以及商业管理领域，研究内容继续从技术体系向机制政策体系延伸。能源互联网相关的商业竞争^[28]、企业绩效^[29]、商业模式^[30,31]、业态发展^[32]、创新机制^[33]、产业政策^[34]等成为关注点。这也说明，我国能源互联网逐步形成产业规模，在实践中真正触碰到发展面临的瓶颈问题。

能源互联网指代含义的演进（从技术到系统再到产业）引发了相关研究内容的快速增长和多样化，但始终存在3个不变的要素。①文献梳理结果、应用实践遇到的问题都表明，能源互联网在本质上是技术创新应用，因而技术层面内容始终是发展的重点。②物理层的联通、应用层的创新都涉及运行中的秩序与组织方式，需要体制机制完善以及配套的政策、制度和规范^[6]；适宜的政策和机制是能源互联网发展过程中的必要组成部分。③当能源互联网发展到产业级别，技术到商业的转化应用、市场运行中的形态与模式等自然成为新的研究焦点。

技术发展、政策机制、市场运行模式是能源互联网产业发展中需要讨论的3个要素。建立技术-机制-模式分析模型，剖析能源互联网产业发展形态，分析各要素的互动关系以及对产业发展的影响并据此探讨适宜的发展路径，有助于精准推动能源互联网产业健康发展，加速能源转型进程。

（二）能源互联网产业发展形态分析模型

能源互联网是面向未来、契合能源发展趋势的一系列革新性能源技术、机制、模式共同作用的能源产业发展新形态，覆盖范围宽泛。能源互联网产业的健康发展，需要尽可能完备的技术、机制和模式，而现实中3个层面的问题较多，构成能源互联网产业发展的障碍：能源供给与需求在物理层面匹配上存在技术难题，如电动汽车快速充电技术、电热转换与储能技术等仍不够成熟；政策与制度层面存在机制性问题，如在“双碳”目标驱动下，单纯围绕经济效益设定考核目标的方式有待改变，对低排放、低污染能源技术的政策支持力度也需提高；能源技术与产业政策共同在市场层面运行时面临的

模式问题，如发电厂、电网、用户之间商品和价值交换的传统方式在“能源产消者”^[35]模式下发生变化等。

构建能源互联网技术-机制-模式分析模型，将技术、机制、模式按照各自的完备程度分为成熟度高、可行性强的正方向，成熟度低、可行性弱的负方向；现有的技术、机制、模式在各自的正/负方向上按照其指标水平情况分布。以技术层面为例，光伏电池中的发射极背面钝化电池（PERC）技术实用性良好，具备批量生产条件，发电成本与火电持平，代表技术可行性强的正方向；钙钛矿光伏电池技术可行性相对差，被视为未来技术类型，现阶段大规模产业化条件不成熟，归为负方向。机制、模式层面也存在类似的分布情况。

将能源互联网技术、机制、模式层面的正/负方向逐对组合，构成形似吊钟的“吊钟”模型（见图1），可作为理解能源互联网产业发展过程的简化工具。技术、机制、模式层面要素组合形成的每个三角形代表一种能源互联网技术所处的产业发展状态，共有8种形态。①由3个大图标构成的组合（形成正三角形）代表优势要素组合的最理想形态，可以最大程度地发挥技术优势、推动能源转型；技术的可落地性强，配套的政策制度完备且明确，相应的市场运行模式成熟。②由3个小图标构成的组合（形成倒置正三角形）代表弱势组合的最差形态

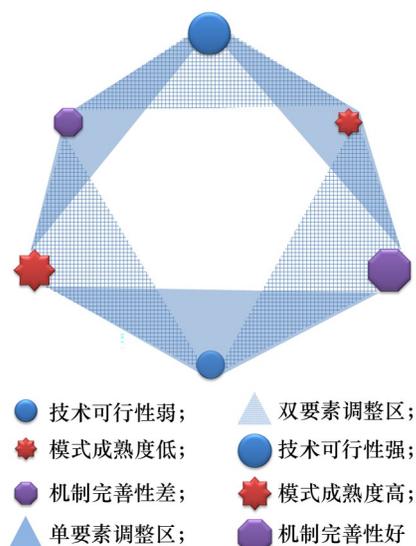


图1 能源互联网产业发展形态（“吊钟”模型）

注：圆形图标表示技术可行性的强弱程度；八角形表示机制完善状况水平；星形图标表示模式成熟度状态；大图标代表正方向，表示程度强、水平高、状态好；小图标代表负方向，表示程度弱、水平低、状态差。

态,表明一种能源互联网技术当前处于实验室研发或试验阶段,应用前景不明确,没有配套的政策制度和市场运行模式。③还有6个由相邻图标构成偏三角形,相应组合也值得讨论:2个正方向、1个负方向的组合,由(蓝色)阴影三角形表示;2个负方向、1个正方向的组合,由(蓝色)网格三角形表示。处于负方向的要素作出朝向正方向的调整,即表示能源互联网产业向理想形态发展的过程:阴影三角形中只有1个层面需要作出朝向正方向的调整,称为单要素调整区;网格三角形中有2个层面需要调整,称为双要素调整区。在6个组合中,至少有1个层面需要调整提升,相应提升过程即为能源互联网朝着能源革命方向迈进的过程,也是通过能源互联网实现“双碳”目标的可行路径。实际上,产业调整远较模型描述复杂,仅将1个层面要素由负调正不一定能够实现预期目标,通常需要综合调整3个层面要素。

