

DOI:10.3969/j.issn.2097-0706.2023.07.001

# 基于知识图谱的数据中心综合能源系统 研究综述

Researches on data center integrated energy systems based on knowledge graph

王永真<sup>1,2</sup>, 韩艺博<sup>1</sup>, 韩恺<sup>1,2\*</sup>, 韩俊涛<sup>1</sup>, 宋阔<sup>1</sup>, 张兰兰<sup>1</sup>

WANG Yongzhen<sup>1,2</sup>, HAN Yibo<sup>1</sup>, HAN Kai<sup>1,2\*</sup>, HAN Juntao<sup>1</sup>, SONG Kuo<sup>1</sup>, ZHANG Lanlan<sup>1</sup>

(1.北京理工大学机械与车辆学院,北京100083;2.北京理工大学重庆创新中心,重庆401120)

(1.School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100083, China; 2.Beijing Institute of Technology Chongqing Innovation Center, Chongqing 401120, China)

**摘要:**作为数字经济时代的关键基础设施,数据中心的能耗和碳排放问题将日益突出。为全面揭示全球数据中心的最新研究进展,提出基于综合能源系统视角的知识图谱科学计量方法。该方法从研究趋势、理论方法及工程案例等多维度对数据中心综合能源系统的最新研究进行分析。首先,对全球数据中心能量研究领域科技论文的国际合作情况、分布特征及研究热点进行定性与定量分析。对采用能源梯级利用、多能互补以及源网荷储一体化的数据中心综合能源系统进行研究,并对其规划设计、运行评价、计算求解进行分析。分析发现,数据中心能源系统正不断走向包含经济和低碳的多维度全局优化。最后,鉴于传统数据中心综合能源系统评价指标——电能利用效率(PUE)的局限性,提出了新的评价指标及体系。

**关键词:**数据中心;综合能源系统;知识图谱;电能利用效率;碳中和;多能互补;源网荷储一体化

**中图分类号:**TK 01 **文献标志码:**A **文章编号:**2097-0706(2023)07-0001-10

**Abstract:** As a key infrastructure in digital economy era, the energy consumption and carbon emissions of data centers are becoming increasingly prominent, and a series of research has been conducted by global scholars in the past decade. To comprehensively reveal the progress of global data center energy consumption researches, this article proposes a perspective based on integrated energy system and a metric method based on knowledge graph, and conducts a review of the latest research on the integrated energy system of data center from various aspects such as research trends, theoretical method and engineering cases. Firstly, a qualitative and quantitative analysis is conducted on international collaboration, characteristic distribution, and research hotspots in the field of global data center energy research based on scientific publications. Based on this, the article focuses on the research of data center integrated energy systems, which involve energy cascading utilization, multi-energy complementarity, and source-grid-load-storage integration. It analyzes the planning and design, operational evaluation, computational solution methods, and key points of data center integrated energy systems, revealing that the energy systems of data centers are constantly moving towards multidimensional global optimization that includes economic and low-carbon aspects. Finally, the article discusses the inapplicability of traditional PUE in data center integrated energy systems and preliminarily proposes evaluation indicators and systems for data center energy systems.

**Keywords:** data center; integrated energy system; knowledge graph; PUE; carbon neutrality; multi-energy complementarity; source-grid-load-storage integration

## 0 引言

随着传统行业与云计算、大数据、物联网、移动互联网和人工智能等新兴技术的深度融合,全球进入了数字经济时代。全球数据中心快速发展也导

致电力消耗显著增加。预计到2030年,数据中心的耗电量将占全球电耗的3%~13%<sup>[1]</sup>。同时,高能耗也意味着高排放,数字化对全球“碳达峰、碳中和”目标的进程产生了影响。比如,2020年数据中心和数据传输网络的二氧化碳排放已占到全球排放总量的0.9%<sup>[2]</sup>。因此,在全球净零排放的趋势下,绿电消费、能效提升、余热回收、高效制冷、多元储能

**基金项目:**国家自然科学基金项目(52006114)  
National Natural Science Foundation of China (52006114)

等多项措施已在数据中心的规划、设计和运维中得到应用<sup>[3]</sup>,措施涵盖了能源动力、电气、环境、计算机、通信、经管等多个学科和数据中心的全链条。

近几年,国内外研究学者及相关机构对数据中心的能耗进行了分析和总结。Ahmed等<sup>[4]</sup>通过建模对数据中心能源系统的可靠性进行了梳理与分析;饶文涛等<sup>[5]</sup>对氢能在数据中心能源系统应用的典型场景和技术经济性进行了分析;Shao等<sup>[6]</sup>分析了现有数据中心能效评估方面的各类指标、应用范围及优/劣势;刘文亮等<sup>[7]</sup>从信息技术(IT)设备、制冷系统与供配电系统3个方面总结了数据中心能量管理的方法;王继业等<sup>[8]</sup>从能效模型与能效算法的角度总结了数据中心服务器系统与网络系统的节能研究。随着综合能源系统在新能源消纳、综合能效以及经济运行等方面优势的展现,其在能源领域得到广泛关注和应用<sup>[9-11]</sup>,在数据中心领域综合能源系统的应用也呈现出快速发展趋势。就此,Huang等<sup>[12]</sup>基于产消者视角,从上游可再生能源使用及下游余热回收2个方面对数据中心能源系统进行了描述;马晓燕等<sup>[13]</sup>总结和梳理了基于数据中心综合能源系统方面的研究现状;吕佳炜等<sup>[14]</sup>探究了集成数据中心的综合能源系统能量流和数据流耦合机理。前述文献对数据中心能耗及综合能源系统的研究进行了较好的梳理和分析,但上述文献缺少系统和定量的分析,需采用一定的综述方法就某一具体问题进行了评述。

