



中移智库

数字技术助力电力行业低碳化发展路径 及典型场景研究

中国移动研究院（中移智库）
2023年12月

目录

摘要	2
1. 数字技术助力电力行业低碳化发展的研究背景	4
1.1 电力行业低碳化转型是双碳目标实现的关键	4
1.2 电力数字化是实现行业自身低碳化发展的有效举措	5
2. 电力行业碳排放现状及结构分析	7
2.1 电力行业碳排放总体情况分析	7
2.2 电力行业分场景碳排放结构分析	8
3. 数字技术助力电力行业低碳化发展及贡献分析	11
3.1 数字技术助力电力行业低碳化发展基本路径分析	11
3.2 数字技术助力电力行业低碳化发展典型场景分析	14
3.3 数字技术行业对电力行业碳排放影响分析	19
4. 未来展望与发展倡议	22
缩略语列表	25
参考文献	26
附录：模型核算说明	28
(1) 直接碳排放	28
(2) 间接碳贡献	28
(3) 完全碳排放	29

摘要

在全球气候与环境问题日益突出的今日，促进人与自然和谐共生已成为构建人类命运共同体的重要一环。中国提出“双碳”目标，并对重点耗能行业能源利用率提出了各阶段的具体目标，对实现全球绿色可持续发展具有重要意义。电力行业作为我国碳排放占比最大的行业，其低碳转型升级将直接影响“双碳”目标的整体进程。数字技术是实现电力行业减排的重要手段，助力电力系统实现高度数字化、智慧化和网络化，支撑源网荷储海量分散对象协同运行，同时也可以帮助发电企业监测和预测碳排放，助力发电企业的低碳化转型，对于中国实现碳达峰碳中和战略目标至关重要。

本报告通过开展数字技术助力电力行业低碳化发展路径及典型场景研究，分析了我国电力行业碳排放结构、数字技术助力电力行业低碳化路径及五大场景数字化实施方案，综合评估和核算了数字技术对电力行业双碳目标的贡献，并在此基础上提出未来展望和发展倡议。

数字技术助力电力行业低碳化发展的本质在于提高全社会信息化、智能化水平，提升资源配置效率和能源使用效率。通过精准监测碳排放数据、在全环节落实低碳化实施方案、碳排放权交易和绿电、绿证市场三个基本路径，加强“端-边-管-云”的整体数字化部署，推进电力行业低碳化发展。并在基本路径中重点分析了“发输变配用”五大场景的数字化实施方案。本研究采

用投入产出模型量化核算了数字技术行业对电力行业的减排效应。结果表明数字技术行业可以有效助力电力行业碳减排，且该促进作用呈现扩大趋势。电力行业的数字化投入水平提高有助于推进其低碳转型。

本报告旨在探讨数字技术在电力行业低碳化发展中的基本路径以及在各场景实施方案中的具体作用机制，期待能够为数字技术融入电力行业低碳发展全过程，赋能电力行业数字化转型与变革提供共识路径。

本报告的版权归中国移动所有，未经授权，任何单位或个人不得复制或拷贝本建议之部分或全部内容。

1. 数字技术助力电力行业低碳化发展的研究背景

中国提出“双碳”目标对实现全球绿色可持续发展具有重要意义。在全球气候与环境问题日益突出的今日，促进人与自然和谐共生已成为构建人类命运共同体的重要一环。2020年9月，中国政府在第七十五届联合国大会上向国际社会做出庄严承诺，中国碳排放将力争在2030年前达到峰值，并争取2060年前实现碳中和。“双碳”目标彰显了中国推动构建人类命运共同体的责任担当。目标宣布后，中国政府做出一系列详细部署，并对重点耗能行业能源利用率提出了具体目标。全球范围来看，欧盟碳边境调节机制（Carbon Border Adjustment Mechanism，简称CBAM）施行将影响相关产业布局及供应链发展，各行业低碳转型迫在眉睫。能源作为全球碳减排关键领域，亟需向低碳化乃至无碳化方向转型。电力行业作为我国碳排放占比最大的行业，其低碳转型升级将直接影响“双碳”目标的整体进程，而电力行业与数字技术融合发展是推动我国能源产业基础高级化、产业链现代化的重要引擎，对提升行业核心竞争力、推动能源绿色高质量发展具有重要意义。

1.1 电力行业低碳化转型是双碳目标实现的关键

电力行业碳排放是我国碳排放最主要来源。中国是全球碳排放量最大国家，国际能源署（International Energy Agency）

数据显示，2020 年中国碳排放总量占全球碳排放量超 30%，其中能源领域占比接近 90%。从 2016-2020 年看，电力行业作为能源领域最主要排放行业，其碳排放量占比均维持在能源领域排放的五成左右。电力行业低碳化乃至无碳化转型是我国实现双碳目标的关键所在。电力行业低碳化发展，能源结构转型是核心。2021 年 10 月，中共中央、国务院印发《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》，明确指出到 2030 年，非化石能源消费比重达到 25%左右，风电、太阳能发电总装机容量达到 12 亿千瓦以上，二氧化碳排放量达到峰值并实现稳中有降。到 2060 年，非化石能源消费比重达到 80%以上，碳中和目标顺利实现。第十四个五年计划具体目标也提出在 2021-2025 年期间将二氧化碳强度降低 18%，单位 GDP 能耗降低 13.5%。到 2025 年，将非化石能占能源消费总量的比重提高至 20%（2020 年约为 16%）。加快清洁能源发展，实现总体能源结构转型势在必行。