三、我国能源互联网产业发展形态评价与实例分析

(一) 能源互联网产业形态评价

由“吊钟”模型可见,技术、模式、机制的8套组合代表了能源互联网产业发展中的8种基本形态。其中,最佳形态、最差形态不具有讨论价值,6个偏三角形组合是讨论重点(见表1)。为便于讨论,命名每个组合并概括其特征,再将能源互联网的细分产业对应置入;在每个组合中,固定3个要素中的2个,再对第3个要素按照技术、机制、模式各自的正/负方向分别进行分析。

1. 模式探索型

模式探索型形态是可行性强的技术、较完善的机制政策、较低成熟度的应用模式的组合。对比理

想状态,该形态需要补强市场运行模式方面的短板。该形态产业技术相对成熟,具有良好的规模化发展预期,各级管理部门提供了相对完备的配套政策;不足之处是欠缺应用层面的高效运行方式,如商业模式、商业环境、盈利模式等。在该形态的发展实践中,可再生能源增量配网项目、面向可再生能源的“隔墙售电”业务等较常见。

2. 政策引导型

政策引导型形态相对于模式探索型,技术可行性是弱项,但较完善的机制政策、较低成熟度的应用模式组合特点不变。政策对产业发展起到重要推动作用,从国家层面的产业政策、财税政策、科技政策、金融政策、人才政策到地方层面甚至单一工业园区的配套制度措施,都为特定产业的发展提供了良好的环境空间;政策引导可以扶持产业发展,但产业发展结果并不一定以政策导向为转移。我国光伏发电、风电产业就是从这一组合起步,在技术落后、市场空白、仅有政策支持的情况下,逐步壮大产业规模。

3. 技术研发型

在技术研发型形态中,政策机制具有较好的完善性,而技术可行性较弱、商业模式成熟度较高。技术替代式发展最为常见,原有的市场和机制相对成熟、运行稳定,新技术的出现不打破运行框架,仅对技术进行替代升级就能促进产业发展。当前,我国动力电池行业正在经历这一形态演变,半固态、固态电池在技术成熟后将替代液态电池,但无需打破现有稳定的政策机制和市场模式组合。

4. 模式成熟型

模式成熟型形态相对于技术研发型,技术可行性较弱、商业模式成熟度较高的特点保持不变,而政策机制的完善性变差。该形态既没有优势技术,也缺乏配套机制政策,但在产业界存在稳定运行的

表1 能源互联网6类基本形态及典型实例

名称	技术可行性	机制完善性	模式成熟度	典型实例	状态转换实例
模式探索型	强	好	低	可再生能源增量配网建设与隔墙售电	电动汽车与V2G
政策引导型	弱	好	低	光伏、风电、储能、氢能	—
技术研发型	弱	好	高	钙钛矿光伏电池、固态动力电池	氢燃料电池汽车
模式成熟型	弱	差	高	工业绿色氢能替代	—
政策缺位型	强	差	高	LNG冷能利用、油田可再生能源利用	副产氢、虚拟电厂
技术优势型	强	差	低	直流用电、压缩空气储能	—

注: V2G表示车网互动技术; LNG表示液化天然气。

应用模式；发展到理想形态，本质上是技术替代过程（与技术研发型相似），但这个过程没有配套政策支持，通常不会获得良好的发展空间。当前，发展势头逐渐明朗的工业绿氢替代项目是这一形态的典型代表，我国民营企业、大型国有企业都在该领域进行业务布局。

5. 政策缺位型

政策缺位型形态是技术可行性强、政策机制完善性差的组合，而商业模式的成熟度较高。其中，能源技术、运行模式相对成熟，但是在政策机制不完备的情况下相关能源转型只能缓慢推进，表现在技术信息传播速度、企业引进新技术和初期投入等决策均缓慢；如果政策完善性良好，则技术信息传播提速并可缓解企业管理者的决策顾虑。当前，我国石油工业正在将可再生能源发电与油气生产相结合，处于这一形态中。

6. 技术优势型

技术优势型形态是技术可行性强、政策机制完善性差的组合，而商业模式的成熟度较低。该形态中技术具有相对优势，而支撑未来能源转型的相关技术可能面临推广困境。由于市场、政策均缺位，该形态不利于新兴技术发展。例如，压缩空气储能技术在储能市场应用前景相对不明朗，处于政策支持较为有限的阶段，导致落地项目数量较少。

（二）能源互联网产业发展形态实践及案例

1. 模式探索型

模式探索型指在技术成熟、政策明确的市场中寻找适合产业发展的稳定形态。当前，以光伏发电、风电等可再生能源为主的电源项目全面铺开建设，在技术更为成熟的同时，发电成本逐步接近火电。这些项目的技术可行性良好，也得到各级管理部门的配套政策支持，但该形态中的成熟技术、完善政策并不能保证市场繁荣。

《有序放开配电网业务管理办法》（2016年）鼓励社会资本投资、建设、运营增量配网，为用户提供安全、方便、快捷的供电服务。《关于制定地方电网和增量配电网配电价格的指导意见》（2017年）为各省份制定增量配网配电价格机制提供了指导原则。《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》（2021年）鼓励包括社会资本在内的各类主体投资增量配网项目，建设“源网荷储”

一体化的绿色供电园区。近10个省份发布了地方性政策，鼓励在工业负荷大、新能源条件好的地区结合增量配网开展“源网荷储”一体化的绿色供电园区建设。尽管如此，实际情况却是多地项目运行困难，部分已难以为继。例如，作为国家首批增量配电业务改革试点之一的郑州航空港经济综合实验区增量配电项目，或将由电网公司并购并被取消增量配电网试点。“隔墙售电”亦有类似情况。实地调研发现，可再生能源发电项目附近的用能企业并不能直接从建设项目方获得绿色电力，即使用能企业能够调节不稳定的可再生能源电力，也不可购买“隔壁的电力”。

