

· 专题:双清论坛“面向双碳目标的自动化和智能化理论与技术” ·

# 数字基础设施绿色低碳发展中的关键科学问题与建议\*

管晓宏 徐占伯\*\* 吴江 刘亚萍 刘晋辉

西安交通大学 自动化科学与工程学院,西安 710049

**[摘 要]** 数字基础设施是发展数字经济的重要载体,数字基础设施的深入推进促使数字技术与社会全方面深度融合,推动数字经济规模快速增长。千行百业的数字转型,将带来算力和通信需求激增,数字基础设施能源需求增长不可避免。如何使数字基础设施的能源需求增长与其碳排放增长脱钩,是“数字中国”与“碳中和目标”协同发展的关键。本文依据数字中国建设总体要求与全局部署,梳理目前数字基础设施绿色低碳发展现状与挑战,提炼数字基础设施绿色低碳发展中的关键科学问题,探讨数字经济发展与数字基础设施碳排放脱钩的技术路径,融合创新设计和推广应用的机制与制度保障,进而提出支撑国家数字基础设施绿色低碳发展路径和建议。

**[关键词]** 数字经济;数字基础设施;绿色低碳;科学问题

## 1 数字基础设施绿色低碳发展的重大意义

近年来,数字经济已成为继农业经济、工业经济之后的主要经济形态,2023年5月发布的《数字中国发展报告(2022)》<sup>[1]</sup>显示,我国数字经济规模在2022年已达到50.2万亿元,稳居世界第二,数字经济已经成为我国推进经济高质量发展的主引擎之一。

在数字经济发展的宏观背景下,算力作为释放数据价值、激活数据潜能的关键驱动力,已经成为数字经济的核心生产力与支撑经济增长的新引擎。从智能驾驶、智慧城市、元宇宙,再到以ChatGPT为代表的生成式人工智能,算力正成为赋能各行各业数字化转型的基础技术要素<sup>[1]</sup>。随着数字经济的蓬勃发展,算力逐渐由互联网行业向交通、工业、金融、政务等行业渗透,各行业对算力资源的需求持续高涨<sup>[1]</sup>。在此背景下,充足稳定的算力资源供给不仅是数字技术进一步迭代的前提条件<sup>[1]</sup>,亦成为支撑数字经济发展的关键动力。

数字基础设施被视为建设区域数字经济的重要支柱和核心中枢,其对于促进经济增长、推动出口贸



**管晓宏** 系统工程学家,中国科学院院士,教授、博士生导师,西安交通大学电子与信息学部主任、智能网络与网络安全教育部重点实验室首席科学家。主要从事复杂网络化系统的经济性与安全性,电力、能源、制造系统的优化,信息物理融合系统,网络空间安全等领域的研究。



**徐占伯** 教授,博士生导师,西安交通大学自动化学院党总支书记。主要从事网络化系统工程理论与应用、氢赋能零碳智慧能源系统结构设计和系统优化、信息物理融合能源系统等领域的研究。国家自然科学基金优秀青年科学基金获得者。

易、实现产业结构升级、提升创新能力和全要素生产率具有积极作用,是数字中国的基础底座。相对于铁路、公路等传统基础设施,数字基础设施是指包括5G、数据中心、物联网和工业互联网等以数据创新为驱动、通信网络为基础、数据算力设施为核心的新型信息数字基础设施体系。截至2022年底,我国累计建成5G基站231.2万个,5G用户达5.61亿户,全球占比均超过60%。移动物联网终端用户数达到18.45亿户,成为全球主要经济体中首个实现“物

收稿日期:2023-12-27;修回日期:2024-07-30

\* 本文根据国家自然科学基金委员会第324期“双清论坛”讨论的内容整理。

\*\* 通信作者,Email: zbxu@sei.xjtu.edu.cn

本文受到国家自然科学基金重大项目(62192750)的资助。

超人”的国家。数据中心机架总规模超过 650 万标准机架,近 5 年年均增速超过 30%,在用数据中心算力总规模超 180EFLOPS,位居世界第二。

数据显示,数据中心的电力能耗主要来源于信息技术(Information Technology,IT)设备、制冷设备、供配电系统和照明等其他设备的能源消耗,其电力成本占运营总成本的 60%~70%<sup>[2]</sup>。2022 年,我国所有数据中心的耗电量约 2 700 亿千瓦时,超过 2 座三峡水电站的年发电量。如图 1 所示,预计到 2026 年,我国所有数据中心所需年耗电量至少达到 6 000 亿千瓦时,数据中心耗电量占我国用电量比重预计将从 2016 年的 1.86% 增长至 2026 年的 6.06%<sup>[3]</sup>。

随着数字经济发展,人工智能和产业数字化等多样化的算力需求场景不断涌现,预计 2022 年至

2032 年全球人工智能市场规模的复合增长率高达 42%,2032 年达到 1.3 万亿美元<sup>[4]</sup>。同时,华为公司在《智能世界 2030》<sup>[5]</sup>报告中提到,预计 2030 年终端连接数量将达到 2 000 亿,通用算力增长 10 倍,人工智能算力增长 500 倍,全球数字业务的流量需求将是 2020 年的 13 倍。如图 2 所示,据预测,2026 年我国算力总规模将进入每秒 10 万亿亿次浮点运算时代,达到 767 EFlops<sup>[6]</sup>。随着各领域对智能算力需求的不断增长,我国的算力结构也在持续演变,如图 3 所示。尽管基础算力呈现稳定增长态势,但预计其在总算力规模中的比重将从 2016 年的 95% 下降至 2026 年的 26%。与此同时,智能算力在总算力规模中的比重将从 2016 年的 3% 上升至 2026 年的 73%<sup>[6]</sup>。