1.2 电力数字化是实现行业自身低碳化发展的有效举措

随着科技水平的不断发展，越来越多数字化、智能化的解决方案服务于电力行业产业链的各个环节，先进的数字技术成为电力行业减排的重要支撑。推动数字技术与电力行业深度融合，赋能电力行业数字化智能化转型升级，是把握新一轮科技革命和电力行业变革新机遇的战略选择。首先，数字技术可以通过赋能电力行业，推动数字化智能化技术在电力行业全环节的覆盖应用，

ERR 能研微讯 微信公众号: Energy-report

欢迎申请加入 ERR 能研微讯开发的能源研究微信群，请提供单位姓名（或学校姓名），申请添加智库掌门人（下面二维码）微信，智库掌门人会进行进群审核，已在能源研究群的人员请勿申请；群组禁止不通过智库掌门人拉人进群。



扫一扫上面的二维码图案，加我微信

ERR 能研微讯聚焦世界能源行业热点资讯，发布最新能源研究报告，提供能源行业咨询。

本订阅号原创内容包含能源行业最新动态、趋势、深度调查、科技发现等内容，同时为读者带来国内外高端能源报告主要内容的提炼、摘要、翻译、编辑和综述，内容版权遵循 Creative Commons 协议。

知识星球

提供能源行业最新资讯、政策、前沿分析、报告（日均更新 15 条+，十年 plus 能源行业分析师主理）



提供能源投资研究报告（日均更新 8~12 篇，覆盖数十家券商研究所）



二维码矩阵

资报告号：ERR 能研微讯 订阅号二维码（左） | 行业咨询、情报、专家合作：ERR 能研君（右）



视频、图表号、研究成果：能研智库 订阅号二维码（左） | ERR 能研微讯头条号、西瓜视频（右）



能研智库视频号（左） | 能研智库抖音号（右）



能研咨询



扫描二维码，关注我的视频号

EPP能研资讯

抖音



@隐藏的杀手
抖音号：LRTBE
在抖音，记录美好生活

保存图片到相册 → 打开手机摄像头扫一扫

EPP能研资讯

为各环节的精细化管理提供有利手段，提高电力行业的生产能效和绿色低碳水平。其次，随着大规模新能源电力接入电网，电力系统需要在随机波动的负荷需求与电源间实现供需平衡。数字技术可以通过推动电力相关数据要素充分流通和使用，打通电力行业各环节信息壁垒，提升电力系统网络化和信息化水平，推动源网荷储新型电力系统协同发展。最后，数字技术在电力行业的深度应用，可以实现产品和商业模式创新，培育数实融合发展的新模式。通过数字化智能化技术融合应用，可实现电力行业的提质增效和低碳转型发展，为积极稳妥推进碳达峰碳中和提供有力支撑。

2. 电力行业碳排放现状及结构分析

研究数字技术与电力行业低碳化发展间关系，首先需要定位电力行业碳排放现状及其排放结构。本部分以国际能源署（International Energy Agency,以下简称 IEA）、世界资源研究所（World Resources Institute,以下简称 WRI）和中国电力企业联合会公布数据作为基础。由于 WRI、IEA 部分结构数据只更新到 2020 年，且部分 2021 和 2022 年数据结构与 2020 年未呈现显著差异，因此本部分以 2020 年为时间节点分析现阶段我国电力行业碳排放情况。

2.1 电力行业碳排放总体情况分析

中国是世界最大能源消费国和碳排放国。WRI 气候观察数据显示，从排放领域看，2016-2020 年，能源部门占比始终保持在 75%以上，为全球碳排放最主要来源。从地区上看，中国是世界最大能源消费国和碳排放国。IEA《中国能源体系碳中和路线图》数据显示，2020 年中国能源部门二氧化碳排放量占全球三分之一。

能源领域碳排放为中国碳排放主要来源，占总碳排放近九成。根据 WRI 公布数据，2016-2020 年中国能源领域碳排放占我国总碳排放的比重平均约为 88%，而世界其他地区能源领域碳排放占比低于 60%，主要原因在于中国能源供给结构中传统火电占比较大。2020 年中国与能源有关的排放中约 70%来自煤炭，12%

来自石油，6%来自天然气，约 11%来自过程排放。能源燃烧供能产生的碳排放为能源部门碳排放核心。

电力行业碳排放是我国能源领域碳排放主要来源，占比约为一半。我国能源领域碳排放包括燃料燃烧和逃逸排放两类，其中燃料燃烧占比超过九成，而燃料燃烧碳排放可分为供能和用能两方面，根据 IEA 公布数据，电力行业作为主要供能部门，是能源领域最大碳排放来源，其次为用能层面的工业生产、交通和建筑行业。电力行业在我国总碳排放比例从 2016 年的 48.32% 上升到 2020 年的 53.48%，占比远超其他行业。