本文从全球数据中心能量研究的进展出发,结合综合能源系统视角和知识图谱的科学计量方法,对数据中心综合能源系统(Data Center Integrated Energy System, DC-IES)进行全面综述。首先基于知识图谱,分析从事数据中心能源研究的国家和学者的合作网络及研究热点发展趋势。接着,梳理并比较了国内外DC-IES相关研究的特点,探讨了其优化研究的过程。最后,总结了当前DC-IES存在的问题和未来研究方向,以期为中心中心的可持续发展提供参考。

### 1 数据中心能量研究知识图谱分析

为深入揭示全球学者在数据中心能量方面的研究态势,基于科学引文数据库(Web of Science, WoS)核心合集,以“TS=(data center)&TS=(energy)”为检索式,共检索出4 548篇文献(截至2023年2月28日),然后使用CiteSpace软件,从国家、机构、学者的合作网络及关键词等方面对数据中心的能量研究进行分析。

### 1.1 国家层面分析

图1给出了从事数据中心能效研究的国家(地区)间可视化合作网络及部分国家的研究频次和中心性。图1中黑色数字为对应国家(地区)的发文频次及中心性。以发文量排序,美国的发文量最多且中心性也位于首位,共发表1 508篇文献;其次是中国,累计发文1 219篇;其余国家(地区)发文在300篇左右。图1中紫色外环代表中心性大于0.1的国家(地区),如美国、中国、法国、印度及加拿大等,这意味着上述国家(地区)在数据中心能效研究方面处于关键地位。然而,高中心性并不等于高生产力或强影响力,例如,日本、意大利及英格兰的发文量都多于加拿大,但中心性却低于后者。

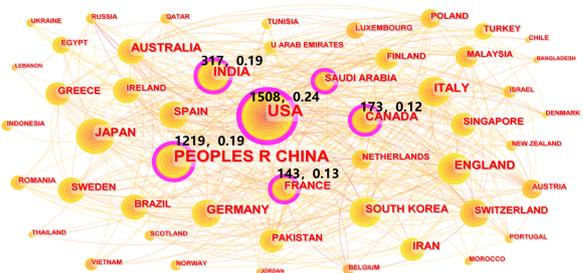


图1 数据中心领域国家合作网络图谱  
Fig. 1 National cooperation network in the field of data center

### 1.2 学者(机构)分析

学者分析有助于发现数据中心领域的专家、学术团队以及他们的研究主题和成果。图2给出了在数据中心能效研究方面发文量≥5的作者间合作情况,包括Roger Schmidt, Dereje Agonafer, Liu Zhiyong及Cullen Bash等知名学者。

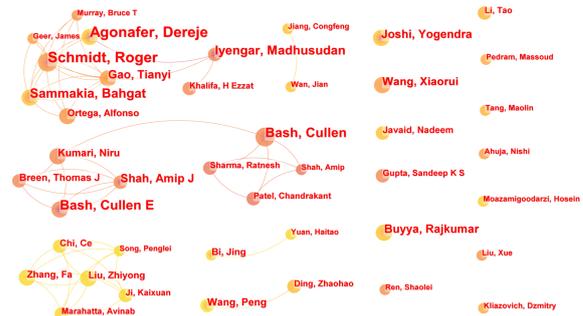


图2 数据中心领域学者合作网络图谱  
Fig. 2 Scholars' cooperation network in the field of data center

Roger Schmidt及其团队主要成员针对数据中心能效、空气冷却和计算流体动力学模拟方面进行一系列研究,提出了一种改进的计算流体动力学模型,可以更准确地模拟开放式通道空气冷却数据中心的温度分布和风速分布<sup>[15]</sup>,并对数据中心的温度和气流进行了预测研究<sup>[16]</sup>。该团队还与IBM、雪城大学、美国能源部等机构展开了合作。Dereje

Agonafer 也与其展开了相关合作,探讨了不同混合冷却方案对数据中心热管理的影响,比较了空气冷却、水冷却和制冷剂冷却的优缺点<sup>[17]</sup>;2个团队共同开展了环境因素对数据中心冷却系统、服务器和 IT 设备影响的研究<sup>[18]</sup>。

Cullen Bash 及其团队主要成员集中研究如何利用环境数据进行虚拟机迁移,以提高数据中心的能源效率和可靠性<sup>[19]</sup>;并使用流体动力学模型对高计算密度的数据中心进行仿真,以保证系统进气温度的规范<sup>[20]</sup>;此外,该团队探索了数据中心的热管理方法,包括空气冷却、水冷却、制冷剂循环等,以降低能耗和碳排放<sup>[21]</sup>;他们还和 Chandrakant Patel, Ratnesh Sharma 等研究团队密切合作,共同开展了关于数据中心能源效率提高和可持续发展的研究<sup>[22-23]</sup>。

Liu Zhiyong 及其团队提出了一种基于边际成本和任务分类的能耗优化调度策略,用于解决数据中心的能耗问题,并通过交互学习和协作决策,实现数据中心总能耗的最小化<sup>[24-25]</sup>;此外,他们还利用机器学习算法对数据中心的负载进行预测和分析,以有效降低数据中心的空闲功耗和迁移开销<sup>[26]</sup>。