增量配网、“隔墙售电”都是电力体制改革的先行试验，不太理想的试点效果意味着电力体制改革仍面临困难。市场模式不畅通说明运行环节中存在阻滞，原因涉及改革遗留问题、电价问题、权益归属问题、经济收益问题等多个方面，究其实质是各方利益不易平衡。各方立场因其组织诉求和责任不同而具有差异性，新技术和新政策催生的新模式只是打破了既有的常规模式，但不能延续原有利益分配。良好的技术、完善的政策未能搭配可落地的模式，将使投资方无法获得预期效益，而既得利益方不愿放弃原有收益。

2. 政策引导型

政策引导型形态的技术和模式要素不强，但良好的政策能够激励产业技术创新、培育产业链条，使产品性能不断提高、新兴市场得以建立，也逐步形成良性的供需对接和产业形势。该形态通常紧扣国家战略需求，如“双碳”目标提出后能源革命行动中的实例较多。我国光伏发电、风电产业发展过程具有鲜明的政策引导型特征。

然而，产业政策也有风险甚至可能失效，导致产业未曾充分发展就开始衰退。当前，储能、氢能等产业发展正处于政策引导型阶段，各层级政策发布较多，但受限于产业技术不够先进、部分技术瓶颈未能突破、产业链不健全、较高的综合成本，正常的商业循环难以建立，商业模式不够稳定和成熟。未来，储能、氢能产业能否“复现”光伏发电、风电产业的成长历程，仍有待实践检验。

3. 技术研发型

技术研发型形态是可在现有政策机制和商业模式基础上，通过技术升级推动产业发展的组合，以

新能源行业中的钙钛矿电池技术及相关产业链为代表。光伏产业的发展模式相对健全，政策体系及配套机制较为完善，企业均在积极研发新一代光伏电池技术，以钙钛矿电池技术为重点突破方向。这是因为晶硅电池的发电效率即将接近理论值，面临着性能提升“天花板”。技术路线选择的科学性将决定企业发展成效，相关案例不胜枚举。

目前，我国动力电池产业处于技术研发型阶段。液态电解质电池经历了从镍氢电池到锂电池的跨越，能量密度大幅提升；随着能量密度的提升，电池安全问题凸显，在一定程度上制约了动力电池产业发展。企业着力从安全材料替代方向出发，筛选新的技术方案：研发钠电池，采用金属钠替换锂，同步解决材料成本和安全风险问题；研发固态电解质，从根本上解决液态电解质不稳定而易引发火灾的问题。随着技术的发展，未来可能出现钠离子固态电池，将具有更好的成本和安全优势。研发先进动力电池技术，实现大容量可再生能源的安全存储，解决风电、光伏发电的波动性问题，从底层驱动电池、储能、新能源等产业发展。

4. 模式成熟型

模式成熟型形态存在于传统产业的能源转型过程中，实现难度与政策引导型持平甚至更高，这是因为应用模式对产业发展具有“双向”效应。稳定的应用模式是产业新形态建立的原生环境、产业成熟的标志，赋予既有形态维持运行的稳定性，也会成为新模式发展的阻力。在政策机制缺位、新技术难以突破的情况下，该形态可能是最难突破的发展类型。

工业领域中的绿色氢气替代是模式成熟型的典型案例。氢气是重要的工业原料，但氢气的传统生产方式能耗高、污染大；在可再生能源快速发展的现阶段，使用富余的绿色电力生产绿氢是最有前景的方式。然而，质子交换膜、高温固体氧化物电解制氢的设备、材料和器件等技术成熟度不高，而成熟的碱性电解制氢方式又受到绿电来源和成本限制，制约绿氢生产和应用规模，导致稳定运行的工业企业中绿氢很难替代现有的制/用氢体系。

对于微观层面的企业运行决策，管理部门制定的政策较难有针对性；在没有考核监管压力、产品市场限制的情况下，企业没有动力改变已经稳定运行的低成本模式。随着“双碳”目标在各领域的逐

步细化，才会触动原有发展方式进行调整，打破维持原状的倾向。

5. 政策缺位型

政策缺位型形态具备良好的能源转型条件，可在成熟模式、可行技术的支持下为企业和产业带来有效的投资回报。一些新技术在节约能源、提高能效方面具有优势，但收益不显著，往往被效益较好的企业所忽视。适宜的政策机制将激励企业应用新技术，进而推动产业发展并加速能源转型。

LNG冷能利用是政策缺位型形态的典型实例。LNG含有大量冷能，而LNG接收企业在LNG气化过程中将其随意释放，还要耗费一定的技术装置来加速释放（以免耽误天然气输送），冷能利用与否不影响企业的正常发展。尽管LNG冷能利用的业务模式、技术设备可以达到工业化运行要求，也能为LNG接收企业带来一定的经济收益，但是相关企业往往更注重核心业务的稳定和安全，无暇顾及LNG冷能利用。因此，LNG冷能利用等能源增值业务发展速度较慢，只有在LNG市场波动较大、核心利润降低、需要额外收益、政策激励和约束出现时，相关企业才有积极性来内部挖潜和深度开发。此外，现实中较多的能效提升、余热余压利用、能源梯次利用等技术，都处于政策缺位型发展阶段。

6. 技术优势型

在技术优势型形态中，技术发展水平较好，而与之适配的商业模式缺乏，政策机制方面也没有明确的支持和引导。新兴技术成本相对高，尽管可能具备规模化应用来降低成本的条件，但因商业模式不成熟而少有机会展示其技术经济性。积极开展试点示范是该形态应用转变的开端。