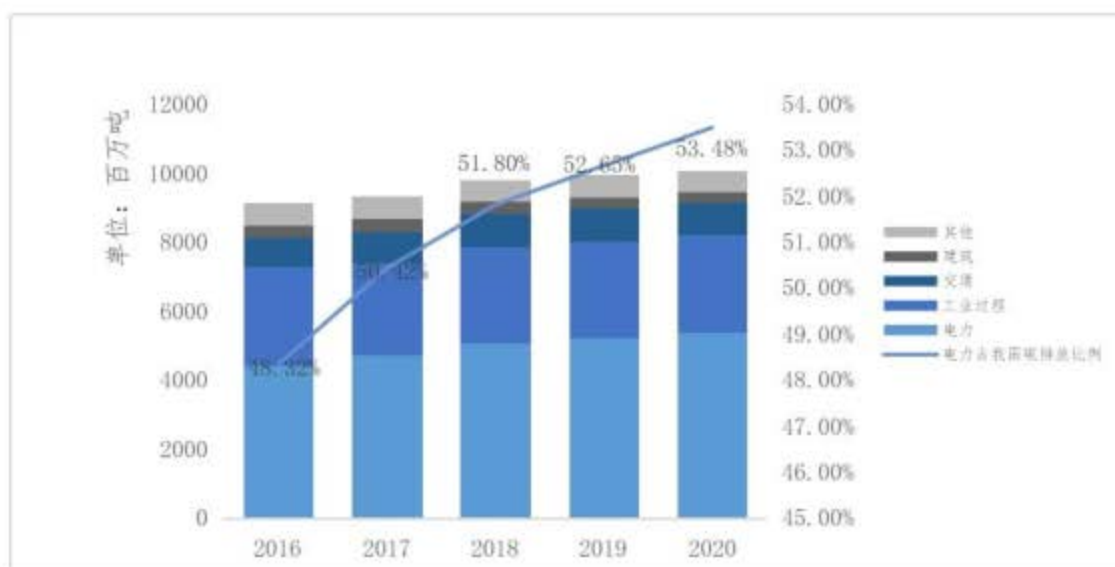


图 1：2016-2020 中国能源领域碳排放来源占比

数据来源：基于 IEA 公布数据梳理

2.2 电力行业分场景碳排放结构分析

电力行业五大场景中，发电场景为主要碳排来源，占比超八

成。电力从生产到消费全过程可以划分为发电、输电、变电、配电和用电五大场景。由于目前对于各场景涉及的碳排放数据尚处在初步探索中，因此本报告结合多来源数据进行分析。而基于中国电力企业联合会发布的《中国电力行业年度发展报告》和 IEA 发布的我国电力行业碳排放量数据，可以计算出各场景碳排放量。计算结果显示，电力行业五大场景中，发电场景占总体比例超过 80%，为电力行业最主要排放场景。聚焦发电场景，推动该场景低碳化是推动电力行业总体低碳转型的关键。

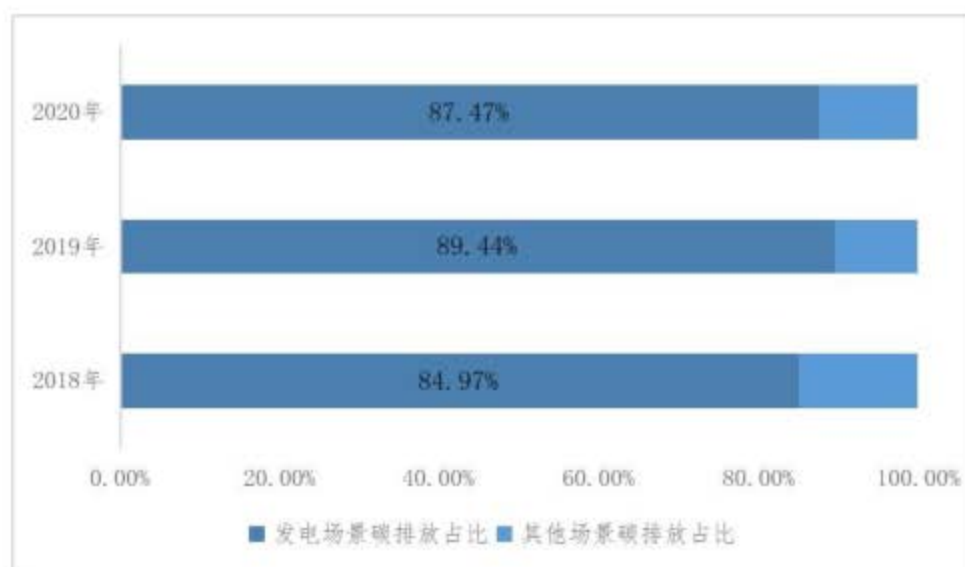


图 2： 2018-2020 年电力行业碳排放结构占比

数据来源：基于 IEA 和《中国电力行业年度发展报告》梳理

火力发电占比高是发电场景碳排放量高的主要原因。根据《中国电力行业年度发展报告 2021》披露数据，我国 2020 年单位火电发电量二氧化碳排放约 832 克/千瓦时，全国单位发电量

二氧化碳排放约 565 克/千瓦时。基于我国总发电量和火电发电量数据计算，我国 2020 年发电场景产生的碳排放量为 43.09 亿吨，占整个电力行业碳排放量的 80.13%，其中火电发电产生的碳排放量为 42.28 亿吨。大力开发清洁能源，调整总体能源结构，降低火力发电比重是降低发电场景碳排放量的核心。