### 1.3 突现词分析

CiteSpace 的突现词分析有助于从众多研究主题中筛选出在特定时间段内呈显著增长的热点。如在 21 世纪初期,热管理(thermal management)与数据中心冷却(data center cooling)成为学者们关注的焦点(如图 3 所示),研究关注在确保数据中心安全稳定运行的基础上,制冷系统的运行情况;随后,研究热点逐步演变为绿色计算(green computing)和能耗(power consumption)等,反映出研究人员在探索降低数据中心能耗、优化能源管理和推动可持续发展方面的努力。近年来,随着余热回收(waste heat recovery)、机器学习(machine learning)、模型(model)、电力需求(power demand)和热性能(thermal performance)等关键词热度的上升,基于低品位余热回收打造的产消型数据中心<sup>[27]</sup>、氢能在绿色数据中心 IT 电力以及备用电源方面的应用<sup>[5]</sup>、源网荷储一体化数据中心的能源系统也得到关注,并逐步形成了数据中心综合能源系统的研究趋势。

利用知识图谱法,从多个维度对数据中心能效研究现状和发展趋势进行了可视化统计分析,揭示了数据中心能效方面的研究热点和前沿领域。基于能源梯级利用、多能互补以及源网荷储一体化的 DC-IES 将成为解决数据中心绿色可持续发展的关键。综合能源系统(Integrated Energy System, IES)是指在规划、建设和运行等过程中,通过对能源的产生与转换、传输与分配、存储与消费等环节进行

突现词	突现词年份	突现词强度	突现周期		研究年份
			起始年	终止年	
thermal management	2004	11.08	2004	2011	2000—2023
data center cooling	2004	5.20	2004	2012	
power management	2005	11.46	2009	2014	
green computing	2009	7.04	2009	2015	
power consumption	2010	10.48	2010	2014	
cloud data center	2012	5.69	2017	2018	
thermal performance	2019	5.61	2019	2021	
power demand	2020	6.91	2020	2021	
machine learning	2016	6.18	2020	2021	
air	2018	5.30	2020	2023	
model	2000	5.93	2021	2023	
waste heat recovery	2014	5.16	2021	2023	

图 3 数据中心能效研究中的突现词

Fig. 3 Burst keywords related to data center energy efficiency researches

有机协调的能源产消一体化系统<sup>[28]</sup>。以欧美为代表的发达国家在积极推动 IES 的发展<sup>[29]</sup>,近年来,IES 也得到中国政界、学界和业界的高度重视,成为目前能效研究的一个重点<sup>[30]</sup>。

## 2 DC-IES 的研究现状

Uptime Institute 机构在数据中心可持续发展措施调查报告中揭示可再生能源的消费、机架利用率的提升、数据中心冷却系统改进是未来数据中心可持续发展的主要措施<sup>[31]</sup>,这与 IES 的理念和方法相一致。而如何将独立分布于数据中心链条的上游供能、中游用能、下游产能形成一个协调互动的一体化数据中心综合能源系统是本文的重点。

### 2.1 DC-IES 概述

多能流耦合是 IES 优于传统供能系统的一大特点,源测输入有碳基燃料、电力能源、流体热能以及零碳燃料,经过网侧各设备的耦合及能量转换,最终输出电、热、冷、气等多形式的能量,以满足终端用户侧的不同用能需求。

在可再生能源的使用中存在主动和被动的驱动<sup>[32]</sup>。其中,一些研究通过在数据中心整合可再生能源,减少碳排放或是电网购电成本。比如,Sheme 等<sup>[33]</sup>研究了使用可再生能源为北纬 60° 的数据中心提供能源并节约成本的可行性;Aksanli 等<sup>[34]</sup>开发了一种能够优化绿色能源使用的数据中心需求响应策略,以克服绿色能源对环境变化的依赖性;Goiri 等<sup>[35]</sup>开发了一个名为 GreenSlot 的调度器,用于预测近期的太阳能发电量,并通过调度数据中心的工作负载最大限度地利用可再生能源。如今已有可再生能源应用于数据中心的案例。例如,苹果公司为其北卡罗来纳州的数据中心建造了一个 40 MW 的太阳能阵列,提供额外的 17.5 MW 电力;脸书公司在俄勒冈州建造了一个太阳能数据中心,犹他州和新墨西哥州的其他 3 个公用事业规模太阳能项目也将陆续落地。

此外,产消者也是综合能源系统重要的组成部

分。与一般用能建筑不同,数据中心IT设备在运行过程中排放了大量的废热,随着低品位余热回收利用技术的发展,数据中心大部分废热可得以回收利用<sup>[12]</sup>。Oró等<sup>[36]</sup>分析了应用风冷数据中心废热提高区域供热系统能效和经济性的可行性;Davies等<sup>[37]</sup>探索了使用热泵来提高数据中心废热温度以满足区域供暖的要求,并分析了将数据中心余热用于伦敦区域供暖的可行性。此外,随着液冷技术的革新,吸收式制冷、吸附式制冷甚至有机朗肯循环等技术成为数据中心余热回收方式<sup>[38-41]</sup>,将进一步提高数据中心电能利用效率(Power Usage Effectiveness, PUE)及经济效益。

### 2.2 DC-IES 架构形式

相对于其他建筑负荷,数据中心能耗强度高、

冷负荷需求大且对供能可靠性要求高,对综合能源系统架构与运行特点的匹配度要求更高<sup>[42-43]</sup>。图4描述了一个典型的DC-IES拓扑结构,可以看出:常见的DC-IES中,上游源测能源输入一般有市政电力、燃气及太阳能等,通过光伏板、燃气内燃机、吸收式制冷机等设备进行能量转换及耦合,以满足数据中心及周边建筑的冷、热、电负荷需求。Zhao等<sup>[44]</sup>提出了一种集质子交换膜燃料电池(PEMFC)、甲醇重整与除湿于一体的DC-IES。该系统中利用甲醇重整器和选择性氧化反应器将甲醇转化为氢气供给PEMFC,并通过控制进入吸附式冷水机和干燥剂空调系统的热热水比例,同时实现冷却和除湿。整个系统运行过程中,热水中的热能通过以医用石蜡为相变材料的储热罐进行存储和释放。

