

面向绿色低碳的工业互联网：发展与挑战

李 萌^{1,2}, 黄钰典^{1,2}, 杨睿哲^{1,2}, 司鹏搏^{1,2}, 张延华^{1,2}

(1. 北京工业大学信息学部, 北京 100124; 2. 先进信息网络北京实验室, 北京 100124)

摘要: 当前绿色工业互联网系统在能效性、隐私性、资源管理等方面存在诸多问题, 须融合更多不同领域的技术来实现绿色工业互联网的发展。因此, 总结了当前绿色工业互联网的研究现状和实现技术, 并对绿色工业互联网的发展和挑战进行了展望。首先, 介绍了工业互联网的基本架构和技术特点, 围绕绿色通信、移动边缘计算、区块链等前沿网络技术, 多角度地讨论了工业互联网“绿色化”的实现途径; 其次, 详细综述了绿色工业互联网的发展现状以及实际场景建设中所涉及的关键技术; 最后, 针对现阶段绿色工业互联网发展过程中所面临的问题与挑战, 讨论了构建绿色工业互联网系统的解决方案和发展趋势。

关键词: 工业互联网; 绿色通信; 碳中和; 碳达峰; 能效性; 资源管理

中图分类号: TN 915

文献标志码: A

文章编号: 0254-0037(2023)11-1251-12

doi: 10.11936/bjutxb2021120012

Industrial Internet for Green and Low Carbon: Developments and Challenges

LI Meng^{1,2}, HUANG Yudian^{1,2}, YANG Ruizhe^{1,2}, SI Pengbo^{1,2}, ZHANG Yanhua^{1,2}

(1. Faculty of Information Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

2. Beijing Laboratory of Advanced Information Networks, Beijing 100124, China)

Abstract: The current green industrial Internet system has many problems in energy efficiency, privacy, resource management, etc., and more technologies from different fields need to be integrated to realize the development of green industrial Internet. The current research and implementation technologies were summarized, and an outlook on the development and challenges of green industrial Internet was provided. First, the basic architecture and technical characteristics of industrial Internet were introduced, and the realization path of “greening” industrial Internet was discussed from multiple perspectives around the frontier network technologies, such as green communication, mobile edge computing, blockchain, etc. Second, the development status of green industrial Internet and the key technologies involved in the construction of actual scenarios were summarized in detail. Finally, in view of the problems and challenges faced in the development of green industrial Internet at this stage, the solutions and development trends of building a green industrial Internet system were discussed.

收稿日期: 2021-12-13; 修回日期: 2022-05-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61901011); 北京市教育委员会科技计划资助项目(KM202110005021, KM202010005017); 北京市自然科学基金资助项目(L211002)

作者简介: 李 萌(1988—), 男, 副教授, 主要从事网络资源优化、智能边缘计算、工业互联网、区块链方面的研究, E-mail: limeng720@bjut.edu.cn

通信作者: 张延华(1960—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事信号处理与分析、通信网络、反馈控制策略、人工智能方面的研究, E-mail: zhangyh@bjut.edu.cn

Key words: industrial Internet; green communication; carbon neutral; carbon peaking; energy efficiency; resource management

近年来,随着我国经济的高速增长,加工业、制造业等工业领域迅速发展,作为当前工业智能制造的重要引擎,工业互联网的建设越来越受到工业界和学术界的关注。工业互联网将传统的物联网与工业生产制造有机融合,并充分利用网络技术、传感器技术、安全技术等多个跨学科技术实现工业的智能化生产制造,构建出面向工业化转型的智能网联架构。工业互联网着力于工业数字化水平整体提升,其依赖于物联网、云计算、边缘计算、虚拟现实等突破性技术,致力于创造智能的产品、方法和流程。

随着工业水平的提升,我国也面临着严峻的资源与环境制约压力^[1]。例如,解决严重的雾霾天气、工厂重金属污染等问题迫在眉睫。此外,我国目前的碳排放量已经高居世界首位,作为工业制造大国,在大力发展工业及工业互联网的同时,随着其规模逐渐扩大、发展逐渐迅速,能耗问题愈发凸显。因此,我国提出了碳达峰、碳中和的目标,即采取更加有力的政策和措施,使二氧化碳排放力争于2030年前达到峰值,努力争取2060年前实现碳中和^[2]。但由于以往绿色工业的发展与建设更多被归为如何高效利用绿色能源的问题,大多数研究针对的是如何实现循环利用能源、如何处理废弃垃圾来降低污染等方面,却忽略了如何解决智能化、数字化工业转型过程中带来的能耗与污染问题。在实际的工业生产中,工业互联网的数据存储、传输、计算处理和分析等都需要大量能源的消耗,例如,大型的云计算中心处理器消耗的能源与千万千瓦以上的大型发电厂提供的电力基本相同^[3]。由此可见,数字化的工业互联网的部署与使用过程也会在中无形带来难以估量的能源损耗。

因此,低碳绿色的工业互联网研究引起了学术界的广泛关注,越来越多的研究将目光转向了优化工业互联网能耗、提升系统能效性等问题。例如:Zhu等^[4]有针对性地 from 节能角度设计了工业互联网的架构来平衡系统的流量负载;Asad等^[5]通过协调工厂与数据处理中心对六大平面维度进行绿色化来提升能效性;Hou等^[6]通过结合光纤带宽网络的技术构建了绿色化的虚拟网络嵌入协作式边缘计算模型;Mao等^[7]提出 Green-IIoT 的系统模型和工业物联网设备的节能方案来解决物联网驱动网络的能效

问题;Li等^[8]通过预测工厂的数据负荷量,建立短期负荷预测模型,并通过网络系统动态调整电压、减少电力的损耗,支持绿色工业生产。

虽然现有的工作已经针对工业互联网的绿色化展开了广泛研究,但大部分更聚焦于网络架构的优化设计,例如:Bebortta等^[9]基于边缘计算的物联网提出了一种本地数据缩减框架,即通过优化合并边缘层与设备层之间的数据传输网络框架进一步卸载数据包,降低卸载过程中数据延迟与能量浪费等问题,最终实现快速高效的绿色计算;Vázquez-Castillo等^[10]提出了新型的卡尔曼框架,适用于降低检测城市噪声的无线传感网络的动态耗能,该网络由星型拓扑结构组成,并根据实际要求动态调整传感器的睡眠周期,由此通过对网络架构及内部节点的动态优化,实现了绿色工业互联网中智能城市的优化。除此之外, Lee等^[11]也考虑将 M2M 网络与 H2H 网络相结合形成新的共存网络,首次在共存网络的框架下解决绿色动态的功率分配等问题。然而,随着第5代通信及未来通信网络技术的发展,工业互联网将迎来爆发式的增长环境,也须融合更多的前沿网络技术加以支撑。因此,本文对绿色工业互联网中应用到的关键技术进行深度调研,从多角度阐述绿色工业互联网中网络技术的融合、实现与应用。此外,本文对绿色工业互联网及其相关领域的未来发展进行了深度探讨,对潜在的研究方向和挑战进行了展望,以期为后续的研究提供更多的思路与借鉴。

