

DOI:10.3969/j.issn.2097-0706.2026.03.007

数据飞轮驱动下的零碳园区建设路径研究

Research on construction pathways for zero-carbon parks driven by data flywheel

夏小平¹, 尧德华¹, 宋总涛¹, 汪悦越¹, 谭一帆^{2,3}, 方亦茗^{2,3}, 张军^{2,3*}
XIA Xiaoping¹, YAO Dehua¹, SONG Zongtao¹, WANG Yueyue¹,
TAN Yifan^{2,3}, FANG Yiming^{2,3}, ZHANG Jun^{2,3*}

(1.南方电网综合能源股份有限公司,广州 510663; 2.广东省科技图书馆(广东省科学院信息研究所),广州 510070; 3.粤港澳大湾区战略研究院,广州 510070)

(1.China Southern Power Grid Integrated Energy Company Limited, Guangzhou 510663, China; 2.Science and Technology Library of Guangdong Province (Information Research Institute of Guangdong Academy of Sciences), Guangzhou 510070, China; 3.Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area Strategic Research Institute, Guangzhou 510070, China)

摘要:零碳园区作为实现“双碳”战略目标的关键载体,其核心在于通过构建综合能源系统实现能源高效利用。激活零碳园区的数据飞轮,有利于驱动园区综合能源系统实现高效协同与持续优化,破解当前综合能源系统“重建设、轻运营”及“源-网-荷-储”链条割裂等发展痛点。基于数据飞轮理论,结合典型零碳园区建设案例,探讨了数据飞轮驱动下零碳园区的建设路径。提出综合能源系统、用能场景与碳资产管理为三大零碳园区核心组成部分;引入数据飞轮理论作为分析视角,剖析三大组成部分间的协同机制与数据流转逻辑;通过量化对比分析厦门 ABB 工业中心、深圳虚拟电厂管理中心和博鳌东屿岛零碳示范区等案例,验证本文所提对策的可行性,并推演数据飞轮驱动下零碳园区的建设路径。能源系统与用能场景的时空错位、能源系统与碳资产之间的资产错链、用能场景与碳资产管理之间的资源错配共同构成了零碳园区发展的三大核心瓶颈。激活“获取—存储—进入—加速—适应”五阶段数据飞轮,能够为综合能源系统注入持续优化的核心动能,进而转化为系统运行的自我优化能力、整体效率的跃升效应及价值创造的内生动力。启示应构建统一数据标准、建设园区级数据中台和平台运营商、探索能源数据要素市场化配置路径,设计数据驱动的业务闭环以赋能零碳园区建设。

关键词:零碳园区;综合能源;数据飞轮;碳资产管理;用能场景;源-网-荷-储

中图分类号:TK 01*8;F 426.61

文献标志码:A

文章编号:2097-0706(2026)03-0065-11

Abstract: Zero-carbon parks serve as key carriers for achieving the "dual-carbon" goals. The core of such parks lies in realizing efficient energy utilization through the construction of integrated energy systems. Activating the data flywheel in zero-carbon parks helps drive efficient coordination and continuous optimization of park-level integrated energy systems, thereby addressing current development challenges such as "overemphasis on construction and neglect of operation" and the fragmented "source-grid-load-storage" chain. Based on the data flywheel theory and typical zero-carbon park construction cases, construction pathways for zero-carbon parks driven by the data flywheel were explored. The integrated energy system, energy consumption scenarios, and carbon asset management were proposed as the three core components of zero-carbon parks. The data flywheel theory was introduced as an analytical perspective to examine the synergistic mechanisms and data flow logic among these three components. The feasibility of the proposed strategies was verified through quantitative comparative analysis of cases such as Xiamen ABB Industrial Center, Shenzhen Virtual Power Plant Management Center, and Bo'ao Dongyu Island Zero-Carbon Demonstration Zone. Furthermore, the construction pathways for zero-carbon parks driven by the data flywheel were deduced. The spatiotemporal misalignment between the energy system and energy consumption scenarios, the asset mismatch between the energy system and carbon assets, and the resource misallocation between energy consumption scenarios and carbon asset management together constituted the three core bottlenecks in the development of zero-carbon parks.

Activating the five-stage data flywheel of "acquisition—storage—entry—acceleration—adaptation" can inject core momentum for continuous optimization into the

基金项目:南方电网综合能源股份有限公司 2025 年咨询服务项目(NWNY-CGZX-2025-102)
Southern Power Grid Integrated Energy Company Limited 2025 Consulting Service Project(NWNY-CGZX-2025-102)

integrated energy system. This can be transformed into the system's self-optimization capability in operation, a leap in overall efficiency, and the intrinsic driving force for value creation. It is recommended to establish unified data standards, develop park-level data middle platforms and platform operators, explore market-based allocation pathways for energy data elements, and design data-driven business closed loops to empower zero-carbon park construction.

Keywords: zero-carbon park; integrated energy; data flywheel; carbon asset management; energy consumption scenario; source-grid-load-storage

0 引言

零碳园区是实现国家“双碳”战略目标的关键载体。据《中国工业园区绿色低碳发展报告(2023)》,中国80%的工业企业已集中在园区,园区工业总产值占全国的50%以上,碳排放占全国的31%^[1]。工业园区肩负着实体经济和降碳减污的重大使命。国家高度重视零碳园区建设,2025年《政府工作报告》明确提出扎实开展国家碳达峰第二批试点,建设一批零碳园区、零碳工厂。2025年7月,国家发展和改革委员会、工业和信息化部、国家能源局联合印发《关于开展零碳园区建设的通知》,系统部署了加快用能结构转型、推进节能降碳与产业结构优化等八项重点任务^[2]。这一系列顶层设计标志着零碳园区建设已进入全面深化和系统部署的新阶段。因此,探讨零碳园区的建设路径具有重要意义。

综合能源系统是零碳园区建设的核心。综合能源系统在零碳园区建设中扮演着核心支撑角色^[3]。在能源替代方面,它通过集成分布式光伏、储能与微电网,构建园区级绿色电力系统,推动能源供给结构的低碳转型^[4]。在辅助手段方面,它融合多能互补、余热回收与智慧调控技术,实现能源的梯级利用和高效管理,显著提升能效并促进资源循环^[5]。在全生命周期中,它不仅是建设期的物理基础,更是运营期的数据与价值中枢,其持续运行产生的数据流为能效优化、碳资产管理和系统迭代提供了关键依据,确保了零碳目标的可持续实现。

然而,当前综合能源系统的建设与运营实践普遍面临“重建设、轻运营”的困境。如当前新能源发电项目多聚焦于硬件投资与交付,而忽视了长期节能价值挖掘。这使得能源供应、用能场景与碳资产管理三大环节相互割裂,形成了“源-网-荷-储”链条不畅、“碳-能-费”价值闭环缺失的局面^[6],导致系统运行效率难以持续提升,可持续园区级低碳发展模式尚未建立。