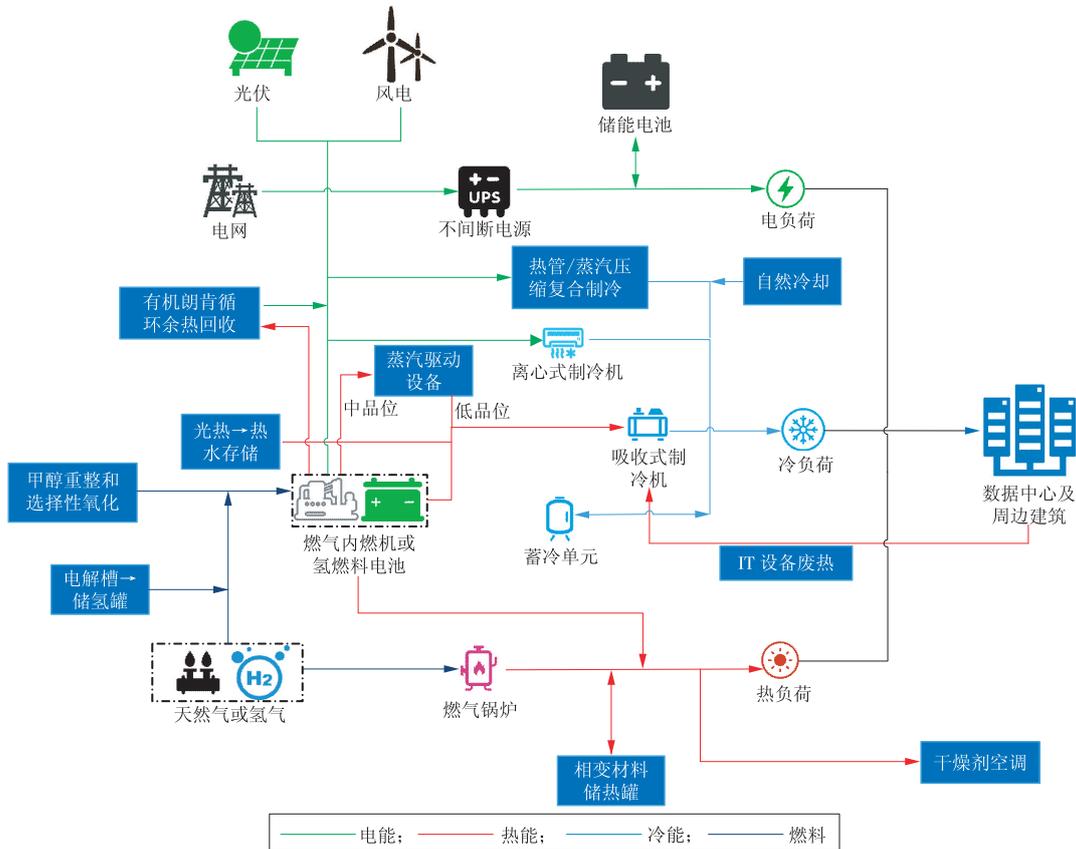


图4 DC-IES 拓扑结构示意图<sup>[44-48]</sup>

Fig. 4 Schematic topology of a DC-IES<sup>[44-48]</sup>

Wan等<sup>[45]</sup>为使用IT设备废热,借助工作负载调度和虚拟机迁移机制,提高中央处理器(CPU)利用率,使CPU温度保持在80℃的临界阈值以下,并且可获得70~80℃的回水,以此余热驱动吸收式制冷机。Tian等<sup>[46]</sup>在冷热电联产(CHP)机组与吸收式制冷机中添加了蒸汽驱动设备,以CHP机组的高温热蒸汽为其驱动热源,经循环后排出的低品位热蒸汽再供吸收式制冷机使用,有效提升了能量利用率。Liu等<sup>[47]</sup>设计了一套基于氢-水能源的数据中心脱

碳IES,该系统利用太阳能进行电解水制氢,通过氢燃料电池为数据中心供电,并将其发电后的余热与太阳能光热一同用热水存储,供吸收式制冷机使用;Cai等<sup>[48]</sup>提出了一种蒸汽压缩制冷、热管和吸收式制冷机季节性协同耦合的新型IES,并比较了有无热管的2种系统的冷却能耗及能效。综上所述,系统拓扑架构关系DC-IES的能量、经济、环境以及可靠性的优劣,是DC-IES在规划阶段优化创新的重要研究内容之一。

### 2.3 DC-IES 规划与运行优化

DC-IES的规划与运行优化关键在于揭示设备运行阶段多变量、非线性耦合关系。这个阶段主要关注能量、经济和环境方面的分析。由于系统中设备的能量耦合关系复杂,源侧能量资源多样,需要

对不同品质的能源和负荷进行合理的时空配对,以实现能量效率的最大化。同时,需要实现能量的温度匹配和梯级利用,减少能量利用过程中的不匹配带来的损失。表1总结了目前DC-IES部分运行优化的目标、方法及优化过程。