另一方面,大模型人工智能的快速发展加速了人



图 1 2016—2026 年我国数据中心耗电量及其耗电量占我国用电量百分比

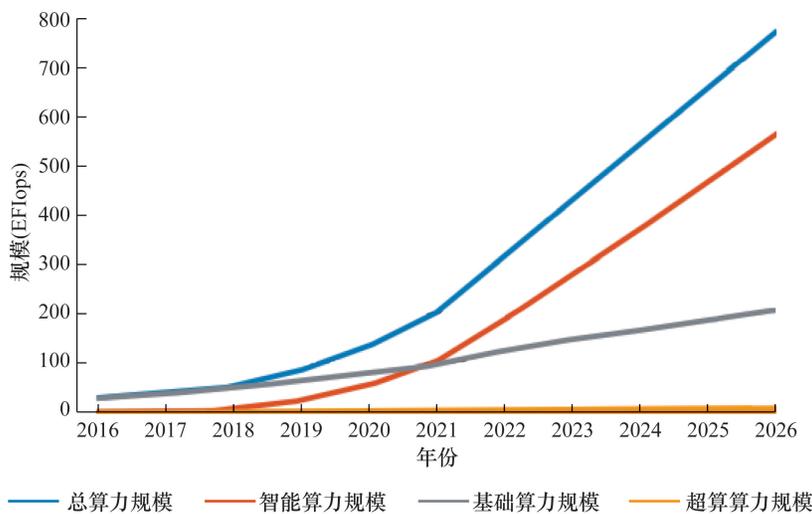


图 2 2016—2026 年我国算力发展规模与趋势

工智能场景的落地与推广,面向智算的新一代数据中心(Artificial Intelligence Data Center, AIDC)成为承载 AI 算力的关键底座,加速推动数据中心向智算中心演变<sup>[4]</sup>。智算中心主要依托 GPU (Graphics Processing Unit)架构服务器,其单台服务器的功率可超过 10 kW,而传统数据中心单台服务器的功率一般在 1 kW 左右。智算中心单机柜的功率可达 30 kW 甚至更高,远超传统数据中心的 4 kW~8 kW。此外,截至 2023 年 5 月,我国已发布了 79 个 10 亿级参数规模以上的大模型<sup>[6]</sup>。生成式人工智能模型通常包括训练和推理两个阶段。训练阶段往往是最耗能的阶段<sup>[7]</sup>,据 Hugging Face 报告,其 BigScience 大型开放科学开放访问多语言 (BigScience Large Open-science Open-access Multilingual language model, BLOOM)模型在训练期间消耗了 433 MWh 的电力<sup>[8]</sup>。推理阶段的能

源需求也不容忽视,以 OpenAI 的 ChatGPT 为例,据研究公司 SemiAnalysis 的数据显示,OpenAI 需要 3 617 台英伟达 HGX A100、共 28 936 个 GPU 来支持 ChatGPT 的推理,每天需要消耗 564 MWh 电力<sup>[9]</sup>。如图 4 所示,预计到 2030 年,数字基础设施能耗将占全球总能耗的近 20%,如果按当前算力和通信设备能效水平的自然演进,所对应的碳排放量将是现在的 3 倍以上<sup>[10]</sup>,直接影响碳中和目标的实现。

综上,我国算力需求总体呈爆炸式增长趋势,高能耗问题较为突出。不仅如此,我国算力发展还面临资源供需失衡、协同使用效率不足等方面问题,这些都制约了算力的绿色低碳转型<sup>[6]</sup>。面向国家碳中和战略目标对经济发展提出的新要求,数字基础设施的绿色低碳发展是必然选择,如何使数字基础设施高速发展与其碳排放增长脱钩,已成为“数字中国”与“碳中和目标”协同发展的关键。