为破解零碳园区下综合能源系统的建设难题,亟须依托数字化手段打通零碳园区在综合能源系统、用能场景与碳资产管理之间的壁垒,推动数据

互联互通、资源高效配置与系统集成优化,推动零碳园区高质量发展。现有研究多聚焦能源系统的参数优化策略,或碳资产管理的经济效应,较少关注用能场景与碳资产的互动作用,以及数据要素在打通三者壁垒、促进协同运行与价值共创中的关键作用。

为此,本文引入数据飞轮理论视角,将综合能源系统、用能场景重塑与碳资产管理视为一个有机整体,强调三者协同是零碳园区高效运行的关键。研究聚焦其协同机制与数据流转逻辑,构建由“获取—存储—进入—加速—适应”5个环节组成的自我强化路径,旨在通过降低转型成本、激活内生动力,为零碳园区建设提供兼具理论创新与实践可行性的路径。

1 概念界定与理论基础

1.1 零碳园区文献评述

(1)零碳园区的内涵及其讨论。零碳园区是指通过规划、设计、技术、管理等方式,使园区内生产生活活动产生的二氧化碳排放降至近零水平,并具备进一步达到净零条件的园区。从实践看,我国零碳园区建设历经“多点开花”的早期探索,先后开展生态工业、循环化改造、低碳、绿色工业园等试点,分别聚焦循环经济、能效提升与绿色制造,积累了丰富经验。2016年《“十三五”控温方案》首次提出近零碳排放区,推动理念向系统治理转变。此后,近零碳试点、减污降碳协同创新园区、碳达峰试点相继推进,内涵从单一减排拓展为协同治理与系统转型。当前,零碳园区上升为国家战略,进入全面深化、系统部署的新阶段,成为实现“双碳”目标的关键抓手。从理论看,现有文献对零碳园区的内涵界定呈现出多元视角^[7-9]。本文沿用蒋庆哲等^[10]学者的界定:零碳园区是以新能源和可再生能源系统性替代化石能源为核心,结合能效提升、资源循环与碳移除等辅助手段,在能源项目规划、建设与运营全生命周期中,实现区域范围内温室气体净零排放的现代化产业园区。

(2)园区综合能源系统优化策略。在高精度负荷预测方面,Ge等^[11]提出了一种基于改进粒子群优

化算法与混沌优化算法联合优化的小波神经网络模型,用于综合能源系统的短期负荷预测。薛东等^[12]提出基于集成改进型自适应白噪声完备集成经验模态分解与多变量相空间重构的热负荷预测模型,结合优化后的双向长短期记忆网络,有效提升了受多能流耦合影响下的供热负荷预测精度;杨澜倩等^[13]则构建卷积神经网络-长短期记忆-自注意力融合模型,在无气象预报条件下实现了冷、热、电负荷在1 h至1周多时间尺度上的高精度预测。在储能系统的优化配置与协同调度方面,张元曦等^[14]针对多园区风-光-储微电网,提出改进差分进化算法,揭示了最大单时段弃电量决定储能功率、最大连续弃电总量决定容量的物理规律,使联合运行成本降低6.11%,弃风弃光归零;刘媛媛等^[15]在北方商住园区项目中通过引入蓄热/蓄冷系统替代部分空气源热泵,年运行成本降低20.8%,验证了储能对季节性负荷调节的经济价值。在低碳运行机制创新方面,王俊等^[16]将电动汽车共享储能特性与阶梯式碳交易机制结合,纳入动态碳排放因子与EV碳配额,有效降低了园区运行成本与碳排放;孔慧超等^[17]则从系统层面提出了电力电量再平衡方法,通过“源-网-荷-储”协同,使园区2030年碳排放因子由0.60 kg/(kW·h)降至0.54 kg/(kW·h),并缩减10.1%变配电容量。

(2)碳资产管理的经济效应与实现路径。从政策导向来看,谢典等^[18]分析了我国能耗“双控”向碳排放“双控”的转变路径,指出这种转变不仅是适应当前经济社会发展的需求,也是推动绿色技术创新的关键举措。在企业层面,赵丹等^[19]提出了基于模糊实物期权的企业碳资产评估模型,旨在解决因碳价波动剧烈和忽视不同碳资产之间相关性而导致评估结果不准确的问题。此外,技术手段的应用也为碳资产管理带来了新的可能性。陈婧等^[20]提出了一种基于区块链技术的电力大数据碳资产管理方法,通过构建分布式数据采集体系和设计基于联盟链的交易平台,实现电力企业碳排放数据的可信记录、智能分析及高效交易。最后,朱国栋等^[21]基于产业园区电力数据的特点,探讨了零碳园区碳资产管理体的构建,强调了实时、准确的碳排放数据监测对有效管理各类碳资产的重要性。

综上所述,当前零碳园区研究在内涵界定上已形成基本共识,实践路径主要集中于综合能源系统运行优化与碳资产管理机制设计2个方向。部分研究已初步关注能源数据在提升预测精度、增强碳排放核算可信度及支撑交易机制中的关键作用,反映出零碳园区正加速向数字化治理转型。然而,现有

研究多将综合能源系统、用能场景与碳资产管理作为相对独立的模块进行探讨,对三者之间数据流的衔接机制缺乏系统考察。数据要素在三者之间的流转断点未能得到充分识别,这制约了零碳园区整体协同效能的提升。因此,有必要引入数据飞轮理论,深入剖析并打通数据在综合能源系统、用能场景与碳资产管理(简称为“能源-场景-碳”)之间的流转壁垒,为构建高效、闭环、自优化的零碳园区运行机制提供理论支撑与实践启示。

1.2 零碳园区的构成:“能源-场景-碳”

零碳园区的建设是一个由多个相互关联、协同运作的模块构成的复杂系统工程。基于能源的供给端、消费端到价值管理端的全过程,本文将零碳园区分为综合能源系统、用能场景重塑和碳资产管理三大关键组成部分。

(1)综合能源系统是指通过在园区内投资和整合分布式光伏电站、储能系统、充电设施和智能微电网等硬件基础设施,构建的多种能源协同互补的智慧化系统^[22]。该系统不仅满足园区的电力与综合能源需求,还通过能源的梯级利用、多能互补和优化调度,显著提升能源利用效率和整体经济性,是实现园区能源供给清洁化与低碳化的核心物理基础。

(2)用能场景重塑是指将分布式能源系统与园区内的具体生产、建筑、交通等用能场景深度融合,通过技术创新和服务模式创新,推动传统粗放式用能向高效、低碳模式转型,并创造新绿色用能范式。例如,在物流园区,通过“光伏+仓储”模式为冷链、分拣等环节提供绿色电力;在工业领域,通过“光伏+气膜”将环保设施转化为能源生产基地。这一过程实现了能源系统与用户需求的深度耦合,创造了显著的节能降碳效益^[23]。

(3)碳资产管理是指在碳交易市场、碳定价机制和绿证机制逐步完善的背景下,对园区内产生的碳减排量进行系统性管理。这包括对光伏发电等项目的碳减排量进行精准核算、认证,并通过参与绿电交易或绿证交易实现环境效益的经济价值转化^[24]。同时,也涵盖为园区提供碳盘查、减排路径规划、碳信用开发等综合服务,将无形的减排努力转化为可量化、可交易的碳资产,是实现零碳园区环境效益与经济效益协同的关键环节。