表1 数据中心优化研究

Table 1 Optimization research of data centers

文献	求解方法/求解工具	优化目标	优化变量
[3]	单目标; Matlab	能源成本	不同地理分布的数据中心负载及热电联产系统出力
[49]	单目标; GAMS, CPLEX	初始投资成本、运维成本、碳排放量	容量配置、调度策略
[45]	单目标优化对比	外部电力采购成本/总体能源成本	耗电量、发电量
[46]	单目标; CPLEX	运行成本	热电联产机组的调度、工作负荷、冷却资源、储能充放电
[47]	单目标; GUROBI, CPLEX, MOSEK	年度成本(包括投资成本和超过调度期限的电力和氢气成本)	各设备调度
[48]	多目标对比分析	提高能源利用率、减少废热排放	各设备调度
[50]	单目标; GAMS, CPLEX	总运行成本	电力市场交互, 设备调度
[51]	多目标转化为单目标(加权方法); Matlab, CPLEX	年度总成本、碳排放	各设备装机容量
[52]	单目标; Matlab, GUROBI	运行成本(包括供能成本和碳交易成本)	冷热电供应调度
[53]	多目标; GAMS, LINDOGLOBAL;	年碳排放量、年总费用	各设备容量配置及出力情况
[54]	多目标; GAMS	总利润、碳排放	各设备调度、电网购售电、需求响应
[55]	单目标	年度能源成本	设备启停、电网购售电
[56]	单目标; 基于粒子群算法、遗传算法	综合经济成本	设备容量大小、混合储能运行策略

优化目标方面,一般以经济成本作为目标函数。此外,受全球净零排放趋势的影响,DC-IES的优化目标函数中也逐渐耦合了碳排放等指标。比如,刘成运等<sup>[53]</sup>将年碳排放量作为DC-IES的优化目标,并结合当地电网与天然气的碳排放因子进行计算;Wang等<sup>[52]</sup>基于DC-IES的碳配额计算了为超出此限制而支付的碳交易成本,并对其进行优化;Wang等<sup>[57]</sup>考虑日前市场和实时市场的电价变化,将总体运行成本作为优化目标,并考虑到了日前市场和实时市场间的不平衡成本;Liu等<sup>[47]</sup>以最小化年度系统成本为目标,包括能源设施投资成本、氢气和电力成本等,建立了一个两阶段随机优化问题;Yuan等<sup>[55]</sup>的主要研究目标之一是最大化虚拟能源枢纽的日利润。数据中心产生的高额投资及运维费用已给企业、机构带来了巨大经济压力,一味地追求环境效益而不顾系统经济性并不利于DC-IES的推广及普及,因此未来数据中心多目标优化的研究趋势将更加突出。此外,数据中心一般要求不间断运行,需要继续研究如何提高供能的可靠性<sup>[49]</sup>。

DC-IES相关优化研究是以具体案例的经济、资源现状、能源需求及未来发展趋势等基础数据信息为依据,利用各种优化研究方法,在满足能量平衡、质量平衡等式约束和设备爬坡、启停不等式等约束

条件下,实现DC-IES内各种设备的最佳组合、容量最优配置以及运行调度最优方案。优化研究中的优化变量主要包含系统设备的容量优化配置与运行优化调度2个方面。此外,由于不同数据中心所处地理环境等基础条件不同,部分研究的优化变量还包含需求响应负荷、电力及天然气市场交互和地理负载平衡等。

在优化求解方面,研究人员需平衡多种利益关系,如能量利用效率、环境效益及经济性等优化指标之间的矛盾;还需考虑多种设备间的能量耦合关系,故DC-IES的优化研究通常是一个内含多变量耦合的多目标优化问题。刘成运等<sup>[53]</sup>建立了一个DC-IES混合整数线性规划模型(MILP),采用 $\epsilon$ -约束法对相互制约的多目标问题进行分析和处理,并通过LINMAP和TOPSIS这2种决策方法确定综合最优方案。Tian等<sup>[50]</sup>考虑了电力市场的不确定性,将提出的鲁棒能量管理方法应用于DC-IES,并在GAMS软件中使用CPLEX求解器求解,克服了电价不确定性带来的影响;Liu等<sup>[47]</sup>建立了一个两阶段随机混合整数规划模型,并通过GUROBI或MOSEK等商业求解器求解,分析了在DC-IES中利用氢气和水冷却的潜在经济和环境优势。综合来说,DC-IES的优化研究需全面考虑地理位置、碳排放、能源

资源、经济效益、各种能源转换技术和能量梯级利用技术,采用的方法主要有 MILP、两阶段规划、混合整数非线性规划(MINLP)、粒子群算法等,之后在 Matlab, GAMS 等软件平台,调用一些商业求解器(如 CPLEX, GUROBI, MOSEK)进行求解。上述混合整数规划模型中, MILP 模型适用于优化问题中关系是线性的且主要涉及离散决策变量的情况; MINLP 模型则更适合用于优化问题具有非线性关系,或涉及连续变量和非线性约束的情况。求解平台方面, Matlab 具有友好的用户界面,强大的可视化功能和丰富的数学函数库,更适合进行复杂的数学计算、数据分析或者需要可视化结果的问题,但其处理大规模问题时效率较低;相比之下, GAMS 是专为大规模数学模型设计的,提供了多种求解器,可以高效地解决各种优化问题,但其可视化能力较弱。求解器的选择同样取决于具体的需求, CPLEX 和 GUROBI 适用于大规模的线性规划问题,特别是混合整数规划问题,提供丰富的参数设置和多种编程语言接口; MOSEK 在二次优化和二次约束优化问题上有优秀的性能,也提供多种编程语言的接口,但在处理线性规划和混合整数线性规划的性能上不如 CPLEX 和 GUROBI。

### 3 PUE 与 DC-IES

#### 3.1 现有数据中心相关指标

数据中心能效评价是节能研究的关键,覆盖了能效、水资源、绿色评价和资源利用等领域。其中 PUE 指标计算简单、易于理解,能够直观反映出数据中心的能源使用效率,因此它是使用最广泛的数据中心能效评价指标。PUE=数据中心总功率/IT 设备功率,最优情况下 PUE=1,意味着数据中心 100% 的能耗都用于 IT 设备。自 2007 年以来,全球数据中心的 PUE 已大幅下降<sup>[58]</sup>,这显示出各运营商已广泛采用了廉价、高效的方法,从而推动了数据中心设备能效的提升。