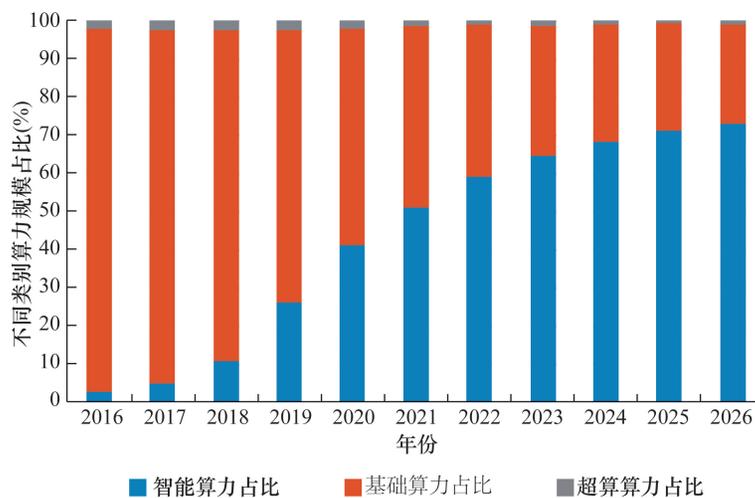


图 3 2016—2026 年我国算力发展结构演变

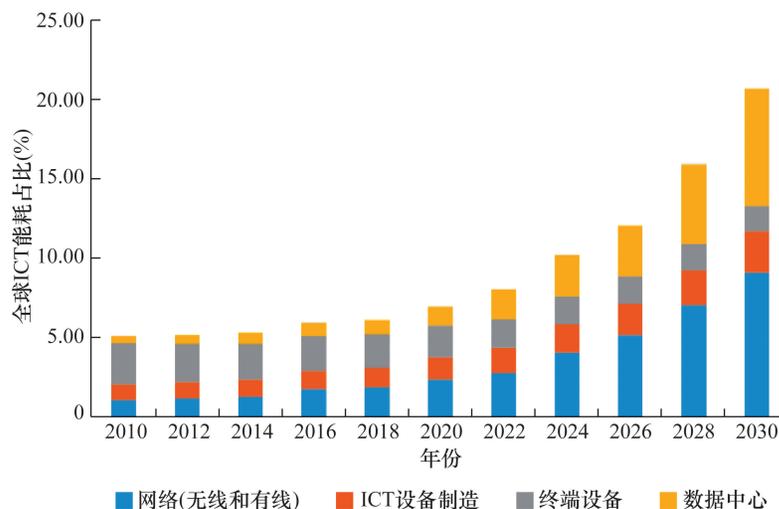


图 4 近 20 年全球 ICT 能耗占比

## 2 数字基础设施绿色低碳发展现状与挑战

### 2.1 数字基础设施绿色低碳发展现状

为应对数字经济面临的高能耗和高碳排挑战,国内外学术界和产业界近年来不断研究与探索数字基础设施绿色低碳发展的解决方案,取得了较为显著的研究成果。一个典型数字基础设施系统主要由 IT 设备、供电系统和制冷系统等辅助设备构成,其中,IT 设备能耗和制冷设备能耗占数字基础设施总能耗的近 80%。因此,当前针对数字基础设施绿色低碳发展的研究可以按照数字基础设施的三个关键组成部分划分:IT 设备能效优化、供电系统能效优化和制冷系统节能管控。

#### 2.1.1 IT 设备能效优化

数据中心的 IT 设备包括计算部分、存储部分和网络通信部分,是数据中心的核⼼设备,其能耗占比约 50%<sup>[11]</sup>。目前,学术界和产业界均对数字基础设施 IT 设备的能效优化进行了大量研究,表 1 列出了几种典型的针对 IT 设备能效优化的方法与技术,包括:

**硬件升级:**通过采用高效能处理器、固态硬盘(Solid State Drives,SSD)以及高效能网络设备等硬件,可以显著提高 IT 设备的能效<sup>[12]</sup>。硬件升级不仅在于更换核心组件,还包括优化电源管理系统和散热系统。高效能处理器能够在提供更强大计算能力的同时,保持较低的能耗。

**动态电压频率调节(Dynamic Voltage Frequency Scaling,DVFS):**基于 CPU 运行频率、工作电压和 CPU 利用率之间的定量关系调整服务器能耗。DVFS 技术通过动态调整处理器的工作参数,不仅能够有效降低能耗,还可以延长设备的使用寿命。通过大量测试和生产应用,DVFS 已证明在各种工作负载下都能显著提升能效,特别是在云计算和大数据处理环境中具有广泛的应用前景<sup>[13,14]</sup>。

**负载调度管理:**负载调度管理基于数据中心的时空灵活性进行调度,在满足计算任务对计算资源和数据资源需求的条件下,可以按照一定目标调整工作负载的处理计划。负载调度管理通过优化资源分配和利用,提高了服务器的使用效率,减少了在高峰期的能耗压力<sup>[15]</sup>。

**虚拟化技术:**虚拟化技术通过将多个虚拟机运行在一台物理服务器上,提高服务器的资源利用率,减少空闲服务器的数量,从而降低整体能耗。虚拟化技术不仅提高了硬件的使用效率,还通过隔离不同的工作负载,减少了资源争用和性能下降的问题<sup>[16]</sup>。

#### 2.1.2 供电系统能效优化

供电系统作为数字基础设施的关键组成部分,提供不间断的优质电力,以确保 IT 设备的正常运行。目前,传统供电架构通常由市电作为主供电线路,柴油发电机组作为备用电源。然而,由于约 70%的电力供应依赖于煤炭,这导致数字基础设施的用电会产生大量碳排放,不利于实现绿色低碳发展的总体目标。在电气工程领域,现有研究主要围绕供电设备的优化设计展开(数据中心典型供电架构见表 2),通过优化供电架构和供电设备的拓扑及控制方法,以提升供电效率并减少供电损耗。目前,交流供电系统的供电效率已达 96%左右<sup>[17]</sup>。全直流供电架构是未来供电系统发展的一个重要方向,该架构利用 10 kV 电力电子变压器,输出±375 V 的直流电,从而减少交直流转换环节,提高供电效率<sup>[17]</sup>。

引入可再生能源能够显著降低碳排放,因此提升可再生能源利用率是数字基础设施供电系统提高能效的另一重要发展方向<sup>[18]</sup>。通过打造以清洁高效为目标、以电能替代为重点、风光氢多种能源协同互补、供储需多种形式互联互通的供能模式,能够有效缓解电网压力,降低数字基础设施碳排放<sup>[19]</sup>。