1.3 数据飞轮理论

数据飞轮理论源于野中郁次郎提出的知识循环理论(SECI模型)^[25]。他认为,企业知识划分为隐性知识和显性知识两类。所谓隐性知识包括信仰、隐喻、直觉、思维模式和所谓的“诀窍”;而显性知识则可以用规范化和系统化的语言进行传播,又称为

可文本化的知识^[26]。这两类知识之间的动态转化与持续循环,构成了企业知识创造的核心机制,是提升组织创新能力与核心竞争力的关键所在。

在新的技术条件下,人工智能模型通过其数据生成与语义补全能力,一方面为个体隐性知识的外化提供认知支架,显著降低表达门槛;另一方面打破组织内部的结构性与认知边界,促进知识的跨界共享和流动^[27]。在此过程中,数据要素将企业运营实践中产生的行为与经验记录为可传播的显性知识(如用电记录、设备负载功耗等),而模型则将其吸收并封装为可复用的隐性知识载体(如智能模型与负荷调节),充当显性与隐性知识双向转化的中介。企业通过持续的知识应用与迭代创新,推动“显性—隐性—显性”的加速运转^[28],不断积累数据资产,从而构建驱动业务持续迭代的数据飞轮。

构建数据飞轮,需要构建“获取—存储—进入—加速—适应”的五阶段动态循环机制^[29]:获取阶段实现系统全链路数据的实时采集;存储阶段支持多源异构数据的标准化归集;进入阶段通过智能分析生成关键洞察;加速阶段基于洞察优化决策流程;适应阶段则通过价值反馈驱动系统持续进化。这一机制与零碳园区建设中综合能源系统、用能场景重塑、碳资产管理三大核心组成部分对数据协同的内在需求高度契合,从而为系统性解析“能源—场景—碳”之间的协同障碍构建了有力的理论框架。下文将围绕这三大组成部分的协同障碍,结合三大典型案例,探索激活零碳园区数据飞轮的关键策略,并进一步提出零碳园区综合能源系统的建设路径。本文的整体分析思路如图 1(图中:CCER 为中国国家核证自愿减排量)所示。

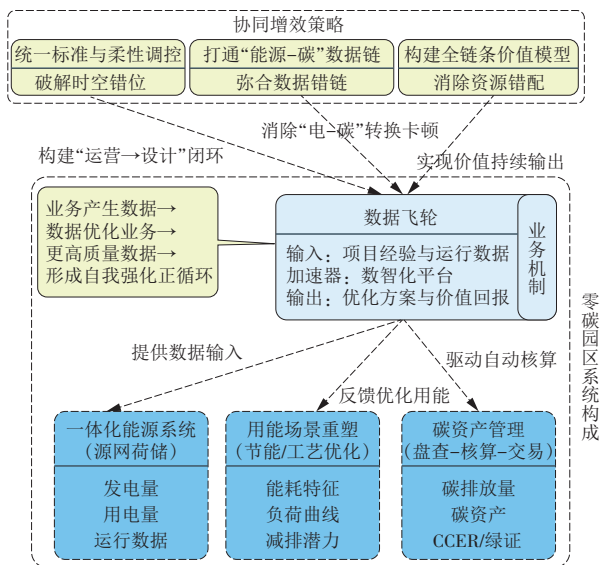


图 1 零碳园区下综合能源系统的建设路径

Fig. 1 Construction pathways for integrated energy systems in zero-carbon parks

2 “能源—场景—碳”协同障碍分析

从数据飞轮的视角来看,当前零碳园区建设仍面临结构性障碍,这些障碍制约了能源系统、用能场景与碳资产管理三大核心要素之间的协同增效。

2.1 能源系统与用能场景的时空错位

能源系统与用能场景之间的协同,是实现零碳园区高效运行的基础。然而,当前普遍存在的时空错位问题,严重制约了能源供需的精准匹配与系统整体效能的提升。从技术特性看,新能源的时空分布不匹配加剧了能源供需的结构性失衡。风光等新能源发电具有显著的间歇性与波动性(如光伏出力集中于午间、风电依赖气象条件),其发电曲线与园区实际用能负荷的峰谷(如工业“晚高峰”)存在天然的时间差。与此同时,能源生产与消费在地理上也存在显著的空间错位,呈现出“西富东贫、北多南少”的分布格局,与胡焕庸线的走向高度吻合。具体而言,我国约 86% 的煤炭资源、82% 的水能资源及大量的风能、太阳能资源集中分布在西部和北部地区,而主要的能源消费中心则位于东中部城市群^[30]。

从运营管理看,传统的能源系统规划与运营模式相对静态和刚性,难以动态响应用能场景的复杂变化,设备标准的混乱造成数据难以实时互通。首先,传统能源系统的规划设计基于项目初期的静态负荷预测。这种预测通常依赖历史数据和粗略的行业标准,难以捕捉园区内企业生产排程、设备启停、人员流动等高度动态的用能特征。其次,用能场景的动态性要求能源系统具备实时响应能力,但现有系统普遍缺乏高频次、深层次的数据采集与反馈机制。管理者难以实时掌握各建筑、各产线的瞬时能耗状态,更无法根据生产计划的临时调整或设备突发故障进行“源—网—荷—储”的动态优化。最后,设备标准的差异是数据流发生断裂的主要原因。能源侧的运行数据(如发电量、电网购电)与用户侧的用能行为数据(如设备启停信号、生产班次)分属不同的信息系统,缺乏统一的数据标准和共享平台。这导致系统无法构建一个完整的“碳—能—费”数据链条,从而无法生成能够指导实时优化的精准洞察。

2.2 能源系统与碳资产之间的资产错链

能源系统与碳资产管理之间的协同,是实现零碳园区环境效益向经济价值转化的关键。然而,当前两者之间存在的资产错链问题,导致碳资产的核算、核证与交易过程严重滞后且可信度不足,阻碍了绿色价值的有效兑现。

首先,能源系统的运行数据与碳核算体系之间

存在割裂。尽管分布式光伏、储能等设施的发电量、充放电量等关键数据已接入智慧能源管理平台,但这些数据并未能自动、无缝地传输至碳资产管理系统。当前碳盘查工作仍普遍依赖人工从不同系统中导出数据,进行周期性(如季度或年度)的手工填报和汇总,并最终提交给第三方机构进行核证。这一过程不仅效率低下、成本高昂,而且极易因人为操作失误而导致数据偏差,影响碳资产的准确性与公信力。其次,碳排放核算精度低并缺乏动态调整机制^[31]。目前的碳核算普遍采用固定的、区域级的电网平均排放因子,这种方法忽略了电网清洁化水平、气象条件、设备实时效率等变量的波动性。然而,静态核算方法无法捕捉这一动态变化,导致绿电消纳的真实减碳成效被严重低估。最后,缺乏一个贯通“能源流-碳流”的数字化闭环。能源系统产生的原始数据未能被有效转化为可用于碳核算的结构化信息,而碳资产的价值反馈也无法反向指导能源系统的优化升级。