我国由于资源禀赋和区域特点，目前火力发电在电力行业中依旧处于主体地位。“双碳”背景下，我国能源领域低碳转型需加速提升风、光等零碳能源占比。但大力发展电力清洁能源尚存在诸多问题。首先，从全国范围看，清洁能源的资源需求一直存在逆向分布问题，为电力的传输和储能带来巨大挑战。其次，新能源具有间歇性、随机性和波动性等特点，随着高比例新能源接入及电气化水平的提高，电网的稳定性也将受到冲击。围绕火电、水电等常规电源建立起来的传统电力系统，已无法适应规模越来越大的新能源，新的电力系统变革与创新迫在眉睫。

3. 数字技术助力电力低碳化发展路径及贡献分析

数字技术以数据资源作为关键生产要素，通过采集数据、分析数据、进行优化决策并实施控制，推动应用数字技术的行业向数字化智能化升级，其本质在于提高全社会信息化、智能化水平，提升资源配置效率和能源使用效率。就电力行业而言，以5G、物联网、人工智能、云计算和大数据等技术为代表的数字技术有望重塑电力系统。数字技术一方面可以通过实时在线监测、排放精准计量与预测提高电力行业碳数据采集丰富度和信息披露质量，另一方面可以通过在发电侧、电网侧及用电侧部署智能化解决方案提升行业生产和运营规划与实施效率，从而大幅提升能源使用效率，减低资源消耗水平，直接或间接减少电力行业碳排放量。此外，数字技术还可以推动电力行业商业模式变革和业态创新，助推电力消费理念转变，助力我国碳达峰、碳中和目标实现。

3.1 数字技术助力电力行业低碳化发展基本路径分析

从总体思路来看，电力行业低碳化发展的核心是从电力生产到消费全过程按照不同环节的特点有针对性的落实低碳化实施方案，同时为实现各环节低碳化需要以全面真实的行业和企业碳排放信息作为基础，搭配市场机制消解电力企业因降低碳排放产生的额外成本。因此电力行业低碳化的基本路径是：第一精准监测电力行业碳排放数据，全面披露电力企业碳排放信息并提升信息披露质量，第二在全面精准碳排放数据基础上，在电力发输变

配用的全环节中落实低碳化实施方案，第三是通过碳排放权交易和绿电、绿证市场，降低企业因碳排放产生的额外成本，提升企业主动降低碳排放的意愿。



图 3：数字技术助力电力行业低碳化发展基本路径

数据来源：中国移动研究院研究整理

数字技术针对电力行业低碳化发展基本路径的三个方面着力，通过“端-边-管-云”的整体数字化部署，加强电力生产各环节产生的数据交互应用水平，不断推进电力系统智能化水平提升，直接或间接减少电力行业碳排放量。

具体来说，针对**电力行业碳数据监测和披露**，数字技术一方面可以对行业实际排放 CO₂ 浓度进行精准监测，另一方面可以提升企业核查及披露碳排放数据的广度和深度。随着遥感技术发展，地面的气体排放信息可以由空间的传感器通过电磁波辐射感知，利用大气模型对卫星识别排放信息进行反演，准确估算中国

燃煤电厂二氧化碳排放量，可以提供独立客观的碳排放监测数据，助力中国碳盘点以及评估重点行业碳减排效力。在数据披露方面，5G、物联网、人工智能、云计算和大数据等信息技术可以拓展企业碳排放信息披露的广度，企业碳排放信息、环境保护信息在数字时代能更及时、更精准、更大范围、更迅速地传递给利益相关者，同时也能通过数据挖掘方法加深企业碳排放信息披露深度，通过区块链技术提升企业碳数据披露质量，防止数据造假、保障数据安全。针对**电力行业各环节低碳化实施方案**，数字技术围绕电力从生产到消费的发-输-变-配-用全过程，通过数字化智能化解决方案，提升电力行业能源/资源使用效率，帮助整体能源结构调整，推进电力行业技术创新和商业模式变革。电力发-输-变-配-用全过程可以分为发电侧（发电环节）、电网侧（输、变及配电环节）和用电侧（用电环节），从发电侧来看，数字技术助力发电环节实现对传统发电、新能源发电的高效运营，从电网侧看，数字技术集成化智慧电网解决方案，基于大数据，利用物联网、人工智能等技术，将电源侧、用电侧及输配电侧各类数据接入，实现数据透明感知和智能化决策控制，有效促进新能源电力消纳，合理削峰填谷，从用电侧看，“能源互联”将更加注重零售侧的服务和用能管理，数字化解决方案能够为分布式光伏、储能、电动汽车充电、智慧家居及智慧楼宇等丰富的用电场景提供管理、运营、服务流程上的优化。针对**碳交易市场机制**，数字技术一方面可以通过搭建安全、便捷的线上交易平台，消除

交易主体间信息不对称，快速匹配碳交易供需关系，降低碳排放权交易成本，另一方面有助于明晰碳排放权，辅助管理机构合理分配碳排放权，并降低核验成本。线上碳资产交易系统使得碳配额、金融和积分交易更加便捷，有利于未来更多主体参与碳交易市场，提升碳市场流动性，降低碳排放主体的减排成本。大数据、云计算、物联网及遥感等数字技术应用有效锁定碳排放源并检查碳排放量，相关部门可以更加及时、准确地监测特定地点和企业的碳排放量及碳的扩散方向与速度，明晰企业排放情况，并以此合理分配碳排放权，为碳配额交易奠定基础。区块链及信息安全技术将保障交易信息的准确真实安全。