表 1 IT 设备能耗优化技术

优化技术	应用场景	优点	缺点	参考文献
硬件升级	需要高性能且低能耗的计算环境	提高性能,降低能耗	硬件升级成本较高	
动态电压频率调节(DVFS)	普通服务器能耗管理	快速响应,灵活调整服务器能耗	需要硬件支持和复杂的管理策略	[13, 14]
负载调度管理	大规模数据中心,多任务环境	提高资源利用率,降低高峰时段能耗	需要复杂的调度算法和实时监控系 统	[15]
虚拟化技术	需要整合多种工作负载的数据中心	提高资源利用率,减少物理服务器数量	可能导致资源争用和性能下降	[16]

此外,通过基于电力市场价格信号的算力—电力协同调度、制定储能设备的充放电调度策略以及搭建风光氢新能源并网运营机制等方式<sup>[20-22]</sup>,数字基础设施不仅可以成为一个负荷可变、可调、可用的综合能源复合体,还可以动态调整供储能策略,实现智能削峰填谷,提高新能源管理水平。

2.1.3 制冷系统节能管控

IT 设备在运行过程中几乎将所有电能转化为热量,释放到机房环境中。过高的环境温度会影响 IT 设备的性能,甚至带来安全隐患。为了确保 IT 设备安全、稳定、可靠地运行,制冷系统消耗了近 40% 的数字基础设施总能耗,以维持运行环境在特定的温湿度范围内<sup>[23]</sup>。因此,制冷系统的节能管理对数字基础设施的绿色低碳发展至关重要。引入新型制冷技术以辅助、替代或改造传统制冷系统的各个组件,是降低数字基础设施制冷系统能耗的主要技术途径<sup>[24]</sup>。

随着算力需求的增长,未来 IT 设备功率将向高密化演进,相比传统风冷末端,液冷单位体积散

热能力强,因此,利用液冷技术对于提升数字基础设施制冷系统末端能效具有可观的发展潜力,特别是在承担 AI 训练和推理任务的智算中心以及超算中心等高功率密度场景具有广阔的应用前景。常见的数字基础设施末端液冷方式如表 3 所示,液冷技术均能实现 1.2 以下的 PUE (Power Usage Effectiveness),能效提升效果明显。另外,在新建智算中心和现有老旧数据中心改建的场景下,考虑到不同通算和智算设备的比例、改造难度等问题,风液混合的末端方式能够很好地满足不同功率密度下的制冷需求并降低运营成本<sup>[25]</sup>。

传统的机械制冷系统不仅能耗高,还会产生大量的二氧化碳排放。因此,数字行业逐渐将目光投向更加环保和高效的自然冷却技术。自然冷却技术利用自然界的冷源,如冷空气、冷水和地热等,通过适当的设计和配置,将这些冷源引入数据基础设施,以降低机房温度。自然冷却技术有效利用自然冷源,从而减少了对机械制冷设备的依赖,降低了冷水机组的功率,从而能够显著降低制冷系统总能耗。表 4 展示了目前数字基础设施常见的自然冷却方式<sup>[26]</sup>,尽管自然冷却技术具有显著优势,但其应用仍面临自然冷源具有不确定性和地域限制的挑战,因此,提升自然冷却时长是确保自然冷却技术节能效果的关键因素。

表 2 数据中心典型供电架构

数据中心供电架构类型	常见类型
交流 UPS 供电架构	市电+UPS 架构、UPS 2N 架构
高压直流供电架构	240V 2N 架构、市电+240V 架构
中压直供集成式供电架构	巴拿马电源

表 3 数字基础设施末端液冷方式

分类	液冷技术	PUE 范围	优势与局限性
间接液冷	冷板式	1.2 以下	与现有设备兼容性好,成本较低。但制冷与节能效果不如直接液冷,且有冷却液泄露风险
直接液冷	喷淋式	1.1 左右	空间利用率高,散热均匀,节省冷却液。节能效果不如浸没式液冷,局限性与浸没式液冷类似,目前应用较少
	单相浸没式	1.1 以下	制冷与节能效果好,适用于高功率密度的场景,噪音小。但是成本较高,对于建筑的承重有更高的要求,系统的维护也更为复杂。
	相变浸没式液冷	1.1 以下且低于单相浸没式液冷	

表 4 数字基础设施常见自然冷却方式

分类	自然冷却技术	方法	优势与局限性
直接自然冷却	自由冷却	将自然界冷风、冷空气直接引入数据中心	节能效果好,但外界环境要求较高
	直接蒸发冷却	利用水的蒸发降低送风温度	节能效果好,但会导致数据中心内部湿度升高
间接自然冷却	间接蒸发冷却	利用换热器将直接蒸发冷却后的低温空气和数据中心内部回风进行换热	与外部环境隔离,不影响湿度,但对外部温湿度要求较高、设备占地面积大。
	轮式热交换器	利用轮式热交换器与外界换热	换热效率高,维护成本高无法彻底隔绝污染物对内部环境的影响
	热管背板 <sup>[27]</sup>	将热管安装在机柜背部	换热效率高,价格高昂,安装复杂