1 工业互联网的架构模型

1.1 基本定义

工业互联网是聚焦工业数字化、网络化、智能化的需求,构建基于亿万级数据量的采集、汇聚、分析的整体性服务体系,是新一代信息技术与工业系统全方位深度融合所形成的产业和应用生态,是工业智能化发展的关键综合信息基础设施^[12]。

工业互联网当前主要的应用可以抽象为以下4个层面:数据的采集与展示、数据分析与管理、深度数据分析与应用和工业控制。数据的采集与展示主要指底层传感器采集到的数据可以通过一系列传输与计算,以可视化的方式呈现给用户;数据

分析与管理是工业互联网的关键应用,针对大量数据进行计算与传输,同时也负责监控异常数据、进行设备故障分析等管理功能;深度数据分析与应用则会涉及不同工业领域的行业知识,例如,不同类型的工厂生产需要不同行业的专家根据设备的特性进行数据建模或分析;工业控制是指工业互联网系统可以对工业过程进行精准控制,在云端形成决策后可以转换为设备理解的控制指令,实现精准的信息交互与高效协作。

目前,工业互联网系统愈加复杂、规模愈加庞大,导致能源消耗问题也日益突出,如大规模计算带来的电力损耗、计算任务分配不均导致的高时延等。因此,基于能源损耗的问题进一步延伸出了绿色工业互联网系统,即以环境友好的方式实现工业互联网的部署与应用,包括适应物联网中环境友好型的新型绿色技术,如智能边缘计算、区块链技术等。

1.2 基本架构

随着“万物互联”时代的到来,基于云计算中心式的传统架构难以满足工业互联网的需求,如超低延迟需求、大规模通信与密集型计算等。因此,利用移动边缘计算来辅助工业互联网已逐渐达成共识^[4,13-17]。目前,工业互联网的架构主要由云计算层、边缘计算层、物理设备层组成,如图1所示。除此之外,也有一些学者提出了新型工业互联网架构,如优化合并边缘层与设备层等^[9]。其中,物理设备层包括传感器等传统物理硬件,负责连接物理模块与数字模块,主要任务是收集数据传输到上层和执行上层发送的命令,而在绿色工业互联网中物理设备层的关键技术主要包括绿色能量的收集、本地计算能力的优化等。边缘设备层主要由边缘服务器和基站组成,该层集成了通信、计算和缓存等功能。其计算能力弱于云服务器,主要任务包括资源协调与管理、虚拟设备实例化等。应用于绿色工业互联网中的关键技术包括边缘计算、隐私保护等^[18]。最上层的云计算层具有强大的计算和存储能力,由高性能的大型服务器组成,主要功能有大数据处理、网络资源管理、长期数据存储等。然而,传统的云计算层往往是碳排放量最高的环节,其需要耗费大量的电力资源来计算存储,并维护云服务器稳定。因此,当前针对云计算层的研究更多的是如何将任务更高效地卸载至边缘计算层中,从而减轻云服务器的负担,同时,更合理地利用云计算的资源,其中的关键技术包括强化学习、数据压缩等。

整体来看,边缘设备层是当前工业互联网的研

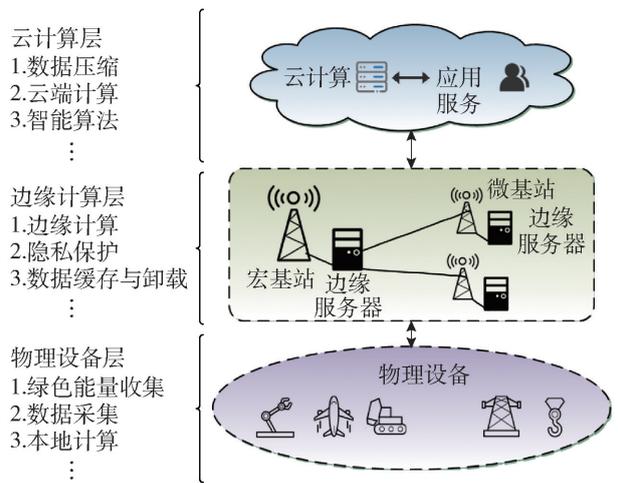


图1 工业互联网的基本架构

Fig. 1 Basic architecture of the industrial Internet

究热点,而面向绿色工业互联网的关键技术也大多是针对边缘设备层中的能耗优化、隐私保护、资源调配等方面提出的,通过优化边缘设备层可以有效地缓解云计算层的计算负担,提高与物理设备层的通信效率,从而进一步实现绿色化的目标。

2 绿色工业互联网的研究现状及相关技术

2.1 绿色通信

工业互联网由传感器技术、网络技术、通信技术等多个跨学科的关键技术组成,其中通信技术主要应用于工业互联网中大量设备之间的通信、人与设备之间的通信,确定计算任务的传输与调度等。但工业生产规模的逐渐扩大、通信设备的数量增多,导致通信系统的能耗负担增加,特别是电能消耗,其在各类资源消耗中占据大部分。因此,绿色通信技术对于提升工业互联网的能效性不可或缺。

绿色通信存在于构成通信的全要素和全过程中,包括网络、终端和业务等,是以节能减排和环境保护为重点的通信技术的改进。自从首代移动通信网络出现以来,伴随着技术的革新与需求的多样化,移动通信网络的更新换代也逐渐从一味地追求速度转向绿色和谐的全方位提速^[19-20]。例如,5G通信在数据速率、延迟、可靠性与能源效率等各方面均取得了革命性进展,并且首次创新性地使用毫米波段来大幅度提高数据率。除此之外,近年来随着5G通信技术真正落地,大规模天线技术、毫米波技术等也保证了在流量剧增的环境下,消耗的能源水平保持不变,有效提升了功率效率,如图2所示。

降低通信系统的能耗是实现绿色通信的关键问

题,特别是通信设备、基础设施的能耗,导致耗电量剧烈增长的同时,也严重影响了自然生态环境。因此,为了减小系统的能耗,网络规划需要在满足工业互联网的业务覆盖率和基站发射信号功率足够大的2个前提下,确保可以降低基站的下行功率。将上述问题转化为数学问题来看,降低基站的下行功率问题可以被抽象为如何在多约束条件下求解全局最优解。贪婪算法和梯度下降算法是经典求解全局最优解的方案,但在工业互联网的大规模场景下,其仿真结果表明,这2种方法在约束条件多的复杂场景下存在一定缺点,比如:收敛速度过快导致易获得局部最优解,样本数据量过大时更新速度缓慢,等等。