3.2 数字技术助力电力行业低碳化发展典型场景分析

数字技术助力电力行业低碳化发展基本路径中，电力行业各环节低碳化实施方案是核心，碳数据采集及披露和市场机制是辅助。本部分聚焦电力行业五大环节，具体分析数字技术针对各场景的低碳化实施方案。

就发电场景来说，绿色数字电厂是该场景典型实施方案。具体来说，数字技术可应用于现有存量电厂和未来大规模新能源电站的建设、生产和运营全生命周期过程中。就现有存量电厂而言，数字技术从监测、控制、运营管理以及微能源网综合应用等方面推动传统电厂数字化转型。通过物联网相关技术对电厂内发电设备和电厂环境进行动态监测，实时显示发电设备和电厂环境当前状态；通过引入先进的智能感知、信息通信、智能控制等新技术，

在传统发电系统基础上形成更安全、高效、环保的发电控制系统；利用电力巡检机器人或电力巡检无人机在发电场所内按照规划路径自动运行，并在设置的巡检点自动监测和智能感知发电设备运行状态及周围环境等信息，对发电设备缺陷、违规和危及发电安全的隐患进行判别和预测。通过将无线通信模块内嵌至数据采集器和微网控制器中，实现业务终端和主站间的直连直采。就新能源场站而言，数字孪生贯穿电厂全生命周期，叠加基于数字传感的远程集中控制等功能，推进电厂智能化管理水平跃升。在电厂建设阶段，数字孪生通过空间计算与 3D 建模助力场景仿真，通过虚拟调试缩短开发周期，降低成本，有效推动工厂建设实施落地；在电厂生产阶段，人工智能和机器学习有效支撑电厂决策，针对发电量、控制策略和设备运行状态等更精准预测，合理优化生产策略，及时调试和改善设备运作状态，提升新能源发电效率；在电厂运营阶段，云边协同技术架构和泛在物联技术支撑远程智能集控运营平台和企业级物联云平台搭建，打通不同电厂间的数据壁垒，实现数据的进一步开放共享和统筹管理，优化资产运行，保障智能调度，边缘算力提升能够实现云端算力资源分布式计算，通过核心算法模型，精准分析，高效处理，实现“即时交互”和“稳定安全运行”。数字技术在发电场景的应用，帮助解决电厂管理的高成本低效率问题，推动跨地域机组设备管理、全环节信息互联互通实现，助力多源协同、多能互补、供需互动的新型电力系统建设。

就输电场景来说，输电线路监测、电网数字巡检和智能调度是该场景典型实施方案。具体来说，数字技术可对架空输电线路设备本体、气象环境、通道状况等进行监测，通过在线监测装置向云端或控制中心传送数据，实现对架空输电线路运行状况定性或定量分析，并通过人工智能技术提高各类电网设备的异常识别准确性，降低误报、漏报率，提高电网异常诊断与响应时效性和检测水平；随着新型电力系统建设，风能、太阳能等清洁能源大比例接入电网，清洁能源的季节性和间歇性极大地影响电网的稳定性，传统的人工巡检难以管控和适应当前智能电网的发展需求，数字技术可以通过使用无人机针对网架间输电线路物理特性检查，并基于 5G 网络，在电力隧道等场景中采用高清视频对全线及重点区域设备运行状态和维护人员安全进行检测，为电网设备提供全程巡检，帮助打通电网巡线的数字通路、保证电网安全高效运转，实现电网设备延寿，保障整个系统的供电安全；而在大规模风光基地建设运营，电力供需呈现区域错配，大规模间歇性、波动性新能源发电设备并网背景下，跨区域电力调度成为电力系统管理的重点之一，而随之产生需处理的数据量呈现指数级增长，大型及超大型数据中心建设为海量电网运行数据提供稳定存储、高性能计算、精准分析的强大算力支撑。

就变电场景来说，智能变电站可实现变电站自主运行管理，延长设备使用寿命，降低资源消耗。受我国能源资源与负荷呈现逆向分布的影响，电力能源需要长线路、跨区域传输，需要合理

规划变电线路，解决网损线损等问题。数字技术搭建的云边协同，能够将算力赋能到端，智能实现数据的采集、过滤、存储、分析、挖掘等环节，对变电环节的安全隐患及异常状态的设备进行诊断预警，并完成自动检维修派单。先进的人工智能通过图计算、高级分析等技术可以对设备的历史运行状态及维修记录等进行深度学习，构建设备缺陷诊断及预测模型，对设备的运行状态进行全覆盖、全智能综合评估和预测。变电站巡检通过将可见光、红外光、传感器等基础技术搭载在不同载体上，采集非数字化设备的信息，替代人的现场采集感官；通过应用智能化数字设备完成信息采集上传，直接取代人员的现场巡视检查信息采集。多种数字技术与变电环节的融合，打造智慧大脑，实现预测性维护与变电设备寿命延长。