数字基础设施在运行过程中会产生大量的余热,如果能够有效回收并加以利用,不仅可以提高能源利用效率,还能降低运营成本和环境影响。因此,在制冷系统的远端使用余热回收作为节能方案,以供热网络的终端用户作为热汇,通过热通道将IT设备产生的热量定向用于其他设施,能够有效利用数据中心余热<sup>[28]</sup>。在未来智算、超算等功率密度激增的应用场景下,数字基础设施的余热回收潜力将进一步提升。通过设计考虑不同余热品位和用户侧用热需求的余热回收结构,利用数据中心不同来源的余热(如热通道空气、冷却水、冷却剂等)为不同的应用场景(办公楼、住宅等)供热,能够为数据中心提供远端的节能方案<sup>[29]</sup>。

## 2.2 数字基础设施绿色低碳发展面临的挑战

目前,我国数字基础设施绿色低碳发展面临能耗特性复杂、清洁能源渗透率较低、业务需求随机性较高等问题,可以概括为供能结构设计、算力电力协同、算力业务降碳三个层面的挑战。

(1) 数字基础设施低碳化结构创新与智能性设计。首先,数字基础设施高电耗、高冷耗、高低位余热产出的负荷特性与建筑等常见现有有用能设施的负荷特性差异较大,该特性对低碳化供能结构提出新的设计要求。其次,数字基础设施算力运行的高稳定性要求导致了高可靠性要求,然而,现有风光等零碳能源以其固有随机性难以实时供应,备电备冷结构需要进行创新性设计与分析。

(2) 需求多样性和时空多尺度耦合下的算力电力协同。电力供应和算力需求两侧均具有高不确定性和时空多尺度耦合特性,算电协同需要综合电源、电网、算力、通信等数据资源,充分发挥数据要素倍增作用,整合电网承载能力、算力跨区域调度能力、高可靠保障通信能力,构建算力电力协同网络,打造电、算、存、运一体化网络的数字底座,实现电力、算力资源的全局调配与跨域互动。

(3) 算力中心业务模式的低碳化演进。面对日益增长的数据计算需求,构建更高效、更低能耗的计算模型成为解决算力能耗爆炸性增长与探索算力低碳化的关键。同时,通过构建以绿电为主力电源、算力为主要负荷的绿电—算力微网,制定供需适配的算力调配模式和业务编排策略,也是推动算力低碳化研究的重要技术路径。此外,明确算力中心业务对支撑行业的赋能作用,以及实现高效算力赋能的行业碳足迹测算,也是系统层面对算力低碳化途径

进行深入分析的重要挑战。

## 3 实现数字基础设施绿色低碳发展的关键研究方向

### 3.1 绿色能源对数字基础设施的接入问题

#### 3.1.1 绿色能源技术在数字基础设施应用的市场机制设计

基于数字基础设施建设的市场导向原则,剖析绿色能源技术市场化应用的生态主体角色和市场地位,明确各市场主体对于该技术应用的目的、偏好、风险承受力、资金供给水平以及收益分配方式等,从而确定各主体在市场导向环境中的差异性及其价值活动。基于不同数字基础设施主体市场交互关系辨识不同阶段绿色能源技术应用的生态演进规律,从而为技术应用与改进提供具体应对措施。在此基础上,结合绿色能源技术应用经济性评估,从价值创造、风险承担及多样性需求等角度设计参与主体的利益分配机制,以市场导向下的合理利益分配机制来激励绿色能源技术在数字基础设施建设过程中的深入推广应用。

#### 3.1.2 绿色能源技术在数字基础设施应用的制度设计

从数字基础设施建设的市场导向机制出发,重点剖析政府层面数字基础设施建设中绿色能源技术创新引导政策的形成机制与执行效率,分析市场导向与政府引导对数字绿色化技术协同发展的耦合模式、机理与效果,明晰绿色能源技术在数字基础设施建设中的创新发展方向。从管理、制度法规、标准规范等多角度识别我国现有数字基础设施建设中绿色能源技术发展存在的问题,并探索市场导向下绿色能源技术创新生态系统构建的数据保障、基础设施保障和法律制度保障措施,从而为完善数字基础设施建设中市场导向下的绿色能源技术创新体系制度建设提供依据,支撑数字经济发展与数字基础设施碳排放脱钩的技术路径探索。

#### 3.1.3 绿色能源技术在数字基础设施应用的战略布局和实现路径设计

基于数字绿色化协同发展系统视角,从数字基础设施建设中技术研究、政府推进、行业发展、社会应用等方面,梳理分析当前经济社会数字发展对绿色能源技术创新应用的需求。结合前述市场应用机制与发展制度设计,立足绿色能源技术创新和应用深化,解析实现数字基础设施建设过程中绿色能源

技术创新的多层面、多阶段、多环节衔接、协同和共创机制的重构方式。从宏观和微观等不同层面设计并规划国家数字绿色化协同发展蓝图和战略布局，并基于社会系统高质量发展的未来趋势研判，设计绿色能源技术助力数字基础设施发展的实现路径，并提出多类典型情景下的应对策略。