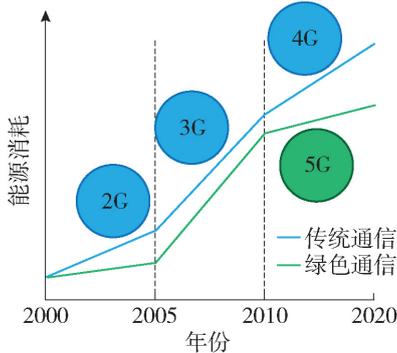


图2 传统通信与绿色通信的能源消耗的对比

Fig. 2 Comparing the energy consumption of traditional communication with green communication

基于上述问题,文献[21]选择利用不同场景下优化目标的梯度信息,提出了基于优化目标的平滑近似与均方根传播策略的梯度下降算法,实验结果表明,该算法较好地改善了收敛性能,克服了传统梯度优化算法中容易产生的震荡问题。此外,工业互联网覆盖区域内的能量损耗问题也是影响基站的下行功率的因素之一,对此可以选择将天线的协调模式和倾斜角度作为优化目标,并基于遗传算法实现一种补偿机制,从而降低能量损耗的干扰^[22]。

除了通过优化基站的下行功率降低系统能耗,大规模天线技术的使用和优化也是实现绿色通信的重要手段之一。大规模天线技术虽然在很大程度上提高了系统容量和频谱利用率,但是也导致了新的环境污染问题,如信道硬化、导频污染等。随着5G通信中的大规模多输入多输出(multiple input multiple output, MIMO)天线技术的发展与成熟,学术界提出了更多优化天线选择的算法。相比传统的天线选择算法只关注系统容量最大化,5G通信中侧重于关注资源开销与系统容量之间的均衡问题。例

如,基于博弈论的天线算法不仅关注了系统容量,也结合了发射功率和能源效率的指标,基于博弈模型使得以上三方达到纳什均衡,从而选择出最优的发射天线,实现了多目标的优化天线选择,防止只针对系统容量最大化的单目标优化而导致的开销问题^[23]。目前,随机选择算法也被应用在天线选择问题上,特别是在基站天线数量远大于终端数量的场景下,可以通过实现训练高度并行化提升天线选择的速率,从而降低天线选择过程导致的能耗增长^[24]。

综上所述,在绿色工业互联网的部署过程中应用绿色通信技术,可以将设备、基站等基础通信设施的电力能耗大幅度降低,实现能源效率的优化,并且可以有效改善大规模通信带来的环境污染问题。

2.2 能量收集

随着工业互联网的大规模部署,大量设备之间通信、计算、缓存等行为都需要消耗能源,传统生产方式大都选择消耗不可再生能源来为设备供电。随着全球变暖加剧等环境问题愈演愈烈,使用绿色能源成为社会发展的必要选择。绿色能量收集的方式有许多种,例如:热电效应将热能转化为电能,光伏效应将光能转化为电能,等等。然而,从不同环境中收集的能源其可用性具有差异性,例如:太阳能这类自然能源受到气候变化的制约,热电效应产生的瞬时电能可能不足以支持工业互联网设备的耗电量,等等。所以,绿色能量的高效采集与存储受到很多因素的限制。除此之外,传统模式下的工业互联网设备均是单电池的工作状态,无法同时实现充放电功能,导致采集到的绿色环境能量无法得到充分的使用^[25]。

因此,尽管能量收集技术可以从根本上解决不可再生能源消耗的问题,但如何进一步优化能量收集技术也是实现绿色工业互联网的关键。能量收集的绿色能源种类众多,大致可分为4类,如图3所示。其中,电磁辐射能是目前绿色物联网技术研究较多的能量来源之一。

在工业互联网中,对于部署设备的寿命要求较高,假设设备的能源供给寿命周期较短,则需要频繁更换供给电源,限制了工业互联网的生产效率与部署效率。反向散射通信是一种新型的绿色物联网技术,提供了一个单一的基础设施,可以在微瓦级功耗下实现联合传感和传输数据的功能,并且有可能实现无电池的物联网设备^[26]。此外,环境反向散射通信系统可以利用其他通信系统的射频信号,因此,不

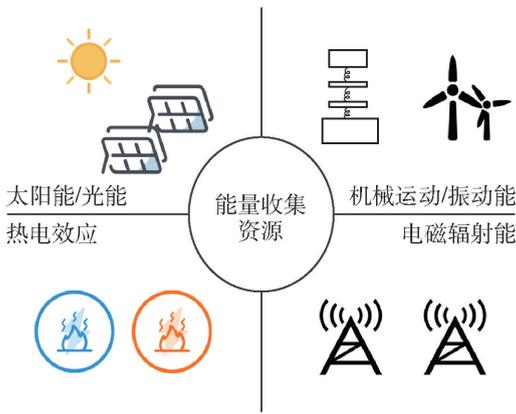


图 3 能量收集的不同来源

Fig. 3 Different sources of energy harvesting

需要固定的载波频率或专门分配的频谱, 可以很大程度上提高频谱效率。但是, 由于环境中存在一定的源干扰, 并且环境中射频信号是不可预测的和动态的, 使得反向散射接收器的信号检测成为关键问题。文献[27]选择采用差分编码来消除通道估计的必要性, 并通过所设计的数据检测算法描述检测性能。除了通过信道编码, 利用接收天线处的信号来检测反向散射信号也是提高信号检测正确率的一种方法^[28]。

长远来看, 绿色工业互联网的发展与能量收集技术的发展紧密相连, 然而, 现阶段其主要问题是由于瞬间收集到的环境能量可能不足以支撑工业互联网中所有设备的电力能源。因而, 如何高效地为大量工业互联网设备存储充足的环境能量也是未来需要研究的方向之一。

2.3 隐私安全

工业互联网相比传统工业生产的云计算模式, 更侧重云边缘协同模式, 将云服务器中大量的数据卸载至边缘节点。因此, 其部署的设备应具有支持互联网与大规模数据传输、通信和计算的复杂功能, 但这种分布式的边缘节点部署方式使得安全漏洞风险出现的可能性较高, 并且更容易受到恶意网络攻击, 因此, 设备中数据的所有权以及安全性也是工业互联网面临的巨大挑战^[29]。工业互联网一旦遭受恶意攻击, 极有可能将企业的生产线、核心技术等暴露出去, 从而导致难以估量的损失。对于集中式的云服务器, 其收集并控制所有的数据更容易导致敏感数据的泄露。例如, 云服务器可能在不通知所有节点的情况下, 与其他实体交换敏感数据, 从而导致泄露^[30]。因此, 工业互联网的隐私安全问题是绿色工业互联网的进一步拓展, 只有在保证安全的基

础上, 实现低功耗加密才能够真正地实现“绿色”。

区块链是一种去中心化的分布式账本技术, 它利用去中心化、去信任化, 并结合共识算法、密码学等技术^[31], 实现了数据隐私性和安全性的保障。随着物联网的发展, 有关物联网结合区块链技术的研究已经吸引了很多学者的注意, 其架构如图 4 所示。但目前区块链技术在绿色工业互联网中的应用研究较少, 如何将区块链技术融入绿色工业互联网平台来保障数据隐私安全的同时降低能源消耗等问题, 也是目前许多学者的研究方向之一。