就配电场景来说，配网日常运营和自愈配网调控通过数字化智能化升级，加强常态情景下电网稳定性，实现精准负荷控制，提升配电效率。在配网日常运营层面，分布式电源接入、微电网、配电自动化等技术与电网深度融合，智能化监控提高供电稳定性，提升电网配电效率，实现高效运行。随着间接性新能源大比例接入、配电网充电桩、分布式能源等多主体接入，配电网负荷呈现非线性特点，电网调度与准确预测分析的难度加大。数字技术通过精准负荷控制解决电网故障初期频率快速跌落、主干通道潮流越限、省际联络线功率超用、电网旋转备用不足等问题，智能配电房高度融合云计算、物联网和大数据等技术，基于多方数

据协同的综合监测和管理平台，实时采集配电房内设备、环境的实时状态，并进行安全防控；实现用电管理、用电评估、电能分析、能耗管理功能；利用电力场景智能算法进行大数据分析，辅助决策，最终实现智能运维。配电网在稳定运营的基础上，也会面临故障应急情景，需要提高电网的自愈性。自愈配电网需在事故发生前，积极预测加固提高极端事件抵御力，发生时快速隔离故障设备或线路，精准定位故障及时抢修，发生后按照优先级按步骤恢复，提高配网恢复力，而针对自愈的三个阶段，数字技术可通过感知，对设备状态、环境量等配网系统内部运行状态和外部环境变化数据及用户用能状态数据等进行全面实时采集监测，为风险预测、故障定位和多阶段恢复提供支撑，通过大数据和机器学习应用，通过优化场景应用的算法模型，提升极端事件的预测精准度和针对故障应对策略的有效性。

就用电场景来说，在居民侧以智慧用电为典型实施方案，工商企业侧则以微电网建设为典型实施方案。就居民用电而言，智慧用电是以智能电表为基础，通过应用数据采集、数据管理、负荷智能控制等技术构建的智能计量系统，主要包括测量、收集、存储用户的用电信息以及异常分析。通过居民侧智慧用电实现用户数据实时采集监测、自动抄表、错峰用电、隐患检查、负荷预测等功能，减少居民线下缴费排队等，助力居民节能，实现居民用电碳排放下降。就工商企业而言，智慧楼宇、智慧园区等场景中，微电网或微能网应用实现了区域范围内的智慧用电。微电网

或微能网具有源网荷储一体融合特性，通过区块链、物联网、人工智能等数字技术，实现独立自治运营和电、热、气等多种能源灵活转换与协同互补，一方面有利于加强区域供电供能可靠性，另一方面也可以提升能源综合利用效率与能源服务质量。

3.3 数字技术行业对电力行业碳排放影响分析

从量化层面来讲，数字技术对电力行业的碳排放影响可通过投入产出法进行产业间关联分析，核算数字技术对碳减排的具体贡献。ICT 行业是数字技术发展的基础，ICT 行业对电力行业碳排放的贡献可以较为充分反映数字技术对电力行业双碳目标实现的影响。电力行业对数字技术行业的需求表现为它对 ICT 行业的投入（简称“数字投入”）。因此，选取 ICT 行业作为数字技术行业典型代表，结合电力行业数字投入，核算数字技术对电力行业碳排放效应。根据国民经济行业分类（GB/T 4754-2017）和数字经济及其核心产业统计分类（2021）标准，数字技术行业主要包括“信息传输、软件和信息技术服务”和“通信设备、计算机和其他电子设备”两个子类。

利用投入产出¹方法，不仅可以核算各部门的碳排放量，还可以将部门间的中间投入关系与碳排放水平产生关联，分析各部门中间投入对碳排放的影响，为各部门找到碳减排抓手提供新的思路。核算中的间接碳贡献量指某一行业为满足其他行业需求所产

¹ 投入产出表可以反映部门间的生产技术联系，可全面系统地反映国民经济各部门之间的投入产出关系，揭示国民经济各部门的产出情况，以及这些部门的产出是怎样分配给其它部门用于生产或怎样分配给居民和社会用于最终消费的。

生的碳排放量。利用该行业对其他行业的完全消耗系数矩阵与其对应行业的直接碳排放量²相乘计算得出。间接碳贡献率指某一行业每多排放 1 单位碳，其他行业将少排放的碳数量。间接碳贡献率的计算是某一行业间接碳贡献量与该行业直接碳排放量之比。数字投入水平³指某一行业数字投入在其总投入中的占比水平。数字投入水平的测度是利用“投入产出表-基础流量表”中该行业在数字行业的中间投入与该行业的总投入之比进行计算得出。

模型核算结果表明，随着电力行业数字投入水平上升，ICT 行业对电力行业的间接碳贡献呈扩大趋势。具体来说，与 2018 年相比，2020 年 ICT 行业对电力行业的碳贡献量增加约 2 倍，间接碳贡献率增加约 5 倍。从间接碳贡献量来看，相比于 2018 年，2020 年电力行业数字投入水平每提高 1%，间接碳贡献量上升 13.0%，2020 年，电力行业的数字投入水平为 0.89%，相比于 2018 年 0.75% 的数字投入水平，提高了 18.67%，同期 ICT 行业对电力行业的间接碳贡献量同比大幅上涨 243.75%。从间接碳贡献率来看，相比于 2018 年，2020 年电力行业数字投入水平每提高 1%，间接碳贡献率扩大了 20.5%。数据显示，2020 年电力行业的数字投入水平比 2018 年提高 18.7%，同时 ICT 行业对电力行业的间接碳贡献率达到 5.88%，相对 2018 年同比大幅上涨了 381.96%。电