在能源转型过程中，技术优势型形态代表着具有更高效率的先进技术应用，以直流用电为典型实例。在早期的电力传输方式选择中，直流用电因其技术缺陷让位于交流电，后续的电力“发输配用”体系以交流电为基础。当前，直流用电技术进展显著，在性能、运行损耗等关键指标上已优于交流电；伴随更多可再生能源的直流电源接入，加之大量的电器设备实际以直流电运行，在电力输配网络建设中使用直流技术更有优势。然而，真正使用直流输配电系统需要现有以交流电为基础的电力系统支付一定的转换成本，加之政策机制层面没有为推广直流输配电设计相应的制度，导致产业实践中仅

有一定数量的柔性直流示范工程，没有大规模产业应用。

压缩空气储能技术是技术优势型形态的另一个案例。在电力储能系统模式依靠传统抽水蓄能即可维持运转的情况下，尽管从理论到实验都证明压缩空气储能具有实用能力，但落地工程仍较少。在大规模建设可再生能源的背景下，实现“双碳”目标需要充分消纳和储存绿色电力，压缩空气储能技术才得以开展试点示范。从示范工程效果看，相关项目进展顺利，达到预期发展成效。

四、我国能源互联网产业发展路径分析

（一）能源互联网产业路径分析方法

在能源互联网产业形态中，技术、机制、模式层面的影响交织且互相驱动。在实际发展过程中，通常在1个或2个层面上先行试验突破，再在剩余层面上逐步完善。能源互联网行业的绝大部分发展状态可由6个形态来表征，这些状态并非绝对固定，彼此之间存在相互转化的可能性。在“吊钟”模型里，单要素调整区中的3个形态为偏强组合（2个要素指标强、1个要素指标弱）；双要素调整区中的3个形态为偏弱组合（1项要素指标强、2项要素指标弱）。产业形态从偏弱组合向偏强组合转换，称为正向转换，意味着有1个方向的建设内容得到加强，表现为产业发展升级；反之为负向转换，意味着至少1个方向的建设强度减弱，表现为产业发展衰退。分析产业发展路径重在评价关键时点上的产业形态。应用“吊钟”模型分析我国能源互联网产业发展路径，需要着重关注评价方法、评价作用、评价的动态性特点。

一是确定评价方法，即明确采用的是定性而非定量的评价方法。应用“吊钟”模型对技术、机制、模式等要素进行评价，考虑的是同类要素之间的相对值（而非绝对值），这是因为技术可行性、政策完备性、模式成熟度都是无法采用绝对数值进行量化的变量。没有可行性最高的技术、完备性最高的政策、成熟度最高的模式，只有在对比方式下评价技术是否可行、政策是否完善、模式是否成熟；模型分析使用的是相对值，量化数据指标并无实际作用。

二是确定评价作用。区分和界定不同产业形态

并进行评价，意义在于从对比中发现产业发展的改进重点。在微观层面开展精度更高的量化评价，对产业发展的总体态势研判无益。从中观层面出发，准确判断产业发展的形态及进程，明确能源转型过程的着力点和主要方向，再进行有针对性调整，将高效促进产业发展。因此，各个产业形态都是相对评价，并不是按照具体指标的绝对排序。例如，技术可行性评价是针对技术应用和历史状态的对比，不以产品市场占有率、投资回报率等绝对指标来确定。

三是评价的动态性特点。对产业形态采用相对强度评价，也是针对具体技术和产品细分领域的评价，因而某个组合形态可能在同一产业的发展过程中出现多次（但其中要素的相对强度不同）。每个产业形态不是固定的，也不是单向不可逆的，只要技术、机制、模式3个方向的相对强度发生改变，产业形态就可能随之变化。将同一能源互联网产业中的不同形态按照时序排列，就能展示出产业在发展路径上的动态过程。

（二）能源互联网产业发展路径分析实例

能源互联网产业的顺利发展将是一系列产业形态的正向转换过程。为了识别出推动能源转型的有效方式，需要对关键时点的能源互联网产业形态进行连续分析。

1. 可再生能源产业

在早期，我国光伏发电、风电产业技术实力基础较薄弱，商业模式也不成熟。得益于政策的持续推动，相关产业不断形成多个形态的正向转换：光伏发电、风电产业均起步于政策引导型；随着技术进步，产业进入技术可行性强、模式成熟度低的组合形态，将通过模式探索型路径向理想状态发展；在新技术进入市场后，运用该技术的细分产业即处于技术可行性弱、模式成熟度高的产业组合形态，将通过技术研发型路径向理想状态发展。

我国光伏发电、风电产业发展都实践了上述2条路径，即从政策引导型（双要素调整区）开始，经过模式探索型、技术研发型2个单要素调整形态的转换后，实现了产业显著发展。路径一是模式探索型，起始于政策支持和财政补贴，在技术研发成本降低后，关键组件和整机企业发展动力较强，积极扩大生产规模使产品成本快速下降；在全国建设

了众多的光伏发电、风电基地，在此过程中商业模式趋于成熟。路径二是技术研发型，光伏技术不断升级，实现从多晶硅向单晶硅、从铝背场电池技术向 PERC 技术的转换；依托已探索形成的商业模式，补强技术要素，推动从技术研发型路径向产业理想状态前进。