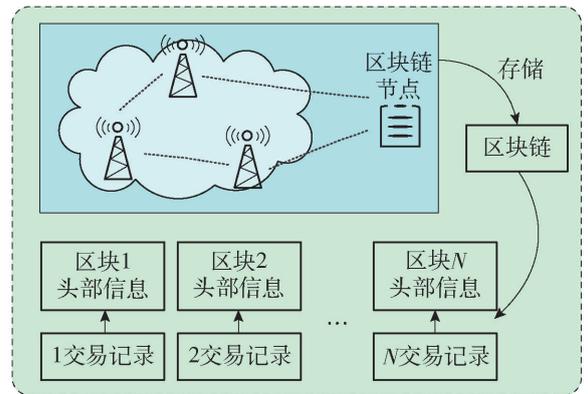


图 4 融合区块链的网络架构

Fig. 4 Network architecture for converged blockchain

区块链分为公有链、联盟链和私有链 3 种类型, 其中私有链的去中心化程度最低, 但其限制了对外开放的权限, 可以更好地保护隐私并且交易速度更快, 交易成本更低, 因此, 更适用于工业互联网。其中, 典型案例便是工业生产供应链与区块链的结合。Sun 等^[32]在研究中指出工业物联网和区块链技术的融合正在逐渐改变传统供应链的业务和管理模式, 并采用企业调查的方式来确定不同的供应链场景中实际的产业需求。Dwivedi 等^[33]则考虑了生产供应链与区块链技术结合过程中可能出现的隐私安全问题, 利用智能合约将加密密钥安全地分配给供应链中所有的参与者, 并设计了交易和区块验证的安全性协议, 从而确保了生产供应链的交易过程是稳健的。除此之外, 在工业生产供应链实际运作过程中, 条款形式的合同仍然是一重要环节, 区块链技术的结合很大程度上解决了传统电子合同易伪造的缺点。基于区块链的试点系统 Contract2Work 即作为一种潜在的解决方案, 它通过推动服务买方与多层合同提供商之间更加高效的合作, 从而优化了供应链的工作职能^[34]。交易的速度和成本则是未来绿色工业互联网需要考虑的 2 个关键因素。正常状态

与繁忙状态下,交易的速度和成本的波动很大程度上影响着工业生产的效率,为此,有研究提出基于软件定义网络(software defined network, SDN)的分布式分层网络体系结构,并将区块链引入边缘计算网络,从而实现任务卸载,最终实现降低繁忙状态时的交易任务量^[35]。共识算法是区块链技术解决分布式网络信任问题的关键组成部分,也是影响系统成本的重要环节之一,以往的共识算法多采用工作量证明(proof of work, PoW)机制,通过系统的算力证明完成的工作量,这种方法使得外来攻击破坏系统的花费变得巨大,进而保护了系统的隐私与安全,但其效率不高,并且浪费了计算机的大量计算资源,这与绿色工业互联网的要求不符^[36]。因此,有研究提出股份证明(proof of stake, PoS)机制,即一个根据用户持有货币的多少和时间来决定发放利息的制度,相比传统的PoW机制,其最大的优势在于节能,不再需要消耗大量的电力和能源,是更加“绿色”的共识机制。然而,这种节能共识机制的流动性与安全性差,特别是拥有大量货币的用户更容易遭受恶意攻击,并且工业互联网通常又缺乏安全对策,更易泄露隐私信息和受到网络攻击等^[37]。因此,将智能合约用于安全和控制数据访问的可编辑区块链是解决区块链自身安全问题的潜在解决方案^[38]。在基于区块链与智能合约的分布式工业互联网平台中,设备可以在无须干预的情况下交换、分析数据,并且可以相互验证身份来确保数据传输的完整性与安全性。同时,共识机制中存在的节点非同步、出现隔离性等问题,也无法满足工业互联网中对时间同步性的高需求。经典的拜占庭容错(Byzantine fault tolerance, BFT)系统也面临着成本过高等问题。因而,有学者为了避免上述的安全与成本问题,提出了基于区块链的分布方法定期更新密钥的方案^[39],或是引入交叉容错的思想以异步的方式实现多种共识机制的融合^[40]等方案。

综上,区块链技术与工业互联网的融合可以有效地实现数据共享,保障了用户数据的隐私安全,并且通过优化共识机制来实现系统的能耗优化,有助于绿色工业互联网的部署与完善。

2.4 成本效率

在工业生产中,由于工业产品总是呈现高度垂直化、碎片化的特点,往往需要针对客户的专一需求设计独立的方案,但该方案通常不适用于其他的需求场景^[41]。因此,相比传统的通信业务需要覆盖到数以亿级的客户,工业互联网中的通信模型覆盖面

积则缩小了很多,导致在设计工业互联网系统架构时,通信网络模型的成本效率成为突出的问题,虽然工业互联网中通信覆盖面积相对较小,但针对不同业务场景需求,也使得工业互联网模式下的生产成本费用上升,加大了绿色化工业互联网的实现难度。

智能边缘计算是一种分散式运算的架构,是为了减轻云端计算的负担而出现的,将计算任务从网络中心节点卸载到网络逻辑中的边缘节点中进行处理,可以加快任务处理的速度,减少时延并提升传输效率。文献[42]提出了具有异构体系结构的智能边缘计算框架,可以将异构资源集中在边缘设备上从而支持不同的任务需求,并通过在线调度策略优化了任务之间的高效调度。此外,工业互联网的数据传输具有周期性的特点,在特定的时间段任务量可能会大幅度增长。文献[43]针对上述问题提供了一种智能可信的路由策略来测量当前通信拥堵的情况,并结合区块链技术,简化了信息从中心云传输至边缘服务器的隐私保护。在现阶段研究中,智能工厂、智能电网等场景的网络架构设计优化中都结合了智能边缘计算的技术,通过划分任务卸载至边缘节点,减轻对核心网络的依赖性^[44],降低了核心网络的维护成本等。未来可以根据不同工厂的个性化需求搭建智能边缘计算框架,通过将云服务器的负担卸载至边缘设备中的方式,既可以实现生产的高效化,又可以降低高额的定制费用,最终达到优化成本效率的目标。

除此之外,数字孪生网络也是一种新兴的技术,通过将物理机器与计算机系统连接起来,对生产制造过程进行优化,实现了物理实体与数字虚拟之间真正的映射。但是,真正实现数字孪生网络的建模与应用要求海量的数据同步以及超低时延^[45],但同时计算机的数据计算处理能力又是有限的。因此,在一定程度上这项技术还没有真正落地,容错理论目前还不成熟。尽管如此,数字孪生网络与工业互联网的融合仍有很大的发展前景,工业互联网适用场景的特点在于碎片化,需要针对特定的工厂业务进行建模,可以利用数字孪生网络技术将其合并到边缘网络中,填补物理系统和数字空间之间的空白部分,实现针对不同业务建模的高效性。在实际场景中,完整的工业制造系统需要先经过物理开发,再通过工厂现场实现各类功能,其中设计与调试过程之间的来回迭代可能导致系统出现缺陷的可能性大大增加,这与绿色工业互联网的目标相违背。因此,数字孪生网络作为一项新兴技术,不仅可以通