### 3.2 算力网、通信网、能源网的协同规划问题

#### 3.2.1 “东数西算”战略下的多元算力科学布局

在实现数字基础设施绿色低碳发展的过程中，算力网的科学布局至关重要。算力网的绿色高质量发展应充分统筹算力需求、能源供给和算力、电力网的综合承载能力，在多元算力科学布局、算力服务普惠易用的前提下，实现算力网、通信网、能源网的协同规划。首先，多元化的算力科学布局需要充分考虑区域特点和资源分布。在我国“东数西算”战略下，可以根据不同地区的资源禀赋和发展需求，合理规划和布局算力设施。在京津冀、长三角、粤港澳大湾区等人口密集、实时计算需求大的区域，建设数据中心集群来满足实时要求高的业务，充分利用现有的电力和通信基础设施；而内蒙古、贵州、甘肃和宁夏等自然资源丰富的区域，可以部署数据存储、离线分析等实时性要求较低的服务。其次，多元化的算力科学布局需要考虑云计算、人工智能、物联网等领域的多样化算力需求。根据应用场景的特点，合理规划和配置算力资源可以提高能源利用效率和降低碳排放。在对实时性要求较高的应用场景，可以将算力资源部署在靠近用户的边缘节点上，减少数据传输距离和能源消耗；在对实时性要求较低的应用场景，可以将计算资源配置为弹性计算服务，根据需求动态分配和释放资源。此外，多元化的算力科学布局还需要充分考虑算力设备的能效和能耗。通过推动研发和应用新型节能技术，如液冷技术、动态功率管理等，进一步提高算力设备的能效水平。

#### 3.2.2 风、光、氢等绿能的适用性规划

实现数字基础设施绿色低碳发展的关键之一是确定和规划适用的绿色能源，包括风能、太阳能、氢能等。使用风、光等可再生能源是构造绿色能源网的必要条件，需要评估不同地区的风能和太阳能资源分布情况，确定适合建设风电场和光伏电站的地理位置，构建可再生能源网。但是以风、光等为代表的可再生新能源具有高波动性、高间歇性、高不确定性的特征，制约了新型能源系统的安全稳定运行和可再生新能源渗透率的提高。同时，可再生新能

源往往在不同时间尺度上体现不同的波动特性，且其出力与用户需求并不匹配制约了系统综合能效的提高。因此，储能技术是可再生能源利用的关键。氢能作为一种绿色无污染的二次能源，可通过电解槽由电能转化而来，所产生的氢可以通过燃料电池转化为电能和热能，或存储在储氢罐中，可以平抑可再生新能源供需在季节、日间等不同时间尺度上的不平衡。在能源网中，各能源设备的规划和配置是实现高效能源管理和可持续发展的关键。在规划过程中，需要综合评估不同绿色能源的可获得性、成本效益和环境影响，以确定最佳的能源组合方案。

#### 3.2.3 算力网、通信网、能源网—“三网合一”的一体化结构

“三网合一”指的是将算力网(计算能力)、通信网(通信能力)和能源网(能源供应)三个关键基础设施进行一体化结构的创新。这种一体化结构的构想旨在实现数字社会的高效、可持续发展，为未来的信息社会提供强大的支撑。首先，算力网是计算能力的网络化整合。通过将计算资源集中管理和共享，实现算力网的一体化架构，可以提高计算资源的利用效率和灵活性。这种架构可以通过虚拟化、分布式计算等技术，将计算能力从传统的单机环境转移到云端，实现资源的弹性调度和高效利用。其次，通信网是通信能力的网络化整合。通过整合不同的通信网络，如移动通信网络、固定宽带网络和物联网等，可以实现互联互通、无缝漫游等功能，提升用户体验和网络覆盖范围。此外，一体化通信网还可以支持更高速的数据传输，满足日益增长的数据需求。最后，能源网是能源供应的网络化整合。能源是数字基础设施运行的重要支撑，而能源网的一体化结构可以实现能源的高效管理和可持续发展。通过智能化的能源供应系统，如智能电网和可再生能源的集成，可以实现能源的优化分配和灵活调度，降低能源浪费和碳排放。“三网合一”的一体化结构是数字基础设施发展的重要趋势。通过整合算力网、通信网和能源网，实现资源的共享和优化利用，可以提高数字社会的效率和可持续性。这种一体化结构将推动数字基础设施的协同发展，为创新和经济增长提供强大的支持。

### 3.3 数字基础设施的综合碳效提升

#### 3.3.1 全面厘清数字基础设施相关碳排放

基站、数据中心等数字基础设施碳排放主要集中在运行阶段，绿电供能以及液冷等节能技术的接

人对于降低该阶段的碳排放初具成效,但对于数字基础设施行业全方位降碳任务依然艰巨。若要实现数字基础设施综合碳效提升,建议行业遵循世界资源研究所发布的核算导则,该导则按照温室气体排放来源的不同,将排放划分为范围1~3。这样做的好处是,全面厘清数字基础设施相关碳排放,为其碳效提升提供数据支持。

对于数字基础设施而言,范围1排放指数字基础设施边界内的直接温室气体排放,如数字基础设施使用空调设备过程中产生的氢氟碳化物,是数字基础设施的直接排放;范围2排放指外购电力等二次能源的加工转换过程排放,是数字基础设施的间接排放;范围3排放指除范围1和范围2的所有间接排放,包括价值链上游和下游的排放,如数字基础设施在生产制造以及建设过程中所涉及的原材料碳排放、废弃数字基础设施外处理处置排放。同时还要减去绿电供能减碳量、数字基础设施配套绿植碳汇以及材料回收利用的减碳量。遵循该核算导则,可系统评估数字基础设施材料和设备生产、运输、建设和运营所导致的碳排放,对其碳排放进行科学量化。