2. 电动汽车产业

我国电动汽车产业也经历了与可再生能源产业相似的发展路径。同样是政策引导先行，电动汽车面临较燃油汽车更为宽松的行车限制，获得较大力度的购买补贴，吸引了大批意愿用户，为电动汽车企业提供了资金和市场支持。随着动力电池性能的不不断提升，电动汽车在关键技术指标上接近甚至超越燃油汽车。电动汽车市场规模逐步壮大，在大量用户和企业的参与中逐步完善配套环境和业务规程，探索出与当前充电技术相适应的市场模式。可以看出，电动汽车产业走出了从政策引导型向模式探索型转换的发展路径。

V2G 作为新一代支撑车网互动的电动汽车充电技术，将推动电动汽车产业从技术研发型向产业理想状态前进。V2G 用于电动汽车反向电网送电，涉及电动汽车用户、电网之间的契约和服务，关系较为复杂。只有在电动汽车市场成熟的情况下，V2G 才能在稳定商业模式支持下进行持续研发和升级，最终演进至市场和技术的最佳结合点。

3. 氢能产业

我国氢能产业未来能否走出类似可再生能源、电动汽车产业的发展路径，还存在不确定性。近年来，各级管理部门发布了有关氢能和氢燃料电池汽车的鼓励政策（包括资金补贴规定），氢能产业发展的政策环境大为改善。虽然氢燃料电池汽车的商业模式尚未成熟，但可以依靠改造现有液体燃料销售体系来规模化地补充氢能，同时确保市场各方的利益关系、运行方式等基本不变。可以认为，氢燃料电池汽车产业正处于从模式成熟型向技术研发型转换的过程。需要指出的是，氢燃料电池汽车的技术进展并不顺利，技术可行性仍不强，未来实现技术突破是行业规模化发展的决定性因素。

当前，我国副产氢行业处于从技术优势型向政策缺位型转换的起步阶段。副产氢是炼焦、氯碱、炼化等行业主生产流程的副产品，技术环节不存在瓶颈，仅需改进收集与提纯等辅助技术，即可支持

副产氢用作氢能产业原料。副产氢行业获得的政策支持力度相比可再生能源产业明显薄弱，也没有建立较为完善的氢能市场，用氢企业仍遵循原有市场运行方式，在客观上限制了副产氢的商业模式探索。可以预见，在较强的需求拉动效应下，副产氢作为新兴供给端必然冲击现有市场，改变原有的需求匹配、平衡调节、价格形成等运行方式。新的市场模式将在市场运行中逐步构建，朝着更好适应副产氢的方向转变，最终副产氢行业完成从技术优势型向政策缺位型的转变。

五、我国能源互联网产业发展路径建议

能源互联网产业发展需要技术、机制、模式层面要素从负方向往正方向转化，即完成短板补强的过程。在分析 6 种能源互联网产业形态演化过程的基础上，按照由易至难的顺序列出产业补短板发展路径。

（一）技术补强方式

在 6 个能源互联网产业形态中，政策引导型、技术研发型、模式成熟型 3 个形态都需要进行技术补强。鉴于产业发展的复杂性，单纯在先进指标上推动技术革新，未必一定能获得预期效果，这是因为工程应用和产业发展相比实验室研究涉及更多不可控且未知的变量。

政策引导型的技术补强实现难度最小。尽管技术攻关也有一定的难度，但只要完成技术攻关，在该形态下更容易获得实践成功。政策支持力度大、范围广，受到政策覆盖的技术都能得到支持；市场上没有成熟模式的限制，可以创造符合技术需求的运行模式。

技术研发型的技术补强实现难度明显增大。原有的成熟商业模式限定了新技术的应用空间，需要政策机制层面的支持才可能突破。以电动汽车行业为例，在 21 世纪初期动力电池企业即获得造车资质，试图将动力电池技术优势拓展至电动汽车整车生产，然而当时的动力电池技术不满足汽车续航要求；在动力电池技术发展支持汽车续航超过 100 km 后，管理部门发布了支持充电桩安装、购车补贴、路权开放等政策，随后电动汽车使用量才稳步增长。

模式成熟型的技术补强实现难度最大。若新技术的出现是对旧技术的替代，则符合旧技术运行的强大商业模式惯性、政策缺位等明显不利于新技术应用。例如，电动汽车在发展初期续航里程短、充电设施少，难以与拥有庞大数量加油站的传统汽车能源补充模式竞争；即使以自建、共建、融资等方式建设充电设施，也因相关政策、标准缺失而发展迟缓。

形成技术补强方式的发展路径建议是：①关于企业，在有明确政策倾向的新兴市场上，全力投入技术研发、尽快扩大市场份额、着力创新商业模式，据此稳固市场地位；在政策不明确的既有市场上，需要考虑商业模式对技术限定的空间，通过技术升级而不是技术替代来实现发展；②关于政策制定者，为有技术发展前景的新兴市场设计配套政策，其效果优于为既有市场设计配套政策。

（二）机制补强方式

政策缺位型、技术优势型、模式成熟型需要进行机制补强。从技术研发的视角看，机制补强相对容易，这是因为政策制定和发布的显性成本不高。然而，机制补强的实施难度并不亚于技术补强，若政策调整的方向和尺度把握不当，可能造成产业发展的重大失误并带来极高成本。

对于政策缺位型而言，机制补强的实现难度最小。在技术解决方案、商业模式均齐备的市场上，只要政策适时跟进并给予明确支持，产业界会迅速作出积极反馈，从而促进产业发展。然而，不当甚至错误的政策机制也会得到消极反馈，导致产业发展减速。