现半物理仿真优化整体设计流程, 而且从绿色节能的角度来看, 通过孪生网络的测试可以及早发现工业制造系统中的设计缺陷等, 从而大幅度减少物理调试的时间与成本^[46-47]。文献[48]提出了数字孪生边缘网络的体系结构, 并结合联邦学习在解决数据孤岛问题上的优势, 实现了对实时数据的分析和网络资源优化, 具体方法则是通过联邦学习从设备的历史运行数据来构建数字孪生网络。

综上, 边缘计算与数字孪生网络技术均可以有效地降低系统成本, 是实现绿色工业互联网的关键技术。目前, 前者发展比较成熟, 大幅度降低了互联系统的复杂性, 提高了实时收集和分析数据的效率, 而后者虽然提出较晚, 但其结合了物联网、虚拟现实技术的优势, 也是未来实现绿色工业互联网的关键技术。

2.5 资源管理

随着 5G 通信的不断发展, 大规模机器式通信为工业互联网的发展提供了强有力的支撑, 工业互联网的时代也随之到来。如何高效利用网络资源来实现工业互联网的绿色化, 从而建立新的服务驱动式的工业生态系统, 成为了当下研究的热点话题。

实现工业互联网的重要方式是在工业生产的通信网络上安装部署大量传感器设备以实现自动感应和传输数据等功能。然而, 处理海量数据任务的系统设备的能量消耗是十分庞大的, 要求工业互联网在满足服务质量的前提下必须进行更有效的节能资源分配。因此, 有研究提出了针对资源分配的场景, 在系统设备执行任务时引入基于深度强化学习的智能资源分配算法以实现节能优化^[49]。除了各种智能优化分配算法之外, 通过构建相应的博弈模型也可以实现用户与节点之间的资源分配高效化。例如, 斯塔克尔伯格 (Stackelberg) 博弈模型原本是经济学中反映企业间不对称的竞争模型, 而在通信网络中, 中心云计算、边缘计算节点与用户三者之间的关系也不平等, 需要找到传输效率最大化的平衡点。因此, 有研究表明基于 Stackelberg 博弈的资源分配方案也可以通过颁布任务的领导者和执行任务的跟随者之间的博弈较量, 其中云端服务器与雾计算服务器节点分别被建模为领导者和跟随者, 在领导者拥有大量的调度资源并且在获得体验质量 (quality of experience, QoE) 的前提下, 动态调度资源至雾节点使其为用户处理计算任务。由此, 最终通过交叉优化的方式提高了资源分配的高效性^[50]。该系统架构如图 5 所示。

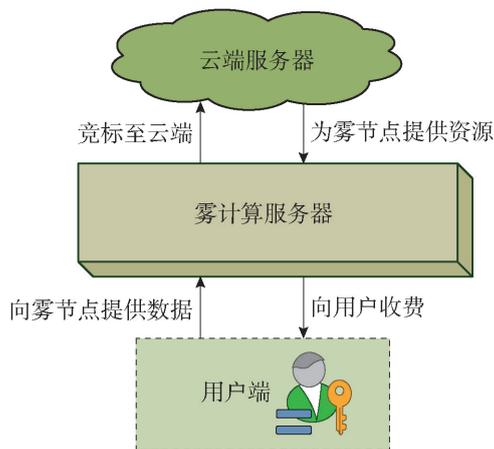


图 5 基于 Stackelberg 博弈模型的资源分配方案架构
Fig. 5 Architecture of the resource allocation scheme based on Stackelberg's game model

上述方案均是对工业互联网中实时的网络资源进行节能优化分配, 但随着机器学习, 包括强化学习等优化算法的迭代, 如何对未来工厂生产高峰期进行合理预测并二次调配资源也成为研究的热点方向。目前, 也有研究开始对工厂的资源负荷构建预测模型, 例如, 基于支持向量机算法建立了短期负荷预测模型, 可以在 2% ~ 5% 的误差范围内预测工厂的电力负荷趋势^[8], 从而使得工厂等应用场景可以在用电高峰期来临之际及时调整电压, 合理分配用电资源, 从而实现绿色化工业生产。

然而在优化资源管理的初始研究阶段, 无论是针对动态网络, 还是静态网络优化, 现有研究大多聚焦在工业互联网基础设备的节能, 较少关注网络层的资源优化。

据不完全统计, 随着数据的中心朝着能源比例计算的方向转变, 网络组件的能源份额将增长至总能源消耗的 50%。因此, 多数学者更关注网络组件的资源优化问题^[7]。有学者针对 2 层的 5G 异构网络, 提出了工业互联网的智能绿色资源分配框架, 以时间流量变化作为主要因素, 再结合深度强化学习来实现自我管理任务的卸载, 最终实现资源的管理优化^[49]。此外, SDN 技术将数据平面与控制平面分离开来, 使数据网络具有更高层次的可编程性, 并通过动态资源的分配提高了网络资源利用率^[44]。在有理工业网络环境中关于 SDN 的研究, IEEE 802.1 的集中式网络模型中的时间敏感网络 (time sensitive networking, TSN) 为了适用于自动配置工作, 对 SDN 的使用划分了分层体系结构, 此外, 国际互联网工程任务组 (Internet Engineering Task Force, IETF) 中的

确定性网络组也正在为第2层和第3层的操作指定确定性数据路径^[42]。针对SDN的集中式控制,对于网络控制实体容易出现故障或是容易和数据平面断开连接的情况,有学者提出可以利用SDN的可编程性将软件功能集成到数据平面中来备份网络控制系统^[51]。

综上,无论是从局部工业互联网设备的资源分配优化,还是从全局的网络组件进行资源优化,均可以提高资源分配的合理性与高效性,有助于朝着更加绿色的方向改进数据计算处理方式,从而减少网络系统能耗,向绿色工业互联网进一步迈进。

3 结论与展望

3.1 未来研究方向

近年来,数字经济成为我国国民经济高质量发展的新动能,“双碳”目标的达成也离不开数字经济。随着工业互联网的大规模部署,需要在数字化转型的同时,避免传统工业模式下大规模数据计算导致的算力浪费,以实现绿色化的数字工业生产,进一步提高节能减排的效率。目前,绿色工业互联网相关研究尚处于起步阶段,存在大量的开放性问题,需要开展进一步的研究与探索。本文系统综合地调研了现阶段绿色工业互联网相关的技术与应用场景的相关研究,下面从绿色工业互联网中技术的角度出发,梳理未来值得重点关注的研究方向与问题。