### 3.3.2 数字基础设施综合碳效提升技术评估

在全面厘清数字基础设施碳排放的基础上,应将其进一步升级为数字基础设施综合碳效提升技术评估。原因在于,数字基础设施不同阶段存在着不同的边际减碳潜力。对数字基础设施综合碳效提升技术评估,平衡其不同阶段减碳技术的资金投入,能以更经济的方式充分挖掘期碳减排潜力。具体评估方法可表述为根据数字基础设施时空分布以及不同算力具体场景下,计算其在绿色选址、低碳建材与绿色施工、绿色灵活供能以及冷板式、浸没式、喷淋式等液冷节能技术选用方面的减碳量以及对应经济成本。这样的好处是,可在数字基础设施前期设计时纳入低碳需求和目标,使其在设计、施工以及运维全称深入落实,避免后期节能降碳技术堆叠,真正的做到从源头降碳,更有利于数字基础设施行业低碳经济发展。

### 3.4 数字基础设施绿色赋能

数字基础设施行业需要关注上下游产业链全生命周期碳排放的削减;通过能力外溢,在千行百业的“碳中和”目标达成中发挥应有的作用。数字基础设施以不同的身份融入千行百业,那么数字基础设施

绿色赋能技术不仅可以提高各行各业的生产和生活效率,更能催化形成绿色转型方案和新商业模式。数字基础设施绿色赋能的本质是充分利用各领域数据,通过海量数据的综合应用优化机器和生产过程效率,提高能效,降低排放。数字基础设施为千行百业提高绿色发展中的设备连通性、生产高效性、施策精准性提供全链条支撑。

此外,将数字基础设施余热供暖、用电需求响应、多能互补综合储能等外延能力纳入数字基础设施前期规划设计范畴,是着力打造数字基础设施绿色赋能千行百业的基座,对积极构建算力网通信网等数字基础设施绿色赋能机制具有重要意义。数字基础设施的绿色赋能能力将随着绿色低碳节能减排的发展和行业可持续发展能力的提升得到进一步提高,从而自下而上对各行业碳排放结构及数字技术赋能低碳环节进行分析量化,助力实现全行业低碳排放、碳达峰要求。

## 4 结语

数字基础设施为我国数字经济快速成长注入新活力。然而其迅猛发展导致了快速增高的能源消耗和碳排放,对实现“碳中和目标”构成严峻挑战。在该背景下,数字基础设施的绿色低碳发展成为必然选择。目前,数字基础设施绿色低碳发展,面临结构智能化设计、算力电力时空多尺度耦合、高优化计算复杂性三个层面的挑战,急需科技创新。本文明确了实现数字基础设施绿色低碳发展的关键研究方向:(1)通过市场机制设计、制度设计和战略布局,推动绿色能源技术在数字基础设施中的应用;(2)统筹多元算力科学布局,规划适用性绿色能源,设计算力网、通信网、能源网“三网合一”的一体化创新型结构,解决三网协同规划难题;(3)厘清数字基础设施碳排放,形成综合碳效提升技术评估体系,实现数字基础设施的综合碳效提升;(4)数字基础设施绿色赋能千行百业,助力全行业低碳排放。最后期望领域成果可以为我国数字基础设施绿色低碳发展做出更大贡献,助力实现全行业低碳排放、碳达峰要求。

## 参 考 文 献

- [1] 国家互联网信息办公室. 数字中国发展报告(2022年). (2023-05)/[2023-12-05]. [http://www.cac.gov.cn/2023-05/22/c\\_1686402318492248.html](http://www.cac.gov.cn/2023-05/22/c_1686402318492248.html)