对于技术优势型而言，政策补强可能起到推动产业发展的效果，也可能不产生预期效果，这取决于市场能否为相对较强的技术适配到商业模式。以直流用电为例，尽管各项技术指标更优，但面对交流用电模式成熟且稳固的市场，发展空间拓展难度大，这是因为从交流用电转换到直流用电面临较高的转换成本。如果由政策强行推动，将形成使用直流系统的区域“电力孤岛”，内外的设备不兼容，使用及维护成本高。强行维持高成本的系统，将造成违背市场规律的不良局面，不利于产业发展，也不是政策“初衷”。

对于模式成熟型形态而言，政策补强的难度最

大。技术成熟度不高、商业模式成熟的组合，即使填补政策空白也较难产生良好效果，这是因为政策合理性、技术突破结果、新旧模式冲突等方面存在不确定性。如果最终技术突破不足以颠覆现有商业模式，政策实施相关投入趋向作废。政策制定者通常期望产业发展到政策缺位型形态阶段再给予必要的政策支持，如《加快油气勘探开发与新能源融合发展行动方案（2023—2025年）》（2023年）便属此类。新能源技术较为成熟，油气田开发中的电能利用模式成熟且处于可受油气田开发者控制的状态，因而新能源技术的推行阻力较小；新能源技术在政策引导下推广应用，加之商业模式调整成本较低，带来了较好的工程应用效果。当前，大型油气企业积极建设可再生能源项目以支持油气生产，说明该政策获得良好成效。

形成机制补强方式的发展路径建议是：①关于企业，当掌握较好创新技术时，应尽量避免已有成熟模式的市场，转而进入无既定模式且有政策支持的市场。②关于政策制定者，在技术突破性不强、市场模式稳固的情况下，应慎重实施有悖于既有模式的政策，转而采用政策机制推广成熟技术、升级模式稳定的市场。

（三）模式补强方式

模式探索型、政策引导型、技术优势型都需要进行模式补强，但难以给出实现难易的排序；相比技术补强、机制补强，模式补强的实施难度最高，缺少执行主体是主要原因。技术突破的主体是技术提供商，政策制定的主体是相关管理部门，而市场模式的主体是受技术、政策和模式影响的众多市场参与者。商业运行、市场环境等应用模式不存在具体的执行机构，无法直接调控商业运行模式。商业模式可以设计，但不能像技术和政策一样进行相对精确的控制，因而改变商业模式的结果最难预测。从政策层面出发推广的商业模式，若设计不当会造成明显的资源浪费，如较多可再生能源增量配网项目实际上处于停摆状态。

商业模式是多方互动、长期博弈形成的潜在运行规则，涵盖惯例、规范、标准等影响产业运行的非技术性和非政策性内容。市场中的单位可能既是现有模式的运行者，也是新模式的制定者，当前的行动会影响后续的模式演变，因而商业模式固化是

长期市场选择的结果。以电动汽车市场为例, 各种商业模式虽然博弈多年, 但仍处于各自独立发展状态: 换电模式、快充模式在多场景下继续“试错”, 纯电模式、混动模式、增程模式的优势仍在比较优劣, 市场上没有形成最终的选择。可见, 成功的模式补强需要经历市场遴选。

形成模式补强方式的发展路径建议是: ① 关于企业, 模式要素的强弱是针对技术而言的, 需要根据自身技术特长选择对应模式空白的市场进入, 进而建立匹配自身技术特长的专属模式; 如果既有市场模式稳固, 技术创新程度又不足以将其颠覆, 则对现有模式中的技术进行优化以渗透市场是更佳选择。② 关于政策制定者, 宜适度灵活, 允许企业参与市场试错和博弈, 避免以政策机制强制推行新市场模式, 减少潜在损失; 积极发现颠覆性新技术, 在模式空白市场上为其制定政策机制, 精准推动新兴产业发展。

六、结语

能源互联网产业涉及范围广、分支领域众多, 涵盖符合能源革命方向、匹配“双碳”目标的一系列技术, 不仅表现为技术层面取得诸多突破, 而且与市场、政策紧密结合并融合发展。本文建立了能源互联网产业发展形态分析模型, 梳理出技术、机制、模式 3 个层面组合而成的 6 个有效形态, 覆盖了能源互联网细分技术产业落地阶段的各种形态, 采用相关形态之间的转换过程来表征我国能源互联网产业的当前和未来发展。各个形态都是相对稳定态, 打破稳定需要对该形态中的技术、机制、模式层面之一或组合进行补强/削弱: 前者意味着产业向上发展并走出扩张路径, 后者意味着产业衰退或被市场淘汰。

在分析我国能源互联网产业发展路径的基础上, 可采取针对性行动推动相关工程应用建设、提升产业发展水平。① 对处于技术补强形态的细分产业, 宜实行加强技术攻关、加大研发投入、建设试点示范工程等举措, 加快培育技术的孵化进度, 推动技术尽快成熟。② 对处于机制补强形态的细分产业, 宜甄别施策对象所处的组合形态, 规避低效甚至无效的政策, 避免投入资源浪费; 对于形态尚不清晰的情况, 可以等待市场选择结果; 对于技术和

模式明确、政策薄弱的情况, 宜及时给予政策支持, 加速工程应用落地。③ 对处于模式补强形态的细分产业, 宜审慎开展工程建设, 转而依据现有商业模式推演新技术应用后的市场反应, 在充分论证后再作发展决策。

利益冲突声明

本文作者在此声明彼此之间不存在任何利益冲突或财务冲突。

Received date: October 7, 2023; **Revised date:** March 30, 2024

Corresponding author: Zhang Xuan is an associate research fellow from the Department of Electrical Engineering, Tsinghua University. Her major research field is energy and climate change policy. E-mail: zhangxuan02@tsinghua.edu.cn