从绿色通信层面来看,5G通信中的毫米波技术可以应用在定向天线阵列中来补偿传播中的损耗,从而实现通信的绿色化,并且5G通信网络通过无线传输、无线控制,改变了设备之间的依存关系和连接模式,实现了不同生产要素间的高效协同,进一步助力部分生产制造环节“有线变无线”。正处于研究起步阶段的6G通信也高度重视绿色化的研究方向,其主要挑战技术包括太赫兹通信、可见光通信(visible light communication, VLC)等^[52],其中太赫兹通信技术通过结合微波通信与光通信的优点或将成为6G通信的关键技术。然而,太赫兹通信发射端的总能耗高,不利于实现绿色通信^[53],因此,如何通过大规模MIMO技术降低太赫兹通信能耗也是下一代通信“绿色化”的重大挑战之一。除此之外,由于6G的通信标准、协议等仍处于研究阶段,如何实现6G通信与工业领域的绿色集成也是未来的研究方向之一。

从能量收集的角度来看,虽然现阶段的能量收集模型种类繁多,但通过实验或细节模拟验证了这

些模型仍暴露出许多问题,其主要问题是能量的来源多种多样,如太阳能、光能、射频信号等。但能量接收机在实际接收过程中,不同能源传递的能量大小可能会产生很大差异,由此导致基于能量采集的感知设备可调度的能源难以高效利用^[54]。因此,如何绿色化调度节点中的充放电功能、如何使通信节点可以依靠多种能源同步充电^[55]等问题都是未来的研究方向。

从保障数据隐私安全方面来看,区块链技术虽然很好地保证了数据的安全性和隐私性,但其传统的工作量证明机制需要消耗巨大的算力。尽管有学者提出了低功耗的PoS,然而这种机制的安全性不足,容易被有更大话语权的节点掌控整条区块链。因而,如何在确保安全性和隐私性的前提下实现区块链技术算力成本的降低,也是将要面临的挑战之一。

在工业互联网中,无论是边缘计算还是云边端协同计算,其成本效率和资源管理的高效化大多是通过优化算法实现的^[56-57]。然而,在执行诸如深度学习等智能优化算法时,其系统负载和计算次数带来了大量硬件成本开销,也大幅度提升了工业互联网的部署成本。除此之外,强化学习等智能算法的滥用也加重了用电量的消耗,马萨诸塞州大学阿默斯特分校的一份研究报告指出,训练和搜索某种模型所需的电量涉及大约283.95 t的二氧化碳排放量^[58],相当于美国普通汽车使用寿命内近5倍的排放量。因此,在智能优化算法设计方面,进一步改进深度学习等智能算法将成为提升算力性能、实现绿色工业互联网的重要途径之一。此外,绿色工业互联网针对超低时延的优化大多仍基于智能算法,在降低时延的同时可能导致能耗开销的增加,并且可能存在“灾难性遗忘”问题,使得系统整体瘫痪等。总体来看,在未来如何适度利用智能算法来实现绿色工业互联网也是不可忽视的问题。

3.2 行业应用场景

针对行业应用场景而言,绿色工业互联网除了在智能生产制造中得到广泛应用外,智能建筑、智能电网和智能物流等工业相关产业也是绿色工业互联网重要的应用方向场景。相比工业互联网中密集部署的传感设备,智能电网中的感知检测设备从地理位置上来看,分布区域更加宽泛且灵敏度要求更高,导致智能电网在实际应用中消耗的能源也在逐渐上升^[59]。因此,智能电网可以基于绿色工业互联网中的技术,如边缘计算、深度学习^[60]等,进一步革新智能电网的绿色化发展。除了智能电网,火电、石油开

采等工业产业也均具有分布区域广泛且偏僻的特点,也有不少学者已经对此展开了大量研究^[61-62]。从绿色化的角度出发,这些行业大都污染程度高且工厂环境复杂程度高,新能源探索、物联网技术、数字孪生网络技术等都是解决其能耗问题的重要方法。同时,针对智能电网的场景也产生了许多待解决的问题,如对于电网终端和用户端之间所有数据进行实时监控的网络架构的设计、如何实现连接模式与脱机模式的高效化结合等问题。

随着网络购物的普及与发展,物流产业的重要性也随之凸显。工厂对个性化产品的定制生产和配送也推动了物流服务系统的改进,使得物流服务系统升级为工业中制造业的新范式^[63]。工业互联网的提出使得材料、传感器和产品等行业中相关项目之间的相互连接与通信都成为现实,而对于物流业来说,可以对互连的项目实现进一步的跟踪和监控,保证了运输的高效性与安全性^[64],例如,有学者^[63]结合工业互联网平台提出了一种自适应协同控制模式来收集和处理想物流系统下的实时状态数据。但从另一方面来看,物流业的资源浪费问题也逐渐浮出水面,主要体现在生产线节奏不规律导致的货物积压、信息传递不及时导致的仓储空间限制等问题,以上问题增加了物流业的运行成本,降低了运输的效率,不符合绿色的减排目标。因此,基于绿色工业互联网实现个性化的定制生产与物流业的配送问题也是未来的研究方向之一。

智能建筑的最终目标是实现建筑自动化,即一栋大楼的各项活动均可以得到自动化控制^[65],例如办公室的温度控制系统、下水道处理系统、自动门控制系统等。然而,随着城镇化不断发展,智能建筑的应用范围逐渐扩大,当前大量增长的智能建筑带来的环境问题远超过其带来的价值,例如,为了控制大楼温度的稳定,常常需要花费巨大的能源成本进行维护等。并且,智能建筑的通信范围限制在面积较小的建筑物中,感知设备等部署更加密集。因此,智能建筑的应用更侧重于通过无缝通信实现整个建筑的智能化与自动化,无缝通信技术可以实现测量、控温等各种功能的协同工作。目前,5G毫米波技术已经得到了一定的发展,如毫米波中继器大幅度提高了传统服务吞吐量,而随着6G太赫兹通信技术的提出^[66],如何进一步实现二者协同以提升通信效率、实现面向智能建筑的绿色化通信等问题,也是未来的重要研究方向。

参考文献:

- [1] 王喜文. 新一代信息技术驱动绿色工业发展[J]. 中国战略新兴产业, 2017, 9(5): 42-43.
WANG X W. Next-generation information technology drives green industrial development[J]. China Strategic Emerging Industry, 2017, 9(5): 42-43. (in Chinese)
- [2] 新华社. 中共中央 国务院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[EB/OL]. [2021-10-25]. http://www.gov.cn/xinwen/2021-10/25/content_5644687.htm. 2021. 3, 2021. 10. 25.
- [3] 郭志达. “互联网+”时代环境污染治理转型发展的问題与对策[J]. 环境监测管理与技术, 2017, 29(2): 4-6.
GUO Z D. Issue and strategy in the transformation development of environmental pollution control in the “Internet +” era [J]. Environmental Monitoring Management and Technology, 2017, 29(2): 4-6. (in Chinese)
- [4] ZHU S, OTA K, DONG M. Green AI for IIoT: energy efficient intelligent edge computing for industrial Internet of things[J]. IEEE Transactions on Green Communications and Networking, 2022, 6(1): 79-88.
- [5] ASAD Z, CHAUDHRY M A R. A two-way street: green big data processing for a greener smart grid[J]. IEEE Systems Journal, 2017, 11(2): 784-795.
- [6] HOU W G, NING Z L, LEI G. Green survivable collaborative edge computing in smart cities[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2018, 14(4): 1594-1605.
- [7] MAO W L, ZHAO Z W, CHANG Z, et al. Energy-efficient industrial Internet of things: overview and open issues[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2021, 17(11): 7225-7237.
- [8] LI Q, ZHANG L, XIANG F. Short-term load forecasting: a case study in Chongqing factories [C] // 2019 6th International Conference on Information Science and Control Engineering. Piscataway: IEEE, 2019: 892-897.
- [9] BEBORTA S, SENAPATI D, PANIGRAHI C R, et al. An adaptive modeling and performance evaluation framework for edge-enabled green IoT systems[J]. IEEE Transactions on Green Communications and Networking, 2022, 6(2): 836-844.
- [10] VÁZQUEZ-CASTILLO J, CASTILLO-ATOACHE A, LOPEZ E, et al. Energy-saving techniques for urban noise WSN with Kalman-based state estimation and green facade energy harvester [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2022, 71(1): 1-10.
- [11] LEE C H, CHANG R Y, CHENG S M, et al. Joint

- beamforming and power allocation for M2M/H2H co-existence in green dynamic TDD networks: low-complexity optimal designs[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2022, 9(6): 4799-4815.
- [12] 谢人超, 黄韬, 杨帆, 等. 边缘计算原理与实践[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2019: 152-154.
- [13] HOU X W, REN Z Y, YANG K, et al. IIoT-MEC: a novel mobile edge computing framework for 5G-enabled IIoT[C] // 2019 IEEE Wireless Communications and Networking Conference. Piscataway: IEEE, 2019: 1-7.
- [14] QIU T, CHI J C, ZHOU X B, et al. Edge computing in industrial Internet of things: architecture, advances and challenges [J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2020, 22(4): 2462-2488.
- [15] NI J B, LIN X D, SHEN X S. Toward edge-assisted Internet of things: from security and efficiency perspectives[J]. *IEEE Network*, 2019, 33(2): 50-57.
- [16] YANG S R, SU Y J, CHANG Y Y, et al. Short-term traffic prediction for edge computing-enhanced autonomous and connected cars[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2019, 68(4): 3140-3153.
- [17] CHEN W W, WANG D, LI K Q. Multi-user multi-task computation offloading in green mobile edge cloud computing [J]. *IEEE Transactions on Services Computing*, 2019, 12(5): 726-738.
- [18] ADILA M, LEILA M B, MOEZ E. Efficient green solution for a balanced energy consumption and delay in the IoT-fog-cloud computing [C] // 2017 IEEE 16th International Symposium on Network Computing and Applications. Piscataway: IEEE, 2017: 54-58.
- [19] MAHAPATRA R, NIJSURE Y, KADDOUM G, et al. Energy efficiency tradeoff mechanism towards wireless green communication: a survey [J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2016, 18(1): 686-705.
- [20] HUANG T Y, YANG W, WU J, et al. A survey on green 6G network: architecture and technologies[J]. *IEEE Access*, 2019, 7(1): 175758-175768.
- [21] KIM J S, KIM J K, KIM J H. Advanced handover scheme considering downlink and uplink service traffic in asymmetric channel [J]. *Computer Networks*, 2015, 89(4): 1-13.
- [22] YIN M J, FENG L. Cell outage compensation based on Co MP and optimization of tilt[J]. *The Journal of China Universities of Posts and Telecommunications*, 2015(5): 71-79.
- [23] 李作洲, 庞二强, 李新宇. 基于绿色通信的大规模多输入多输出天线选择算法[J]. *科学技术与工程*, 2020, 20(19): 7718-7723.
- LI Z Z, PANG E Q, LI X Y. An antenna selection algorithm of massive multiple-input multiple-output based on green communication [J]. *Science Technology and Engineering*, 2020, 20(19): 7718-7723. (in Chinese)
- [24] SUNG L, PARK D H, CHO D H. Antenna selection based on mutual coupling and spatial correlation among integrated antennas for maximum energy efficiency[C] // 2016 IEEE 27th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications. Piscataway: IEEE, 2016: 1-6.
- [25] LIU X, ANSAR N. Toward green IoT: energy solutions and key challenges [J]. *IEEE Communications Magazine*, 2019, 57(3): 104-110.
- [26] TORO U S, WU K S, LEUNG V C M. Backscatter wireless communications and sensing in green internet of things [J]. *IEEE Transactions on Green Communications and Networking*, 2022, 6(1): 37-55.
- [27] WANG G P, GAO F F, FAN R F, et al. Ambient backscatter communication systems: detection and performance analysis [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2016, 64(11): 4836-4846.
- [28] ZHANG W, QIN Y, ZHAO W J, et al. A green paradigm for Internet of things: ambient backscatter communications [J]. *China Communications*, 2019, 16(7): 109-119.
- [29] KHAN F, JAN M A, REHMAN A U, et al. A secured and intelligent communication scheme for IIoT-enabled pervasive edge computing [J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2020, 17(7): 5128-5137.
- [30] LI R N, SONG T Y, MEI B, et al. Blockchain for large-scale Internet of things data storage and protection[J]. *IEEE Transactions on Services Computing*, 2019, 12(5): 762-771.
- [31] 袁勇, 王飞跃. 区块链技术发展现状与展望[J]. *自动化学报*, 2016, 42(4): 481-494.
- YUAN Y, WANG F Y. Blockchain technology development status and outlook [J]. *Journal of Automation*, 2016, 42(4): 481-494. (in Chinese)
- [32] SUN Z H, CHEN Z Y, CAO S J, et al. Potential requirements and opportunities of blockchain-based industrial IoT in supply chain: a survey [J]. *IEEE Transactions on Computational Social Systems*, 2021, 1(1): 1469-1483.
- [33] DWIVEDI S K, AMIN R, VOLLALA S. Blockchain based secured information sharing protocol in supply chain management system with key distribution mechanism[J]. *Journal of Information Security and Applications*, 2020,