2.3 用能场景重塑与碳资产管理之间的资源错配

用能场景重塑与碳资产管理之间的协同,是激发零碳园区深度降碳潜力的核心驱动力。然而,当前两者之间存在的资源错配问题,导致节能改造的综合价值难以被充分认知和量化,从而抑制了企业对零碳园区进行长期、系统性投资的意愿。

首先,节能改造项目的物理成效与碳资产的价值实现之间存在脱节。当园区对建筑照明、暖通空调或工业电机等用能设备进行节能改造后,其能耗下降的数据通常只停留在能源管理系统中,作为一项孤立的运营指标。这些数据未能与碳资产管理系统打通,导致改造所对应的碳减排量及其潜在的经济收益(如绿证交易收入或碳税减免)缺乏透明化、可视化的呈现。客户无法直观地看到“更换一台高效电机”能带来多少吨的碳减排及相应的市场价值,这使得节能投资的回报周期变得模糊,决策过程更倾向于追求短期、可见的电费节约,而忽视长期的环境与经济综合效益。

其次,资源流与碳排放的耦合关系缺乏系统核算机制。现有的管理方式孤立地计算能源消耗的减少量,而未能将节能成果置于更广阔的“能源-物料-废弃”全链条视角下进行关联分析。最后,当企业由于不确定性,难以有效识别用能场景重塑所蕴含的碳资产价值^[32]时,其投资决策往往倾向于见效快、风险低的浅层节能措施(如照明改造、加装光伏板),而回避生产流程再造或园区级发电改造,从而限制了园区整体减碳效能与碳资产开发潜力的释放。

2.4 “能源-场景-碳”协同障碍成因分析

在标准方面,当前零碳园区建设面临显著的技术标准缺失与碎片化问题,严重制约了“能源-场景-碳”系统的可操作性与互操作性。一方面,能源设备制造商、算法开发商、碳核算机构等主体长期处于各自独立的技术生态中,导致通信协议、数据格式、时间戳精度、碳排放因子取值等关键参数缺乏统一规范;另一方面,跨领域标准体系尚未建立,模型训练所需的数据标签、算法接口、设备控制指令与管理平台的业务逻辑之间难以对齐。此外,学科背景的割裂——能源工程、计算机科学、环境经济学等领域各自发展术语体系与方法论,缺乏共通的技术协议和设计框架,使得数据流在穿越设备层、算法层、应用层和管理层时频繁遭遇障碍。这种标准空白不仅抬高了系统集成成本,也使许多先进算法因无法适配底层数据而沦为“纸上智能”,极大削弱了数据驱动协同的实际效能。

在制度方面,现有政策与激励机制严重偏向“重投入、轻运营”的基建逻辑,难以支撑长效协同机制的形成。地方政府对园区的考核多聚焦于光伏装机容量、储能规模、充电桩数量等可见性指标,而对能源利用效率、碳资产收益、数据闭环率和负荷响应质量等反映系统协同水平的核心绩效缺乏量化要求与奖惩措施。同时,园区管理人员的晋升与薪酬仍主要取决于项目审批速度与投资完成率,而非运营优化成效;技术团队即便开发出高效的协同调度模型,也因成果转化激励不足而缺乏持续迭代动力。此外,碳资产权属界定模糊、绿电交易收益分配机制不健全,进一步削弱了企业参与数据共享与系统协同的积极性。

在组织方面,多元主体间的权责边界不清与协同机制缺位,构成了“能源-场景-碳”融合落地的最大现实阻力。园区运营方、入驻企业、电网公司、第三方能源服务商、碳资产管理机构等利益相关方,在数据所有权、使用权、收益权等方面存在显著认知分歧,且缺乏具有法律效力或行业共识的协作契约。企业担心上传用能数据会暴露商业秘密,电网公司对非调度类负荷数据接入持谨慎态度,而第三方服务商则因无法获得稳定数据接口而难以提供定制化服务。

3 零碳园区建设典型案例与实践启示

针对以上不足,本节聚焦3个典型案例,通过系统梳理厦门ABB工业中心、深圳虚拟电厂管理中心与博鳌东屿岛零碳示范区的建设实践,验证破解上述三大瓶颈的具体做法。各案例的建设规模、技术指标与量化经济效应见表1。

表 1 典型零碳园区关键指标量化对比分析

Table 1 Quantitative comparative analysis of key indicators for typical zero-carbon parks

案例名称	建设规模	技术指标	经济效应
厦门 ABB 工业中心 ^[33]	项目建 10 万 m ² 屋顶光伏, 全年发电量约 11.41 GW·h, 搭建智能能源调控平台、新能源发电和储能系统	实现 AI 预测“源-网-荷-储”; 年减碳量 1.13 万 t, 年减碳 1.34 万 t; 清洁能源利用率 50%; 光伏自发自用率 84.4%	全年节省电费 140 万元; 园区“源-网-荷-储”互动实施后, 中心年度用电量减少 5%, 能源成本降低 22%, 投资收益率超 8% ^[37]
深圳虚拟电厂管理中心 ^[34]	接入容量 3 800 MW, 可调资源 6 万余个, 涵盖充电桩、空调、光伏等 9 类资源, 61 家运营商, 最大调节能力 1 200 MW	2023 年以来累计调节次数超 100 次, 调节电量超 5 603 MW·h; 年减碳量约 4 681.2 t; 实现毫秒级/秒级/分钟级响应能力, 调节精度 96.6%	调节运营商经济收益约 1 820 万元, 创造直接经济效益达 1.7 亿元; 带动百余家企业进入虚拟电厂产业链
博鳌东屿岛零碳示范区 ^[35]	光伏投资超 1 亿元, 总装机 23.8 MW, 全年生产电量 32 GW·h	绿电自给率 100%; 年均节约标准煤 8 912 t, 减少二氧化碳排放约 2.3 万 t ^[36]	该项目将余电 15 GW·h 上网销售, 通过绿电交易获得 0.2 元/(kW·h) 的市场溢价, 并获环保税减免

注: 数据来源于企业公开资料及政府公示信息、省级日报等, 部分指标经作者合理估算。

3.1 厦门 ABB 工业中心——构建柔性调控体系

能源系统与用能场景的时空错位是零碳园区运行效率低下的首要瓶颈。厦门 ABB 工业中心为破解时空错位提供了解决方案。中心积极践行绿色低碳理念, 通过“源-网-荷-储”一体化模式, 实现园区清洁能源利用率达 50%, 每年减少碳排放约 1.34 万 t。该中心致力于在清洁能源利用、能源效率优化和电气化率提升等方面深入探索, 为客户提供可复制、可扩展的数字化解决方案。当系统检测到光伏发电高峰而工厂负荷较低时, 可自动启动储能充电或调节空调等柔性负荷; 反之, 则优先使用储能放电。这一实践表明, 通过统一的数据标准和先进的控制算法, 有效解决了供需间的时空错位, 为数据飞轮的顺畅运转奠定了坚实基础。该案例之所以能破解时空错位问题, 关键在于打破了能源调度与碳管理分属不同主管部门的体制壁垒, 实现了“源-网-荷-储”在同一平台下的统一调度。同时, 通过建立设备间兼容的通信协议与 AI 驱动的预测控制模型, 弥补了因技术标准缺失导致的响应滞后, 使动态用能需求与清洁能源供给在时间与空间上实现柔性对齐。