² 直接碳排放量指某一行业生产过程中所消耗各种能源直接引发的碳排放量。通过将各类型能源的碳排放因子作为权重，加权加总该行业所消耗的各种能源量（如原煤、原油等），即可计算得到该行业的直接碳排放量。直接碳排放强度为单位产出所产生的直接碳排放量（行业直接碳排放强度=行业直接碳排放量/行业总产值）。

³ 说明：在数字投入水平测算中，数字行业指 ICT 行业，根据国民经济行业分类（GB/T 4754-2017）和数字经济及其核心产业统计分类（2021）标准，数字技术行业主要包括“信息传输、软件和信息技术服务”和“通信设备、计算机和其他电子设备”两个子类。

力行业通过扩大数字投入，可以提高生产和运营过程中的数字技术应用水平，比如模拟、监测整个运作过程，搜集行业信息和预测市场变化趋势，从而减少不必要的能耗与污染，降低碳排放。

数字技术对电力行业传统化石能源和新能源生产消费助力作用侧重点有所不同。针对现有传统化石能源，数字技术作用大多集中在提升各环节生产运营监测和智能巡检等运营效率。而对于新能源生产，由于大型风电场与光伏电站具有受天气影响较大，且地理位置相对偏远、分布较为分散等特性，同时上网电量也依赖电网对新能源电量消纳能力，因此数字技术除通过智能化设备巡检、电厂运维等提高有效发电量、延长设备使用寿命，减少能源及资源消耗外，更能通过精准预测、优化决策、远程控制、跨区域调度等方案提升电网整体响应度和稳定性，适应新能源占比大幅提升后的新能源体系运转。本报告按照政策指引对能源消费结构变化、数字技术演进速度和渗透率进行假设，预计至 2030 年碳达峰实现时，ICT 行业对电力行业的间接碳贡献率将达到 0.23，即 ICT 行业每多排放 1 单位碳，电力行业将少排放 0.23 单位碳，较 2020 年提升近 4 倍。

4. 未来展望与发展倡议

电力行业是关系国计民生的国民经济支柱产业，又是我国碳排放量最大的部门，电力行业的数字化低碳转型对实现双碳目标具有全局性意义。当前，国家相关部门在能源数字化智能化、清洁低碳、安全生产、构建新型电力系统等方面出台了系列政策，为能源电力行业发展及结构转型指明了方向。在数字技术与实体经济深度融合大背景下，电力行业利用数字技术实现自身数字化智能化转型升级，是把握新一轮科技革命和产业变革的机遇，也是落实国家双碳战略，实现行业自身高质量发展的选择。目前我国电力行业低碳转型尚存在诸多挑战，如新型电力系统稳定性、共性技术攻坚、市场机制等方面需不断完善和改进，倡议各方：

一是加强数据融合和企业碳数据披露。数字化时代，传统电力各场景的孤立形式正在逐步向各环节的相互耦合趋势发展，各场景数据深度融合有助于加快新型电力系统和源网荷协同发展。随着光伏、风电等清洁能源在电力系统中的比例增大，使得电力系统数据呈现更加异构化和复杂化的现状，为数据融合带来了挑战。目前多源异构数据融合的技术种类繁多，需进一步细化和明确电力行业不同应用场景对数据融合技术的需求，优化融合模型，推动数据更为高效、准确的融合。而碳排放信息是碳交易市场基础，真实准确的碳排放信息，将有助于提高碳交易市场的有效性和流动性，同时帮助金融机构和外部企业更好判断电力行业

的转型现状和可持续活动，有利于金融机构为电力行业获得更多的融资机会。目前对于企业碳数据披露质量有待进一步提升，随着国际国内监管的加强和规范，对于企业的碳排放信息和披露要求可能越来越高，企业要提高意识并加强披露碳数据，为企业获得更多的主动权和选择权，助推企业低碳转型。

二是加快推动电力行业与数字技术的深度融合。随着电力行业的低碳转型发展逐步推进，清洁能源带来了电网的不稳定性、电力系统的安全性等诸多问题，对信息技术、控制技术等有了更高要求，数字技术与电力行业的深度融合任务艰巨。一方面，虽然在数据实时采集与精准计量监测水平以及安全智能防护层面，电力行业在不断加强数字技术的应用，但随着新型电力系统的复杂化，对系统安全保护和电力装备智能传感等共性技术有了更高的技术需求。数字技术提供方可以逐步提升攻破共性技术的能力，为融合发展提供有力技术支撑，分环节、分阶段补齐转型发展短板，加速电力行业转型升级。另一方面，在数据要素激活、流通和使用过程中，需进一步加大数字技术的融合力度，应对清洁能源电力比重不断提高带来的新挑战。可以以清洁能源在发电中高占比为核心场景，加强智能电网技术的应用和发展，提高我国电网的稳定性和安全性，推进我国电网的数字化和智能化转型。