- 54(10): 2126-2214.
- [34] DOWNEY L X, BAUCHOT F, ROLING J. Blockchain for business value: a contract and work flow management to reduce disputes pilot project [J]. *IEEE Engineering Management Review*, 2018, 46(4): 86-93.
- [35] SHARMA P K, RATHORE S, JEONG Y S, et al. SoftEdgeNet: SDN based energy-efficient distributed network architecture for edge computing [J]. *IEEE Communications Magazine*, 2018, 56(12): 104-111.
- [36] SHARMA P K, PARK J H, KUMAR N. Blockchain technology toward green IoT: opportunities and challenges [J]. *IEEE Network*, 2020, 34(8): 263-269.
- [37] LENG J W, YE S D, ZHOU M, et al. Blockchain-secured smart manufacturing in industry 4.0: a survey [J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2021, 51(1): 237-252.
- [38] LENG J W, ZHOU M, ZHAO J L, et al. Blockchain security: a survey of techniques and research directions [J]. *IEEE Transactions on Services Computing*, 2021, 51(1): 237-252.
- [39] FAN X X. Scalable practical byzantine fault tolerance with short-lived signature schemes [C] // *Proceeding of 28th Annual International Conference on Computer Science and Software Engineering*. New York: ACM, 2018: 245-256.
- [40] LIU S Y, VIOTTI P, CACHIN C, et al. XFT: practical fault tolerance beyond crashes[EB/OL]. [2021-10-02]. <https://arxiv.org/abs/1502.05831>.
- [41] 宋华振. OPC UA TSN-面向未来的工业通信[J]. *自动化博览*, 2018, 35(7): 56-60.
- SONG H Z. OPC UA TSN-future-oriented industrial communication [J]. *Automation Panorama*, 2018, 35(7): 56-60. (in Chinese)
- [42] ZHU S, OTA K, DONG M. Green AI for IIoT: energy efficient intelligent edge computing for industrial Internet of things [J]. *IEEE Transactions on Green Communications and Networking*, 2022, 6(1): 79-88.
- [43] HASEEB K, DIN I U, ALMOGREN A, et al. Intelligent and secure edge-enabled computing model for sustainable cities using green Internet of things [J]. *Sustainable Cities and Society*, 2021, 68(5): 102-119.
- [44] KOBZAN T, HEYMANN S, SCHRIEGEL S, et al. Utilizing SDN infrastructure to provide smart services from the factory to the cloud [C] // *2019 15th IEEE International Workshop on Factory Communication Systems*. Piscataway: IEEE, 2019: 1-4.
- [45] FEI T, ZHAN H, LIU A, et al. Digital twin in industry: state-of-the-art [J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2019, 15(4): 2405-2415.
- [46] LENG J W, ZHOU M, XIAO Y X, et al. Digital twins-based remote semi-physical commissioning of flow-type smart manufacturing systems [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 306(15): 128836-128853.
- [47] LENG J W, WANG D W, SHEN W M, et al. Digital twins-based smart manufacturing system design in industry 4.0: a review [J]. *Journal of Manufacturing Systems*, 2021, 60(1): 119-137.
- [48] LU Y L, HUANG X H, ZHANG K, et al. Communication-efficient federated learning for digital twin edge networks in industrial IoT [J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2021, 17(8): 5709-5718.
- [49] YU P, YANG M, XIONG A, et al. Intelligent-driven green resource allocation for industrial Internet of things in 5G heterogeneous networks [J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2022, 18(1): 520-530.
- [50] JIE Y, LI M, GUO C, et al. Game-theoretic online resource allocation scheme on fog computing for mobile multimedia users [J]. *China Communication*, 2019, 16(3): 22-31.
- [51] HUANG C, SHEN C, CHIN T, et al. A real-time and memory-saving link recovery mechanism for green software-defined networking [C] // *2018 IEEE Global Conference on Signal and Information Processing*. Piscataway: IEEE, 2018: 853-857.
- [52] GIORDANI M, POLESE M, MEZZAVILLA M, et al. Toward 6G networks: use cases and technologies [J]. *IEEE Communications Magazine*, 2020, 58(3): 55-61.
- [53] 谢莎, 李浩然, 李玲香, 等. 面向6G网络的太赫兹通信技术研究综述 [J]. *移动通信*, 2020, 44(6): 36-43.
- XIE S, LI H R, LI L X, et al. A survey of terahertz communication technologies for 6G networks [J]. *Mobile Communications*, 2020, 44(6): 36-43. (in Chinese)
- [54] KU M L, LI W, CHEN Y, et al. Advances in energy harvesting communications: past, present, and future challenges [J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2017, 18(2): 1384-1412.
- [55] LI X, BI S, QUAN Z, et al. Online cognitive data sensing and processing optimization in energy-harvesting edge computing systems [J/OL]. *IEEE Transactions on Wireless Communications* [2022-02-23]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9720143>.
- [56] CUI Y F, ZHANG H L, JI H, et al. Cloud-edge collaboration with green scheduling and deep learning for industrial Internet of things [C] // *2021 IEEE Global Communications Conference*. Piscataway: IEEE, 2021:

2091-2097.

- [57] HAZRA A, ADHIKARI M, AMGOTH T, et al. Collaborative AI-enabled intelligent partial service provisioning in green industrial fog networks [J/OL]. IEEE Internet of Things Journal[2021-09-07]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9530591>.
- [58] CHARLES E L, NEIL C T, JOEL S E, et al. There's plenty of room at the top: what will drive computer performance after Moore's law? [J]. Science, 2020, 368(5): 1056-1086.
- [59] SIDID S, GAUR S. Smart grid building automation based on Internet of things[C]//2017 Innovations in Power and Advanced Computing Technologies. Piscataway: IEEE, 2017: 1806-1810.
- [60] DRIDI A, AFIFI H, MOUNGLA H, et al. A novel deep reinforcement approach for IIoT microgrid energy management systems [J]. IEEE Transactions on Green Communications and Networking, 2022, 6(1): 148-159.
- [61] WANASINGHE T R, GOSINE R G, JAMES L A, et al. The Internet of things in the oil and gas industry: a systematic review[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2020, 7(9): 8654-8673.
- [62] AKILAN T, CHAUDHARY S, KUMARI P, et al. Surveillance robot in hazardous place using IoT technology [C]//2020 2nd International Conference on Advances in Computing, Communication Control and Networking. Piscataway: IEEE, 2020: 775-780.
- [63] GUO Z G, ZHANG Y F, ZHAO X B, et al. CPS-based self-adaptive collaborative control for smart production-logistics systems[J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2021, 51(1): 188-198.
- [64] LV Y Q, LEI T, LEE C K M, et al. IoT based omni-channel logistics service in industry 4.0[C]//2018 IEEE International Conference on Service Operations and Logistics, and Informatics. Piscataway: IEEE, 2018: 240-243.
- [65] PAN J L, JAIN R, PAUL S, et al. An Internet of things framework for smart energy in buildings: designs, prototype, and experiments[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2015, 2(6): 527-537.
- [66] VERMA S, KAUR S, KHAN M A, et al. Toward green communication in 6G-enabled massive Internet of things [J]. IEEE Internet of Things Journal, 2021, 8(7): 5408-5415.

(责任编辑 梁洁)