3.2 深圳虚拟电厂——聚合可调节设备

资产错链是制约零碳园区环境效益转化为经济价值的核心障碍。深圳虚拟电厂智慧调度运行管理云平台的成功实践, 为聚合可调节设备, 打通“能源-碳”数据链提供了样本。该平台不仅聚合了建筑楼宇空调、新能源汽车、5G 基站、冰蓄冷系统等 9 类共计 6 万个可调负荷资源, 总容量突破 3 800 MW, 更通过 AI 算法与数字孪生技术, 实现了对分布式能源资源的毫秒级响应与精细化调度。随着深圳计划持续升级“电力充储放一张网 2.0”, 一个以虚拟电厂为载体, 以 AI 与区块链为支撑、以碳效协同为目标的新型“能源-碳”协同治理体系正加速成型。深圳虚拟电厂通过构建

统一的“能源-碳”数据链标准, 将分散的物理运行数据自动转化为可核验、可交易的碳资产, 从根本上解决了因通信协议不统一和人工核算而造成的信任缺失。更重要的是, 平台通过市场化激励机制, 聚合 61 家运营商和数万终端用户自愿共享数据, 有效弥合了组织间因缺乏协同动力而形成的价值断层, 实现了用户规模的可持续增长。

3.3 博鳌东屿岛——实现碳资产价值

资源错配反映了当前零碳园区投资逻辑的短视化。博鳌东屿岛零碳示范区的综合性实践为此提供了宝贵启示。作为博鳌亚洲论坛永久会址所在地和国家级旅游度假区, 东屿岛不仅承载着高规格国际会议的绿色办会要求, 也面临旅游消费密集带来的资源环境压力。博鳌东屿岛零碳示范区通过整合 57 项低碳技术, 依托数字孪生与 AI 智慧平台, 实现了对能源输入、物料消耗、产品服务与废弃物循环全过程的数据融合与价值映射, 并以可视化能碳仪表盘动态呈现各项措施的综合效益。该项目每年将余电 15 GW·h 上网销售, 通过绿电交易获得 0.2 元/(kW·h) 的市场溢价, 并获百万元环保税减免, 不仅满足了博鳌年会“绿色办会、零碳办会”的高标准要求, 也支撑了旅游运营的可持续发展, 真正实现了项目经济性与生态社会效益的统一。总之, 博鳌东屿岛将原本隐性的碳减排效益、品牌溢价与政策红利显性化、货币化, 有效提高了光伏项目的投资回报率, 也辅助旅游与会展服务向高品质、差异化方向升级。这种立足当地产业实践, 由政府引导、企业共建、市场反馈的多方协同机制, 有效克服了因激励缺位和信任不足导致的深度降碳技术应用障碍, 促进了碳资产的价值实现。

4 数据飞轮驱动下零碳园区建设路径

时空错位、资产错链与资源错配三大瓶颈, 深

刻揭示了数据流转不畅是制约零碳园区协同效能提升的根本症结。厦门、深圳、博鳌三大典型案例有效破解了上述瓶颈,激活了零碳园区的数据飞轮。结合案例启示,针对设备协议不兼容、数据主权顾虑等现实障碍,本文基于数据飞轮理论,提出以下“获取—存储—进入—加速—适应”五阶段可操作的实施路径。零碳园区中数据飞轮的建设路径见表2。

表 2 数据飞轮驱动下零碳园区建设路径

Table 2 Construction pathways for zero-carbon parks driven by data flywheel

阶段	具体内容
获取	新建设备兼容开放通信协议; 存量设备实施边缘网关改造; 统一元数据标准; 园区准入和绿色认证要求
存储	建立数据产权制度; 实施分级分类存储; 应用隐私计算技术; 构建数据要素交易机制
进入	建立业务与性能指标关联映射; 基于场景需求训练和微调 AI 模型; 促进数据驱动业务决策; 构建数据驱动的绩效评价体系
加速	“价值发现—价值创造—价值分配”闭环数据产品超市
适应	实现“政府—企业—平台—用户”协同; 推动全国零碳园区技术标准统一; 实现园区内部产业链能源数据共享

4.1 获取阶段：将设备记录转化为结构化数据要素

获取阶段是数据飞轮启动的起点,核心在于解决“数据能不能采、准不准、能不能用”的基础性问题。为实现高质量、高兼容性的数据采集,需从技术规范、标准体系与制度保障 3 个层面协同推进。

第一,制定并强制实施设备级数据接入技术规范。针对新建园区项目及重大技改工程,应由行业主管部门联合发布强制性技术准入要求:所有能源计量、碳排放监测、智能终端等关键设备必须支持开放、标准化的通信协议^[38],包括但不限于 MQTT (用于轻量级物联网数据上报)、IEC 61850(适用于变电站及工业电力系统)、Modbus TCP/RTU(广泛用于工控场景)及 HTTP/RESTful API(便于平台集成)。同时,明确设备厂商在出厂前须通过第三方互操作性认证,并提供标准化的数据点表,包含测点名称、物理量类型、量纲单位、读写权限等字段,实现设备数据的互联互通。

第二,构建覆盖供能用能全流程的元数据与数据格式统一标准^[39]。在国家或区域层面出台《园区能源与碳排放数据采集技术规范》,明确定义核心技术指标:电能、水、气等基础能源数据采集频率不

低于 15 min/次,碳排放相关间接数据按小时粒度采集,重点用能设备运行状态建议实时(≤ 1 s)或准实时(≤ 5 s)上报;统一时间戳,并同步至国家授时中心网络时间协议服务器;数据格式推荐 JSON,字段命名遵循统一规则并嵌入 Schema 定义;电量单位统一为 kW·h,功率为 kW,碳排放量为 t,精度保留至小数点后两位;碳排放核算须采用生态环境部最新发布的省级电网平均排放因子或经备案的行业特定因子,禁止使用未经验证的默认值,地方可参照《江苏省工业园区碳排放核算指南》等先行标准,建立本地化因子库并动态更新。

第三,建立“政府监管—企业执行—厂商适配”三位一体的责任分工与保障机制:政府将数据接入标准纳入产业园区建设准入、绿色认证、双控考核等政策工具,未达标项目不予通过环评或能评;电网企业作为数据责任主体,可以通过与通信企业、用电企业合作的方式,负责采集系统建设运维与数据质量评估;设备厂商须在产品设计阶段嵌入标准协议栈,提供标准化软件开发套件或边缘网关,支持存量设备低成本改造。通过上述技术指标的明确化、标准体系的制度化与责任链条的闭环化,可有效破解当前园区数据“采不到、对不上、用不了”的痛点,为数据飞轮的高效运转奠定坚实基础。