电能使用效率(Electric Energy Usage Effectiveness, EEUE)=数据中心总电能消耗/数据中心 IT 设备电能消耗。PUE 反映的是瞬时能效水平,代表数据中心每时每刻的能耗状况,会在短时间内随数据中心 IT 系统业务量的变化而发生剧烈变化,因此在数据中心使用高峰期和低谷期数值差距显著<sup>[59]</sup>;而 EEUE 是电能消耗量的比值,体现数据中心在一段时间内的能效水平,数值稳定,相对来说更能客观评价数据中心电能使用效率<sup>[60]</sup>。

用水效率(Water Usage Effectiveness, WUE)=数据中心水资源的全年消耗量/数据中心 IT 设备全

年耗电量,用来衡量数据中心的用水效率。该指标的大小受数据中心地理位置影响。潮湿地区的空气含水量通常更高,干旱地区的空气含水量则非常低。在瑞典和芬兰等严寒地区,数据中心在天然凉爽的环境中运行,对冷却用水的需求更低。同样由于较高的环境温度,亚太地区的 WUE 值高于其他地区,其中一些地区也因此需要水冷式冷水机组。据微软公布数据中心统计,全球数据中心平均 WUE 为 0.49,亚太地区则为 1.65。

数据中心基础设施效率(Data Center Infrastructure Efficiency, DCiE)是 PUE 的倒数,数值越高表示数据中心越节能。可再生能源利用率(Renewable Energy Factor, REF)反映的是数据中心可再生能源的使用比例,提升该指标有助于降低对不可再生能源的依赖程度。数据中心能源生产力(Data Center Energy Productivity, DCeP)是衡量数据中心每单位能源消耗所提供的服务数量,其中服务数量可以根据不同的业务场景来定义,例如请求数、事务数、工作负载等。

上述指标中,部分指标的水平可能与其他指标相互作用。PUE 与 WUE 在一定程度上呈负相关性。这是由于数据中心可能会采取液冷等节能措施来降低数据中心 PUE,但也带来了更多的水资源消耗。可见,未来绿色数据中心不仅要追求低 PUE,也要兼顾其他指标。

#### 3.2 PUE 与 DC-IES 的不匹配

总体而言,现有数据中心能效及资源的评价以 PUE 为代表,并逐步结合了 WUE, REF 等指标,也有将数据中心空间利用率(Space Utilization Effectiveness, SUE)、碳利用率(Carbon Utilization Effectiveness, CUE)、市电利用率(Grid Electricity Utilization Effectiveness, GUE)等指标结合进来,形成一个综合评价体系的研究。PUE 虽然能够直观地反映数据中心的能源使用效率,但无法反映 IT 设备的工作效率、数据中心的水资源和碳排放管理,也无法反映数据中心能源回收利用的情况。同时,由于数据中心相关技术的不断发展,该指标在评价一些新兴技术改造后的数据中心能源系统时出现不匹配,如对 DC-IES 的综合评价存在以下问题。

(1) 数据中心的 PUE 低并非说明其碳排放也低。因电源及电网结构、资源禀赋的差异,我国各地碳排放水平也相差较大。据统计,2012 年中国六大区域电网和省级电网的电网电力碳排放因子低至 0.232 3 kg/(kW·h),最高达 0.929 2 kg/(kW·h)。因此,不同地区相同 PUE 的数据中心具有不同的碳排放水平。在同地区电网下,采用市电的数据中心

与部分采用可再生能源(太阳能、风电等)或以燃气CHP系统作为能源的数据中心相比,相同PUE下前者的碳排放指标更高。因此,在PUE的基础上,CUE已经逐渐成为数据中心重要的关键性能指标,特别是用于零碳或者绿色数据中心的建设及运维评价。

(2)PUE指标在评估具有时空负荷转移特性的互联网数据中心的能效时存在局限性,因为其主要针对单个数据中心进行评价,而在冷、热数据转移和“算力+电力”或“算力+电力+热力”的跨区域协同情境下<sup>[61-62]</sup>,PUE难以全面评价多数据中心的能效和整个区域能源系统的特性。同时,PUE也无法辨识数据中心负荷转移后IT设备本身和配套制冷系统各自的能效提升,进而影响对电能IT设备中有效利用程度的准确表示。

(3)PUE指标在评估产消型数据中心,即整合了能量梯级利用技术的DC-IES,存在不匹配的问题。这是因为PUE主要评价了数据中心的电能使用,但对于产消型数据中心,PUE不能全面反映其能效情况。研究发现,即使PUE随IT设备占用率的增大而减小,产消型数据中心的PUE也会高于理想值<sup>[27]</sup>,原因是热收益的电耗被纳入计算。因此,对于产消型DC-IES,热收益部分的能耗应单独计量,不应包含在PUE计算中。

总体来看,在推进低碳、经济、高效数据中心建设与运维的理论和实践中,基于上述综合能源系统的技术特征,传统PUE在DC-IES的评价中缺陷将被放大。新的DC-IES评价指标将是一个重要的研究内容。近些年,一些诸如绿色数据中心的综合评价方法或者团体标准开始得到应用<sup>[63-64]</sup>,针对DC-IES评价体系面临的多主体参与、多维度评价的难题,上述方法主要通过分层次和综合打分的方式对数据中心的综合表现进行了研究和分析。比如,建立由EEUE, REF, REF, 储能率(Stored Energy Used Ratio, SEUR)及能源综合利用管理制度5项指标组成的评价指标体系,通过给出分值权重并计算相应综合分值来评价其能源综合利用水平。