- [2] 中国信息通信研究院. 中国信息通信研究院. 数据中心白皮书 (2022 年). (2022-4-22)/[2023-7-13]. <http://www.caict.ac.cn/kxyj/qwfb/bps/202204/P020220422707354529853.pdf>.
- [3] 陈心拓, 周黎旻, 张程宾, 等. 绿色高效数据中心散热冷却技术研究现状及发展趋势. 中国工程科学, 2022, 24(4): 94—104.
- [4] 中国电信集团有限公司. 新一代智算数据中心(AIDC)基础设施技术方案白皮书(2023年). (2023-12-11)/[2023-12-27]. <http://www.chinatelecom.com.cn/main12/test2019/webziyuan/202312/P020231229586974848223.pdf>.
- [5] 华为技术有限公司. 智能世界 2030 报告 (2023 年). (2021-09)/[2023-12-05]. <https://www.huawei.com/cn/giv>.
- [6] 陈晓红, 曹廖滢, 陈蛟龙, 等. 我国算力发展的需求、电力能耗及绿色低碳转型对策. 中国科学院院刊, 2024, 39(3): 528—539.
- [7] Verdecchia R, Sallou J, Cruz L. A systematic review of green AI. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Data Mining and Knowledge Discovery*, 2023, 13(4): e1507.
- [8] Luccioni A, Viguier S, Ligozat AL. Estimating the carbon footprint of BLOOM, a 176B parameter language model. *Journal of Machine Learning Research*, 2022, 24: 253: 1—253: 15.
- [9] de Vries A. The growing energy footprint of artificial intelligence. *Joule*, 2023, 7(10): 2191—2194.
- [10] Jones N. The information factories. *Nature*, 2018, 561(7722): 163—166.
- [11] Jin CQ, Bai XL, Yang C, et al. A review of power consumption models of servers in data centers. *Applied Energy*, 2020, 265: 114806.
- [12] Esmailzadeh H, Blem E, St Amant R, et al. Dark silicon and the end of multicore scaling. *IEEE Micro*, 2012, 32(3): 122—134.
- [13] Shojafar M, Cordeschi N, Baccarelli E. Energy-efficient adaptive resource management for real-time vehicular cloud services. *IEEE Transactions on Cloud Computing*, 2019, 7(1): 196—209.
- [14] Stavrinides GL, Karatza HD. An energy-efficient, QoS-aware and cost-effective scheduling approach for real-time workflow applications in cloud computing systems utilizing DVFS and approximate computations. *Future Generation Computer Systems*, 2019, 96: 216—226.
- [15] Safavi M, Landfeldt B. Energy-efficient stable and balanced task scheduling in data centers. *IEEE Transactions on Sustainable Computing*, 2021, 6(2): 306—319.
- [16] Habibi Khalaj A, Halgamuge SK. A Review on efficient thermal management of air- and liquid-cooled data centers: From chip to the cooling system. *Applied Energy*, 2017, 205: 1165—1188.
- [17] Barroso LA, Clidaras J, Hölzle U. The datacenter as a computer: An introduction to the design of warehouse-scale machines. ChamSpringer International Publishing, 2013
- [18] 周京华, 王江博. 数据中心供电架构概述与展望. 电源学报, 2023 (2023-10-26)/[2023-12-24]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1420.TM.20231025.1658.003.html>.
- [19] 曹雨洁, 丁肇豪, 王鹏, 等. 能源互联网背景下数据中心与电力系统协同优化(二): 机遇与挑战. 中国电机工程学报, 2022, 42(10): 3512—3526.
- [20] Tran N H, Tran D H, Ren S, et al. How geo-distributed data centers do demand response: A game-theoretic approach [J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2015, 7(2): 937—947.
- [21] Zhang GL, Zhang S, Zhang WQ, et al. Distributed energy management for multiple data centers with renewable resources and energy storages. *IEEE Transactions on Cloud Computing*, 2022, 10(4): 2469—2480.
- [22] Liu JH, Xu ZB, Wu J, et al. Optimal planning of Internet data centers decarbonized by hydrogen-water-based energy systems// 2021 IEEE 17th International Conference on Automation Science and Engineering (CASE). Lyon, France. IEEE, 2021: 1276—1281.
- [23] He W, Ding S, Zhang JF, et al. Performance optimization of server water cooling system based on minimum energy consumption analysis. *Applied Energy*, 2021, 303: 117620.
- [24] Guan XH, Xu ZB, Liu YP, et al. Reduction in energy consumption of the 5G communication system and beyond through collaborative optimization for BS site operation: challenges, efforts and the new approach. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2024, 20(3): 3948—3963.
- [25] Heydari A, Eslami B, Radmard V, et al. Power usage effectiveness analysis of a high-density air-liquid hybrid cooled data center// ASME 2022 International Technical Conference and Exhibition on Packaging and Integration of Electronic and Photonic Microsystems. Garden Grove, California; American Society of Mechanical Engineers, 2022.
- [26] Zhang K, Zhang YW, Liu JX, et al. Recent advancements on thermal management and evaluation for data centers. *Applied Thermal Engineering*, 2018, 142: 215—231.
- [27] Zhang Y, Wei ZY, Zhang MS. Free cooling technologies for data centers: energy saving mechanism and applications. *Energy Procedia*, 2017, 143: 410—415.
- [28] Xu Y, Zhao Y, Zhang G. Analysis of energy saving potential of waste heat recovery systems in data centers. *Energy*, 2021, 236: 121478.
- [29] Yuan XL, Liang YM, Hu XY, et al. Waste heat recoveries in data centers: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2023, 188: 113777.

## Emerging Topics in the Green and Low-carbon Development of Digital Infrastructure

Xiaohong Guan   Zhanbo Xu\*   Jiang Wu   Yaping Liu   Jinhui Liu

*School of Automation Science and Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049*

**Abstract** The development of digital infrastructure is a crucial carrier for the advancement of the digital economy. The deepening of digital infrastructure advancement promotes the deep integration of digital technology with all aspects of society, propelling rapid growth in the scale of the digital economy. The digital transformation of various industries will bring about a significant demand for computing power and communication traffic, leading to a rapid increase in energy consumption of digital infrastructure, directly impacting the achievement of the dual-carbon targets. The rapid development of digital infrastructure and the substantial increase in carbon emissions have become the key to the coordinated development of “Digital China” and the “Dual-Carbon” economy. This article, based on the overall requirements and deployment of Digital China construction, reviews the current status and challenges of the green and low-carbon development of digital infrastructure, extracts the key scientific issues in the green and low-carbon development of digital infrastructure, discusses the technical path of decoupling carbon emissions from the development of the digital economy and digital infrastructure, integrates innovative design and the application of mechanisms and institutional guarantees, and thereby proposes a path and suggestions to support the green and low-carbon development of the national digital infrastructure.

**Keywords** digital economy; digital infrastructure; green and low-carbon development, scientific issues

(责任编辑 张 强)

---

\* Corresponding Author, Email: zbxu@sei.xjtu.edu.cn