4.2 存储阶段：实现电力数据要素市场化配置

在零碳园区建设中,数据存储阶段的核心是将原始数据转化为可确权、可操作、可交易的数据要素资源池。

确权是零碳园区数据要素流通的基础,园区管委会应设立数据中心办公室,依据国家数据基础制度相关意见,建立数据资源持有权、加工使用权、产品经营权三权分置的权属框架,为零碳园区数据流通提供制度保障。操作是数据要素高效、安全流转的关键支撑。在计算层面,需构建分级分类的存储与计算机制。应用联邦学习、同态加密等隐私保护技术,实现“数据可用不可见”,保护园区企业商业秘密^[40]。在存储层面,对于零碳园区碳核算结果等关键存证信息,应采用区块链技术确保其不可篡改和可追溯^[41]。采用云原生架构则能实现资源的弹性伸缩,保障零碳园区计算效率并降低中小企业门槛^[42]。交易则是数据价值释放的核心环节。应推广“先确权、再授权”的模式^[43],通过零碳园区数据资源登记平台完成数据资产登记,明确权属。在此基础上,形成完整的零碳园区市场化交易机制,使数据产品经营权能够合规、高效地流通,最终释放数据价值,赋能零碳园区的零碳运营。

4.3 进入阶段：根据分析结果反馈业务决策

进入阶段的任务是通过数据驱动的闭环反馈机制,将分析结果转化为具体的业务行动,实现从数据洞察到业务价值的完整闭环,具体而言。

一是建立面向多类型园区的指标映射与价值转化体系^[44]。不同类型园区(如工业型、物流型、文旅型等)在能源结构、负荷特性、碳排放强度及业务目标上存在显著差异。例如,工业园区更关注单位产品能耗与碳排放强度,物流园区侧重于充换电设施的负荷聚合响应能力与运输能效,而文旅园区则强调用能舒适性与绿色形象塑造。因此,应首先构建园区级业务指标(如产值碳强度、峰谷差率、游客人均能耗等)与底层技术性能指标(如设备效率、电网互动能力、储能利用率等)之间的动态关联映射模型。在此基础上,基于园区历史能源、碳排、运行日志等多源数据,预训练通用“能源-碳”协同大模型,并针对上述3类典型园区的核心业务场景进行领域微调。

二是实施基于场景分类的差异化调度与交互策略^[45]。针对不同园区的功能定位与运营节奏,需设计分层分类的智能调度机制。例如,工业园区可采用基于生产计划的日前-日内协同优化策略,物流园区适用高频次、短周期的实时响应调度,而文旅园区则更适合以舒适度约束下的柔性调节为主。为降低使用门槛,应集成自然语言交互等低代码/无代码技术,使非AI背景的电力或园区管理人员能够通过对话方式快速获取定制化AI建议(如“下周碳配额紧张,建议调整哪些产线?”)。同时,依托边缘计算与云边协同架构,将预测结果(如新能源出力、负荷波动和碳价走势)与实时监控数据融合,动态优化能源调度、碳资产管理或设备预防性维护策略,进而提升整体方案的普适性与落地实效。

4.4 加速与适应阶段：价值实现与多方协同

加速阶段在于以价值实现为纽带,驱动数据飞轮高速运转。在零碳园区中,需构建覆盖能源生产、消费、碳排放等核心业务的“价值发现—价值创造—价值分配”闭环机制。例如,通过数字孪生模拟光伏出力与负荷需求的匹配策略,或利用数据API开放平台对接电力交易中心,动态调整储能充放电策略以获取峰谷价差收益。同时,需建立数据产品超市,将园区内的绿电消费记录、碳减排量等封装为标准化产品,便于参与碳市场交易或绿色金融融资。关键是要明确“谁投入、谁贡献、谁受益”的收益分配原则,例如园区企业通过节能改造产生的碳减排量,可按比例转化为碳资产收益,反哺技术改造投入,形成良性循环。

适应阶段需要建立多元协同的治理生态,保障

数据飞轮的持续进化与长效运行。零碳园区需构建“政府-企业-平台-用户”协同体系。政府通过碳配额分配、绿电抵扣等政策提供制度保障;企业承担数据安全与减排责任;平台提供能碳管理基础设施;用户通过参与碳普惠等机制融入生态。技术上,需逐步推动全国零碳园区技术标准统一。例如建立跨区域统一的碳核算规则与数据接口标准,避免因标准差异导致数据孤岛。此外,需通过产业链数据共享机制,将园区内企业的碳足迹数据与供应链上下游对接,推动全链条降碳。

5 结论

本文基于数据飞轮理论,结合典型零碳园区建设案例,探讨数据飞轮驱动下零碳园区的建设路径,结论如下。

(1)当前零碳园区普遍存在三大数据断点——能源与用能场景间存在时空错位、能源与碳资产间存在资产错链、用能场景与碳管理间存在资源错配,制约系统协同效率。

(2)通过对厦门ABB工业中心、深圳虚拟电厂和博鳌东屿岛示范区的案例分析,验证了数据飞轮可有效打通“能源-场景-碳”链条,在提升绿电消纳、碳核算可信度和投资激励方面具有显著效果。

(3)本文提出“获取—存储—进入—加速—适应”五阶段建设路径,为零碳园区提供分步骤、可操作的实施框架。

未来工作将聚焦3个方面:一是开展多类型园区实证以检验拓展框架在不同情境下的适配性;二是探索基于区块链等加密技术的数据确权与交易机制;三是评估数据要素市场化配置对零碳园区发展的作用,释放其在零碳转型中的价值潜力。

参考文献:

- [1]清华大学环境学院. 中国工业园区绿色低碳发展报告(2023)[EB/OL]. (2023-08-31)[2025-12-03]. <https://www.env.tsinghua.edu.cn/info/1129/8369.htm>.
- [2]国家发展改革委,工业和信息化部,国家能源局. 关于开展零碳园区建设的通知(发改环资[2025]910号)[EB/OL]. (2025-06-30)[2025-12-03]. <https://zfxxgk.ndrc.gov.cn/web/iteminfo.jsp?id=20523>.
- [3]张灿,张明震. 中国新型公路交通能源综合系统发展对策研究[J]. 南方能源建设, 2024, 11(5): 95-104. ZHANG Can, ZHANG Mingzhen. Countermeasures for the development of China's new highway transportation energy integrated system[J]. Southern Energy Construction, 2024, 11(5): 95-104.