#### 4 结论

近些年,风、光及氢能利用、低品位余热回收、源网荷储一体化系统的网络化、系统化等新型节能技术加速了数据中心综合能源系统的发展。本文利用知识图谱的方法对近些年全球DC-IES相关研究进行了多方面的综述,为“双碳”背景下DC-IES的发展提供参考。

(1)数据中心相关研究自2010年起开始快速增

长。由于数据中心高能耗的特点,数据中心能量成为学者关注的重点研究方向,其论文发表占到了数据中心研究总数的50%。其中,美国、中国及印度等国家在论文数量和合作关系上占据主导地位。

(2)余热回收、机器学习和模型、电力需求和热性能等成为数据中心能量领域的突现词,同时在以能量梯级利用、多能互补以及源网荷储一体化的数据中心综合能源系统的机制下,DC-IES成为数据中心能效研究与实践的热点之一。

(3)理论和实践证明,DC-IES有利于可再生能源的消纳、系统能效的提高以及碳排放的减少。源于IES多变量非线性耦合和多主体博弈和多维度评价的属性,DC-IES的研究还处于初级阶段,研究的热点集中在系统的规划设计、运行评价和计算求解上,并考虑了风光不确定性、电网交互、需求响应负荷等因素对DC-IES的影响。

(4)应用最广泛的PUE指标随着DC-IES的发展,在碳排放刻画、多数据中心时空协同以及产消型数据中心评价等方面的表现出不适用。DC-IES评价指标的构建或将成为一个关键。同时,源网荷储一体化技术也逐渐成为DC-IES参与新型能源系统的重要方式。

#### 参考文献:

- [1]ANDERS A, TOMAS E. On global electricity usage of communication technology: Trends to 2030[J].Challenges, 2015, 6(1):117-157.
- [2]IEA. Data centres & networks [EB/OL]. (2022-10-23) [2023-02-15].<https://www.iea.org/fuels-and-technologies/data-centres-networks>.
- [3]LIU Q, CHEN S, CHEN M, et al. Energy management for internet data centers considering the coordinating optimization of workload and CCHP system[C]//Proceedings of the 2nd IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration.Beijing, 2018.
- [4]AHMED K M U, BOLLEN M H J, ALVAREZ M. A review of data centers energy consumption and reliability modeling [J]. IEEE Access, 2021, 9: 152536-152563.
- [5]饶文涛,魏伟,蔡方伟,等. 氢能源在绿色数据中心中的应用现状及前景分析[J].上海节能, 2022 (6): 716-720. RAO Wentao, WEI Wei, CAI Fangwei, et al. Analysis on application status and prospect of hydrogen energy in green data center [J].Shanghai Energy Conservation, 2022 (6): 716-720.
- [6]SHAO X T, ZHANG Z B, SONG P, et al. A review of energy efficiency evaluation metrics for data centers [J]. Energy and Buildings, 2022, 271:1-19.

- [7]刘文亮, 郭熠响, 杨琪, 等. “双碳”目标下数据中心节能运行研究综述 [J]. 供用电, 2021, 38(9): 49-55.  
LIU Wenliang, GUO Yiyun, YANG Qi, et al. Overview of energy-saving operation of data center under "double carbon" target [J]. Distribution & Utilization, 2021, 38(9): 49-55.
- [8]王继业, 周碧玉, 张法, 等. 数据中心能耗模型及能效算法综述 [J]. 计算机研究与发展, 2019, 56(8): 1587-1603.  
WANG Jiye, ZHOU Biyu, ZHANG Fa, et al. Data center energy consumption models and energy efficient algorithms [J]. Journal of Computer Research and Development, 2019, 56(8): 1587-1603.
- [9]ZHANG F F, WANG Y Q, HUANG D, et al. Integrated energy system region model with renewable energy and optimal control method [J]. Frontiers in Energy Research, 2022, 10:1-17.
- [10]WEI C, QIU Y F, CHEN J F, et al. Research on energy efficiency evaluation of independent integrated energy system [C]//Proceedings of 2019 IEEE 3rd International Electrical and Energy Conference. Beijing, 2019: 1200-1205.
- [11]WANG X H, XUE L, WANG Y L, et al. Research on multi-objective planning and optimization of integrated energy system based on economy and environmental protection [C]//2021 5th International Conference on Advances in Energy, Environment and Chemical Science (AEECS 2021). Shanghai, 2021.
- [12]HUANG P, COPERTARO B, ZHANG X, et al. A review of data centers as prosumers in district energy systems: Renewable energy integration and waste heat reuse for district heating [J]. Applied Energy, 2020, 258: 114109.
- [13]马晓燕, 穆云飞, 李树荣, 等. 数据中心综合能源系统优化运行研究综述 [J]. 电力建设, 2022, 3(11): 1-13.  
MA Xiaoyan, MU Yunfei, LI Shurong, et al. Review on the optimal operation of integrated energy system in data center [J]. Electric Power Construction, 2022, 43(11): 1-13.
- [14]吕佳炜, 张沈习, 程浩忠, 等. 集成数据中心的综合能源系统能量流-数据流协同规划综述及展望 [J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(16): 5500-5521.  
LYU Jiawei, ZHANG Shenxi, CHENG Haozhong, et al. Review and prospect on coordinated planning of energy flow and workload flow in the integrated energy system containing data centers [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(16): 5500-5520.
- [15]ERDEN H S, KHALIFA H E, SCHMIDT R R. A hybrid lumped capacitance-CFD model for the simulation of data center transients [J]. HVAC&R Research, 2014, 20(6): 688-702.
- [16]PARDEY Z M, DEMETRIOU D W, ERDEN H S, et al. Proposal for standard compact server model for transient data center simulations [J]. ASHRAE Transactions, 2015, 121:413-421.
- [17]MULAY V, KARAJGIKAR S, AGONAFER D, et al. Computational study of hybrid cooling solution for thermal management of data centers [C]//ASME InterPack Conference. Vancouver, 2007.
- [18]ONYIORAH C, EILAND R, AGONAFER D, et al. Effectiveness of rack-level containment in removing data center hot-spots [C]//Fourteenth InterSociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems. Orlando, 2014: 798-806.
- [19]Hewlett-Packard Development Company. Virtual machine migration according to environmental data: US200812936900 [P]. 2014-12-02.
- [20]PATEL C D, BASH C E, BELADY C, et al. Computational fluid dynamics modeling of high compute density data centers to assure system inlet air specifications [C]//Pacific Rim/International, Intersociety Electronic Packaging Technical/Business Conference & Exhibition. Hawaii, 2001: 821-829.
- [21]BASH C E, PATEL C D, SHARMA R K. Efficient thermal management of data centers—Immediate and long-term research needs [J]. HVAC&R Research, 2003, 9(2): 137-152.
- [22]SHARMA R K, BASH C E, PATEL C D, et al. Balance of power: Dynamic thermal management for internet data centers [J]. IEEE Internet Computing, 2005, 9(1): 42-49.
- [23]PATEL C D, SHARMA R, BASH C E, et al. Thermal considerations in cooling large scale high compute density data centers [C]//ITHERM 2002: Eighth Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems, Proceedings. 2002: 767-776.
- [24]JI K, CHI C, ZHANG F, et al. Energy-aware scheduling based on marginal cost and task classification in heterogeneous data centers [J]. Energies, 2021, 14(9): 1-26.
- [25]CHI C, JI K, SONG P, et al. Cooperatively improving data center energy efficiency based on multi-agent deep reinforcement learning [J]. Energies, 2021, 14(8): 1-32.
- [26]WANG J, ZHOU B, ZHANG F, et al. Data center energy consumption models and energy efficient algorithms [J]. Journal of Computer Research and Development, 2019, 56(8): 1587-1603.
- [27]王小元, 赵军, 王永真, 等. 基于 CO<sub>2</sub> 热泵的产消型数据中心能效联动优化 [J]. 南方能源建设, 2020, 7(3): 28-37.  
WANG Xiaoyuan, ZHAO Jun, WANG Yongzhen, et al. Energy efficiency linkage optimization of production and consumption data center based on CO<sub>2</sub> heat pump [J]. Southern Energy Construction, 2020, 7(3): 28-37.
- [28]王永真, 康利改, 张靖, 等. 综合能源系统的发展历程、典型形态及未来趋势 [J]. 太阳能学报, 2021, 42(8):