Funding project: National Natural Science Found Project (72273138)

参考文献

- [1] 王宏泽. 习近平在第七十五届联合国大会一般性辩论上发表重要讲话 [N]. 光明日报, 2020-09-23 (01).
Wang H Z. Xi Jinping delivers an important speech at the general debate of the 75th session of the United Nations General Assembly [N]. Guangming Daily, 2020-09-23 (01).
- [2] 新华网. 习近平就推动能源生产和消费革命提 5 点要求 [EB/OL]. (2014-06-13)[2023-07-10]. <https://www.chinanews.com.cn/gn/2014/06-13/6279475.shtml>.
Xinhua Net. Xi Jinping puts forward 5 points on promoting energy production and consumption revolution [EB/OL]. (2014-06-13)[2023-07-10]. <https://www.chinanews.com.cn/gn/2014/06-13/6279475.shtml>.
- [3] 《能源互联网助推中国能源转型与体制创新》编写组. 能源互联网助推中国能源转型与体制创新 [M]. 北京: 中国发展出版社, 2017.
Energy Internet Boosts Energy Transformation and Institutional Innovation in China Research Group. Energy Internet boosts energy transformation and institutional innovation in China [M]. Beijing: China Development Press, 2017.
- [4] 能源互联网研究课题组. 能源互联网发展研究 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2017.
Energy Internet Research Group. Research on the development of energy Internet [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2017.
- [5] 清华大学能源互联网创新研究院, 国家能源互联网产业及技术创新联盟. 2023 年国家能源互联网发展年度报告 [R]. 北京: 清华大学能源互联网创新研究院, 2023.
Energy Internet Research Institute of Tsinghua University, China Energy Internet Alliance. 2023 annual report on the development of national energy Internet 2023 [R]. Beijing: Energy Internet Research Institute of Tsinghua University, 2023.
- [6] 杰里米·里夫金. 第三次工业革命: 新经济模式如何改变世界 [M]. 北京: 中信出版社, 2012.
Rifkin J. The third industrial revolution: How lateral power is transforming energy, the economy, and the world [M]. Beijing: CITIC Press, 2012.