- [4]胥德玉,黄媛,唐志远,等.面向配电网分布式光伏消纳和可靠性提高的构网型储能优化配置[J/OL].电力建设:1-16(2025-06-06)[2025-12-03].<https://link.cnki.net/urlid/11.2583.tm.20250605.1446.002>.
XU Deyu, HUANG Yuan, TANG Zhiyuan, et al. Research on grid-forming energy storage configuration for distributed photovoltaic consumption and reliability improvement of distribution network[J/OL]. Electric Power Construction: 1-16(2025-06-06)[2025-12-03].<https://link.cnki.net/urlid/11.2583.tm.20250605.1446.002>.
- [5]王永利,张思文,郭璐,等.面向碳市场交易的(近)零碳园区综合能源系统配置优化方法[J].煤炭经济研究,2024,44(2):83-91.
WANG Yongli, ZHANG Siwen, GUO Lu, et al. Research on optimization method of integrated energy system allocation in (near) zero-carbon parks for carbon market trading[J]. Coal Economic Research, 2024, 44(2): 83-91.
- [6]段海涛,贾博程,赵海生,等.中国零碳园区建设实践与挑战[J].国际石油经济,2025,33(8):105-111.
DUAN Haitao, JIA Bocheng, ZHAO Haisheng, et al. The practice and challenges of zero-carbon industrial park construction in China[J]. International Petroleum Economics, 2025, 33(8): 105-111.
- [7]T/CIECCPA 031—2023:零碳园区评价通则[S].北京:中国工业节能与清洁生产协会,2023.
- [8]马彤兵,李镜.零碳智慧园区构建途径与策略研究[J].内蒙古科技与经济,2023(5):23-26.
MA Tongbing, LI Jing. Study on the approaches and strategies of construction zero-carbon smart parks[J]. Inner Mongolia Science Technology & Economy, 2023(5): 23-26.
- [9]T/AIAC 002—2023:零碳园区评价标准[S].北京:中国投资协会,2023.
- [10]蒋庆哲,刘杨,蒲欣宇,等.零碳园区建设的系统路径、发展模式及治理生态[J].中国人口·资源与环境,2025,35(5):13-23.
JIANG Qingzhe, LIU Yang, PU Xinyu, et al. Systematic pathways, development models, and governance ecosystem of zero carbon emission park construction[J]. China Population, Resources and Environment, 2025, 35(5): 13-23.
- [11]GE L, LI Y, YAN J, et al. Short-term load prediction of integrated energy system with wavelet neural network model based on improved particle swarm optimization and chaos optimization algorithm[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2021, 9(6): 1490-1499.
- [12]薛东,徐静静,江婷,等.基于双重特征处理的园区综合能源系统供热负荷预测研究[J/OL].综合智慧能源:1-9(2025-10-27)[2025-12-03].<https://link.cnki.net/urlid/41.1461.TK.20251024.1320.004>.
Xue Dong, Xu Jingjing, Jiang Ting, et al. Research on heat load prediction of integrated energy systems in parks based on dual feature processing[J/OL]. Integrated Intelligent Energy: 1-9(2025-10-27)[2025-12-03].<https://link.cnki.net/urlid/41.1461.TK.20251024.1320.004>.
- [13]杨澜倩,郭锦敏,田慧丽,等.基于CNN-LSTM-Self attention的园区负荷多尺度预测研究[J].综合智慧能源,2025,47(2):79-87.
YANG Lanqian, GUO Jinmin, TIAN Huili, et al. Research on multi-scale load prediction in parks based on CNN-LSTM-Self attention[J]. Integrated Intelligent Energy, 2025, 47(2): 79-87.
- [14]张元曦,杨国华,马龙腾,等.基于改进DE算法的园区微电网风光储优化配置[J].综合智慧能源,2025,47(9):71-79.
ZHANG Yuanxi, YANG Guohua, MA Longteng, et al. Optimized wind-solar-storage configuration of industrial park microgrids based on improved differential evolution algorithm[J]. Integrated Intelligent Energy, 2025, 47(9): 71-79.
- [15]刘媛媛,刘芳芳,贾天翔,等.商住园区综合能源供暖(冷)系统的方案设计及其运行经济性研究[J].综合智慧能源,2023,45(12):20-28.
LIU Yuanyuan, LIU Fangfang, JIA Tianxiang, et al. Design of the integrated energy heating(cooling) system for a commercial and residential park and its economy analysis[J]. Integrated Intelligent Energy, 2023, 45(12): 20-28.
- [16]王俊,田浩,赵二岗,等.计及电动汽车共享储能特性的园区柔性资源低碳运行控制方法[J].综合智慧能源,2024,46(6):16-26.
WANG Jun, TIAN Hao, ZHAO Ergang, et al. Low-carbon operation control on park-level integrated energy systems considering shared energy storage devices for electric vehicles[J]. Integrated Intelligent Energy, 2024, 46(6): 16-26.
- [17]孔慧超,黄学劲,王文钟,等.园区受端新型电力系统电力电量再平衡方法[J].综合智慧能源,2024,46(2):68-74.
KONG Huichao, HUANG Xuejin, WANG Wenzhong, et al. Electric power and energy rebalancing method for new power systems at receiving ends of industrial parks[J]. Integrated Intelligent Energy, 2024, 46(2): 68-74.
- [18]谢典,高亚静,芦新波,等.能耗“双控”向碳排放“双控”转变的实施路径研究[J].综合智慧能源,2022,44(7):73-80.
XIE Dian, GAO Yajing, LU Xinbo, et al. Research on the implementation path of the transition from dual control on energy consumption to dual control on carbon emission[J]. Integrated Intelligent Energy, 2022, 44(7): 73-80.
- [19]赵丹,朱丽敏,胡坤,等.基于模糊实物期权的企业碳