三是进一步加强完善碳市场交易机制。目前我国碳市场覆盖行业和参与主体较为单一，主要以电力行业为主，其他行业在碳

市场交易中参与度较低。碳市场交易能够有效推动碳资源高效配置，虽然电力行业为我国碳排放主要来源，但电其他行业的参与也对我整个碳市场交易有巨大影响。需纳入更多的经济体和企业，进一步盘活市场，降低碳市场交易的成本。随着国家大力支持金融系统绿色低碳发展，各大商业银行、基金、信托等业务开始逐步涉及绿色金融领域，但在碳市场交易中参与度有待提升。需加大力度鼓励金融机构参与到碳市场交易中，提高碳市场交易的活跃度和透明度，推动碳市场交易机制更加完善。

缩略语列表

缩略语	英文全名	中文解释
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change	联合国政府间气候变化专门委员会
CBAM	Carbon Border Adjustment Mechanism	碳边境调节机制
IEA	International Energy Agency	国际能源署
WRI	World Resources Institute	世界资源研究所
CCUS	Carbon Capture, Utilization and Storage	二氧化碳捕集、利用与封存技术
MRV	Monitoring Reporting Verification	温室气体排放可监测、可报告、可核查体系
CDP	Carbon Disclosure Project	碳披露项目
CEA	Chinese Emission Allowances	中国碳排放配额
CCER	Chinese Certified Emission Reduction	中国核证自愿减排量
ICT	Information and Communications Technology	信息通信技术

参考文献

- [1] 艾瑞咨询. 中国电力产业数字化研究报告[R]. 2022.
- [2] 安永（中国）企业咨询有限公司，华为技术有限公司. 电力数字化 2030[R]. 2022.
- [3] 查冬兰，陈倩，王群伟. 能源回弹效应最新研究进展：理论与方法[J]. 环境经济研究，2021(01):182-203.
- [4] 国家电网. 新型电力系统数字技术支撑体系白皮书[R]. 2022.
- [5] 国家能源局. 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[EB/OL]. 2023-03-28.
https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2023-04/02/content_5749758.htm
- [6] 国网能源研究院有限公司. 能源数字化转型白皮书（2021）[R]. 2021.
- [7] 清华可持续发展研究院. 中国长期低碳发展战略与转型路径研究[M]. 环境出版社. 2021.
- [8] 深圳市计量质量检测研究院. 国内外碳足迹标准现状研究报告[R]. 2022.
- [9] 王皓菡. 基于投入产出法的重点工业行业碳排放核算研究[D]. 北京化工大学. 2023.
- [10] 易子榆，魏龙，王磊. 数字产业技术发展对碳排放强度的

影响效应研究[J]. 国际经贸探索, 2022(04):22-37.

[11] IEA. 中国能源体系碳中和路线图[R]. 2021.

[12] IMT-2030 (6G) 推进组. 6G 典型场景和关键能力[R]. 2022.

[13] IPCC. AR6 Synthesis Report: Climate Change 2023[R]. 2023.

附录：模型核算说明

(1) 直接碳排放

直接碳排放量反映某一行业生产过程中所消耗各种能源直接排放的温室气体量。

$$Q_{1j} = \sum_{k=1}^n \theta_{jk} E_{jk}$$

其中， Q_{1j} 为 j 行业的直接碳排放量， θ_{jk} 为 j 行业消耗的能源 k 的碳排放因子， E_{jk} 为 j 行业行业生产过程中能源 k 的消耗量。

$$D_j = \frac{Q_j}{Y_j}$$

其中， D_j 为 j 行业的直接碳排放系数， Q_j 为 j 行业的直接碳排放量， Y_j 为 j 行业的总产出值。

(2) 间接碳贡献

间接碳贡献量反映某一行业对其他行业间接排放的温室气体量总和，需要采用投入产出分析法，结合该行业对其他行业的完全消耗系数矩阵计算得出。

$$a_{ij} = \frac{Y_{ij}}{Y_j}$$

其中， a_{ij} 为直接消耗系数，即生产单位 j 行业产品对 i 行业产品的直接消耗量， Y_{ij} 为行业 i 对 j 行业的总投入。

$$b_{ij} = a_{ij} + \sum_{k=1}^n b_{ik} a_{kj}$$

其中， b_{ij} 为完全消耗系数，即生产单位 j 行业产品对 i 行业产品的完全消耗量，除了生产单位 j 产品对 i 产品的直接消耗量 a_{ij} 外，还包括生产

单位 j 行业产品过程中 i 行业间接投入的消耗量。

$$I_j = \sum_{k=1}^n D_k b_{kj}$$

其中， I_j 为是 j 行业单位产出的间接碳贡献系数， D_k 为是 k 行业单位产出的直接碳排放系数， b_{kj} 为投入产出表中 j 行业对 k 行业的完全消耗系数， $D_k b_{kj}$ 是为保证 j 行业单位产出产品的生产，所需 k 行业的间接碳贡献系数，也成为 j 行业对 k 行业的碳排放拉动系数。

$$Q_{2j} = Q_{1j}B$$

其中， Q_{2j} 为 j 行业的间接碳贡献量， B 为投入产出表中 b_{kj} 完全消耗系数矩阵。

(3) 完全碳排放

$$TQ_j = Q_{1j} + Q_{2j}$$

其中， TQ_j 为 j 行业的完全碳排放量，反应 j 行业的碳排放总量。