- [7] 刘振亚. 全球能源互联网 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2015.
Liu Z Y. Global energy Internet [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2015.
- [8] 张靖, 高峰, 徐双庆, 等. 能源互联网技术架构与实例分析 [J]. 中国电力, 2018, 51(8): 24-30.
Zhang J, Gao F, Xu S Q, et al. Energy Internet technological architecture and case analysis [J]. Electric Power, 2018, 51(8): 24-30.
- [9] 孙宏斌, 郭庆来, 潘昭光. 能源互联网: 理念、架构与前沿展望 [J]. 电力系统自动化, 2015, 39(19): 1-8.
Sun H B, Guo Q L, Pan Z G. Energy Internet: Concept, architecture and frontier outlook [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(19): 1-8.
- [10] 赵海, 蔡巍, 王进法, 等. 能源互联网架构设计与拓扑模型 [J]. 电工技术学报, 2015, 30(11): 30-36.
Zhao H, Cai W, Wang J F, et al. An architecture design and topological model of inter grid [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(11): 30-36.
- [11] 查亚兵, 张涛, 黄卓, 等. 能源互联网关键技术分析 [J]. 中国科学: 信息科学, 2014, 44(6): 702-713.
Zha Y B, Zhang T, Huang Z, et al. Analysis of energy Internet key technologies [J]. SCIENTIA SINICA Informationis, 2014, 44(6): 702-713.
- [12] 田世明, 栾文鹏, 张东霞, 等. 能源互联网技术形态与关键技术 [J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(14): 3482-3494.
Tian S M, Luan W P, Zhang D X, et al. Technical forms and key technologies on energy Internet [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14): 3482-3494.
- [13] 曹军威, 杨明博, 张德华, 等. 能源互联网——信息与能源的基础设施一体化 [J]. 南方电网技术, 2014, 8(4): 1-10.
Cao J W, Yang M B, Zhang D H, et al. Energy Internet: An infrastructure for cyber-energy integration [J]. Southern Power System Technology, 2014, 8(4): 1-10.
- [14] 于慎航, 孙莹, 牛晓娜, 等. 基于分布式可再生能源发电的能源互联网系统 [J]. 电力自动化设备, 2010, 30(5): 104-108.
Yu S H, Sun Y, Niu X N, et al. Energy Internet system based on distributed renewable energy generation [J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(5): 104-108.
- [15] 慈松, 李宏伟, 陈鑫, 等. 能源互联网重要基础支撑: 分布式储能技术的探索与实践 [J]. 中国科学: 信息科学, 2014, 44(6): 762-773.
Ci S, Li H J, Chen X, et al. The cornerstone of energy Internet: Research and practice of distributed energy storage technology [J]. SCIENTIA SINICA Informationis, 2014, 44(6): 762-773.
- [16] 蒲天骄, 陈盛, 赵琦, 等. 能源互联网数字孪生系统框架设计及应用展望 [J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(6): 2012-2029
Pu T J, Chen S, Zhao Q, et al. Framework design and application prospect for digital twins system of energy Internet [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(6): 2012-2029
- [17] 王一振, 赵彪, 袁志昌, 等. 柔性直流技术在能源互联网中的应用探讨 [J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(14): 3551-3560.
Wang Y Z, Zhao B, Yuan Z C, et al. Study of the application of VSC-based DC technology in energy Internet [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14): 3551-3560.
- [18] 张向宏, 苏禹. 能源互联网及其安全防护体系建设研究 [J]. 微型机与应用, 2015, 34(9): 5-11, 14.
Zhang X H, Su Y. Research on energy Internet and its security protection system construction [J]. Microcomputer & Its Applications, 2015, 34(9): 5-11, 14.
- [19] 高峰. 能源互联网思考与探索 [J]. 电器工业, 2015 (11): 53-55.
Gao F. Thinking and exploration of energy Internet [J]. China Electrical Equipment Industry, 2015 (11): 53-55.
- [20] 霍沫霖, 郭磊, 张哲. 区域能源互联网的发展现状与政策建议 [J]. 中国电力, 2020, 53(12): 241-247.
Huo M L, Guo L, Zhang Z. Development status and policy suggestions of regional energy integration [J]. Electric Power, 2020, 53(12): 241-247.
- [21] 黄仁乐, 蒲天骄, 刘克文, 等. 城市能源互联网功能体系及应用方案设计 [J]. 电力系统自动化, 2015, 39(9): 26-33, 40.
Huang R L, Pu T J, Liu K W, et al. Design of hierarchy and functions of regional energy Internet and its demonstration applications [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(9): 26-33, 40.
- [22] 康重庆, 王毅, 张靖, 等. 国家能源互联网发展指标体系与态势分析 [J]. 电信科学, 2019, 35(6): 2-14.
Kang C Q, Wang Y, Zhang J, et al. Development of national energy Internet: Index system and future trend [J]. Telecommunications Science, 2019, 35(6): 2-14.
- [23] 来小康, 王松岑. 能源互联网背景下的储能技术及产业发展 [J]. 高科技与产业化, 2016 (4): 28-31.
Lai X K, Wang S C. Energy storage technology and industrial development in the context of energy Internet [J]. High-Technology & Industrialization, 2016 (4): 28-31.
- [24] 宫敬, 殷雄, 李维嘉, 等. 能源互联网中的天然气管网作用及其运行模式探讨 [J]. 油气储运, 2022, 41(6): 702-711.
Gong J, Yin X, Li W J, et al. Exploration on the function and operation mode of natural gas pipeline networks in energy Internet [J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2022, 41(6): 702-711.
- [25] 陈军伟. 能源互联网背景下热电企业的产业互联大生态系统研究 [J]. 企业改革与管理, 2020 (2): 65-66.
Chen J W. Research on industrial interconnection ecosystem of thermoelectric enterprises under the background of energy Internet [J]. Enterprise Reform and Management, 2020 (2): 65-66.
- [26] 孙爽. 能源互联网背景下中国电力行业节能减排路径研究 [D]. 北京: 华北电力大学(硕士学位论文), 2016.
Sun S. Research on energy-conservation and emissions-reduction route of China's power industry under the background of the energy Internet [D]. Beijing: North China Electric Power University (Master's thesis), 2016.
- [27] 陈娟, 鲁斌, 冯宇博, 等. 共享理念下的区域能源互联网生态系统价值共创模式与机制 [J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(22): 8103-8106.
Chen J, Lu B, Feng Y B, et al. Value co-production model and mechanism of regional energy Internet ecosystem under the concept of sharing [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(22): 8103-8106.
- [28] 吴彬. S公司能源互联网业务竞争战略研究 [D]. 南京: 南京大学(硕士学位论文), 2017.
Wu B. Research on competitive strategy of S company's energy Internet business [D]. Nanjing: Nanjing University (Master's thesis), 2017.
- [29] 潘煜斌. T市政府干预对能源互联网企业绩效的影响及对策研

- 究 [D]. 镇江: 江苏大学(硕士学位论文), 2022.
- Pan Y B. Research on the Impact of T City government intervention on the performance of energy Internet enterprises [D]. Zhenjiang: Jiangsu University (Master's thesis), 2022.
- [30] 钱文奇. 基于能源互联网的多种能源服务商业模式研究 [D]. 北京: 华北电力大学(硕士学位论文), 2021.
- Qian W Q. Research on business model of multiple energy services based on energy Internet [D]. Beijing: North China Electric Power University (Master's thesis), 2021.
- [31] 冯瑞虞, 刘颖琦. 碳中和视域下的能源互联网产业商业模式创新研究 [J]. 科学决策, 2021 (11): 104–117.
- Feng R Y, Liu Y Q. Research on business model innovation of energy Internet industry from the perspective of carbon neutrality [J]. Scientific Decision Making, 2021 (11): 104–117.
- [32] 陈彦博. 广州能源互联网新业态培育研究 [J]. 纳税, 2017 (33): 107–108.
- Chen Y B. Research on the cultivation of new energy Internet format in Guangzhou [J]. Tax Paying, 2017 (33): 107–108.
- [33] 刘晓东, 王璇. 能源互联网技术产业链融合创新机制与对策研究 [J]. 电力电容器与无功补偿, 2021, 42(6): 260–267.
- Liu X D, Wang X. Study on fusion innovation mechanism and countermeasure of industry chain of energy Internet technology [J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2021, 42(6): 260–267.
- [34] 李福平. 能源互联网建设中的政府管理研究——以银川市为例 [D]. 银川: 宁夏大学(硕士学位论文), 2022.
- Li F P. A study of government management in the construction of the energy Internet [D]. Yinchuan: Ningxia University (Master's thesis), 2022.
- [35] 杜祥琬. 对我国实现碳达峰碳中和战略及路径的思考 [R]. 北京: 中国工程院, 2023.
- Du X W. Thinking of China's strategy and path of peak carbon dioxide emissions and carbon neutrality [R]. Beijing: Chinese Academy of Engineering, 2023.