- 资产估值模型构建[J]. 综合智慧能源, 2024, 46(8): 28-35.
- ZHAO Dan, ZHU Limin, HU Shen, et al. Construction of an enterprise carbon asset valuation model based on fuzzy real options [J]. *Integrated Intelligent Energy*, 2024, 46 (8): 28-35.
- [20] 陈婧, 王佳睿, 朱佳盈, 等. “双碳”目标下电力大数据碳资产管理方法研究[J]. 电气技术与经济, 2025(10): 236-238, 242.
- CHEN Jing, WANG Jiarui, ZHU Jiaying, et al. Research on carbon asset management method of power big data under the goal of "double carbon" [J]. *Electrical Equipment and Economy*, 2025(10): 236-238, 242.
- [21] 朱国栋, 罗浩, 刘洋, 等. “双碳”目标下零碳园区碳资产管理体系构建研究——基于产业园区电力数据的分析[J/OL]. 价格理论与实践: 1-8(2025-07-16)[2025-12-03]. <https://doi.org/10.19851/j.cnki.CN11-1010/F.2025.10.351>.
- Zhu Guodong, Luo Hao, Liu Yang, et al. Research on the establishment of carbon asset management system for zero-carbon parks under the dual carbon goals——Based on the analysis of power data in industrial parks [J/OL]. *Price: Theory & Practice*: 1-8(2025-07-16)[2025-12-03]. <https://doi.org/10.19851/j.cnki.CN11-1010/F.2025.10.351>.
- [22] 蒋月红, 王豪, 叶飞宇. 智慧管控一体化系统在综合能源工程的应用[J]. 能源研究与管理, 2021, 13(4): 123-127.
- JIANG Yuehong, WANG Hao, YE Feiyu. Application of intelligent management and control system in integrated energy project [J]. *Energy Research and Management*, 2021, 13(4): 123-127.
- [23] 国家能源局. 能源绿色低碳转型典型案例发布[EB/OL]. (2024-05-19) [2025-12-03]. https://www.nea.gov.cn/2024-05/19/c_1310775206.htm.
- [24] 陶春华. 碳资产: 生态环保的新理念——概念、意义与实施路径研究[J]. 学术论坛, 2016, 39(6): 64-67.
- TAO Chunhua. Carbon assets: A new concept of eco-environmental protection—Research on concept, significance and implementation path [J]. *Academic Forum*, 2016, 39(6): 64-67.
- [25] 赵蓉英, 刘卓著, 王君领. 知识转化模型SECI的再思考及改进[J]. 情报杂志, 2020, 39(11): 173-180.
- ZHAO Rongying, LIU Zhuozhu, WANG Junling. Rethinking and improvement of knowledge transformation model SECI [J]. *Journal of Intelligence*, 2020, 39(11): 173-180.
- [26] 赵士英, 洪晓楠. 显性知识与隐性知识的辩证关系[J]. 自然辩证法研究, 2001, 17(10): 20-23, 33.
- ZHAO Shiyong, HONG Xiaonan. The dialectical relationship between explicit knowledge and tacit knowledge [J]. *Studies in Dialectics of Nature*, 2001, 17 (10): 20-23, 33.
- [27] 胡超凡. 生成式人工智能重塑企业微创新的机制——基于隐性知识和组织学习边界的视角[J/OL]. 企业科技与发展: 1-29(2025-07-16)[2025-12-03]. <https://doi.org/10.20137/j.qykjyfz.45-1359/t.20250715.001>.
- HU Chaofan. Generative artificial intelligence reshaping micro-innovation mechanisms in enterprises: A perspective based on tacit knowledge and organizational learning boundaries [J/OL]. *Enterprise Science and Technology Development*: 1-29(2025-07-16)[2025-12-03]. <https://doi.org/10.20137/j.qykjyfz.45-1359/t.20250715.001>.
- [28] 王文京, 吕本富, 刘颖. “数据飞轮”驱动“企业互联网化”[J]. 中国经济周刊, 2015(22): 78-79.
- WANG Wenjing, LYU Benfu, LIU Ying. "Data flywheel" drives "enterprise internetization" [J]. *China Economic Weekly*, 2015(22): 78-79.
- [29] 王子阳, 朱武祥, 李浩然, 等. AI时代如何构建数据飞轮[J]. 清华管理评论, 2024(4): 59-65.
- WANG Ziyang, ZHU Wuxiang, LI Haoran, et al. How to build a data flywheel in AI era [J]. *Tsinghua Business Review*, 2024(4): 59-65.
- [30] 电力规划设计总院. 深度解读“十四五”现代能源体系规划之我国能源区域布局的变与不变[EB/OL]. (2022-09-05) [2025-12-03]. <https://m.bjx.com.cn/mnews/20220905/1253208.shtml>.
- [31] 郭雪伟, 曲昌盛, 徐东耀. 双碳背景下碳排放核算体系现状与展望[J]. 环境工程技术学报, 2025, 15(3): 819-832.
- GUO Xuewei, QU Changsheng, XU Dongyao. Current status and prospects of carbon emission accounting system under the "dual carbon" background [J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2025, 15(3): 819-832.
- [32] BREMER L, DEN NIJS S, DE GROOT H L F. The energy efficiency gap and barriers to investments: Evidence from a firm survey in the Netherlands [J]. *Energy Economics*, 2024, 133: 107498.
- [33] 林露虹. 跨国企业ABB在厦门火炬高新区30多年的成长故事——一场双向奔赴解锁“高新密码”[N]. 厦门日报, 2023-12-14(A02).
- [34] 深圳市人民政府. 深圳虚拟电厂总容量快速增长[EB/OL]. (2024-09-10) [2025-12-03]. https://www.sz.gov.cn/cn/xxgk/zfxxgj/zwdt/content/post_11547654.html.
- [35] 郭卫华. 从东屿岛到世界: 博鳌零碳示范区交出“中国答案”[EB/OL]. (2025-05-05) [2025-12-03]. https://paper.people.com.cn/zgnyb/pc/content/202505/05/content_30072197.html.
- [36] 王晓斌, 朱滢琳, 陈明帆. 博鳌东屿岛零碳示范园区入选2025全球能源互联网“十大引领工程”[EB/OL]. (2025-09-

- 10)[2025-12-03]. <https://m.chinanews.com/wap/detail/zw/cj/2025/09-10/10366661.shtml>.
- [37]刘艳,郭芷祎.“数据大脑”助工业园区绿色转型获2024年全国一等奖[EB/OL]. (2024-11-21)[2025-12-03]. https://www.xmnn.cn/xmwb/20241121/202411/t20241121_30072197.htm.
- [38]IEA. Digitalisation and energy[R]. Paris: IEA, 2017.
- [39]严红,穆志勇,李明哲,等.元数据标准化发展研究[J]. 信息技术与标准化, 2023(9): 25-29, 53.
YAN Hong, MU Zhiyong, LI Mingzhe, et al. Research on the development of metadata standardization[J]. Information Technology & Standardization, 2023(9): 25-29, 53.
- [40]隐私计算联盟,中国信息通信研究院. 隐私计算白皮书(2023年)[R]. 北京: 中国信息通信研究院, 2023.
- [41]中国移动通信有限公司研究院,中国质量认证中心,中国信息通信研究院,等. 区块链赋能“碳达峰碳中和”白皮书(2022版)[R]. 北京: 中国信息通信研究院, 2022.
- [42]中国信息通信研究院. 云计算白皮书(2024年)[R]. 北京: 中国信息通信研究院, 2024.
- [43]李文超. 区块链技术在版权纠纷溯源治理中的应用研究[J]. 中国版权, 2021(2): 91-97.
LI Wenchao. Research on the application of blockchain technology in the source management of copyright disputes[J]. China Copyright, 2021(2): 91-97.
- [44]YU W, PATROS P, YOUNG B, et al. Energy digital twin technology for industrial energy management: Classification, challenges and future[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2022, 161: 112407.
- [45]GUO J C, WU H, MA T, et al. Scenario-adaptive hierarchical optimisation framework for design in hybrid energy storage systems[J]. Nature Communications, 2025, 17(1): 1-19.
(本文责编:赵赫)
-
- 收稿日期:2025-12-04;修回日期:2026-01-15
上网日期:2026-03-25;附录网址:www.iienergy.cn
- 作者简介:
夏小平(1975),男,高级经济师,硕士,从事节能低碳项目开发、投资建设运营管理等方面的研究,xiaxp@csg.cn;
尧德华(1985),男,高级工程师,博士,从事零碳园区建设、清洁能源利用、节能改造等方面的研究,yaodh@csg.cn;
宋总涛(1981),男,高级工程师,硕士,从事电力需求侧管理、工业节能等方面的研究,songzt@csg.cn;
汪悦越(1992),女,工程师,硕士,从事零碳园区规划与低碳化转型等方面的研究,wangyueyue@csg.cn;
谭一帆(1996),男,博士,从事创新与产业空间格局方面的研究,tanyifans@stilb.cn;
方亦茗(1994),女,经济师,硕士,从事区域产业发展方面的研究,fym@stilb.cn;
张军*(1967),男,研究员,硕士,从事战略性新兴产业和未来产业创新发展及新能源、新材料战略情报等方面的研究,zhangjun@mail.whlib.ac.cn。
*为通信作者。