- 84-95.
- WANG Yongzhen, KANG Ligai, ZHANG Jing, et al. Development history, typical form and future trend of integrated energy system [J]. *Acta Energetica Sinica*, 2021, 42(8): 84-95.
- [29]徐箬,孙宏斌,郭庆来.综合需求响应研究综述及展望[J].*中国电机工程学报*,2018,38(24):7194-7205,7446.
- XU Zheng, SUN Hongbin, GUO Qinglai. Review and prospect of integrated demand response [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2018, 38(24): 7194-7205,7446.
- [30]王永真,张宁,关永刚,等.当前能源互联网与智能电网研究选题的继承与拓展[J].*电力系统自动化*,2020,44(4):1-7.
- WANG Yongzhen, ZHANG Ning, GUAN Yonggang, et al. Inheritance and expansion analysis of research topics between energy internet and smart grid [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2020, 44(4): 1-7.
- [31]Uptime Institute. Uptime institute global data center survey 2022 [R/OL]. (2022-09-14) [2023-3-14]. <https://uptimeinstitute.com/resources/research-and-reports/uptime-institute-global-data-center-survey-results-2022>.
- [32]王永真,赵伟,张靖.能源互联网下的数据中心能源供应[J].*能源*,2020,136(5):61-65.
- WANG Yongzhen, ZHAO Wei, ZHANG Jing. Data center energy supply under energy internet [J]. *Energy*, 2020, (5): 61-65.
- [33]SHEME E, HOLMBACKA S, LAFOND S, et al. Feasibility of using renewable energy to supply data centers in 60° north latitude [J]. *Sustainable Computing: Informatics and Systems*, 2018, 17: 96-106.
- [34]AKSANLI B, VENKATESH J, ZHANG L, et al. Utilizing green energy prediction to schedule mixed batch and service jobs in data centers [J]. *ACM SIGOPS Operating Systems Review*, 2012, 45(3): 53-57.
- [35]GOIRI Í, HAQUE M E, LE K, et al. Matching renewable energy supply and demand in green datacenters [J]. *Ad Hoc Networks*, 2015, 25: 520-534.
- [36]ORÓ E, TADDEO P, SALOM J. Waste heat recovery from urban air cooled data centres to increase energy efficiency of district heating networks [J]. *Sustainable Cities and Society*, 2019, 45:522-542.
- [37]DAVIESG F, MAIDMENTG G, TOZERR M. Using data centres for combined heating and cooling: An investigation for London [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2016, 94: 296-304.
- [38]王江江,邓洪达,刘艺,等.数据中心综合能源系统配置与运行的集成优化[J].*科学技术与工程*,2023,23(5):1968-1977.
- WANG Jiangjiang, DENG Hongda, LIU Yi, et al. Integrated optimization of configurations and operations of integrated energy system for data center [J]. *Science Technology and Engineering*, 2023, 23(5): 1968-1977.
- [39]张君瑛.天然气三联供系统在新建数据中心应用的策略分析[J].*上海建设科技*,2022,253(5):77-80.
- ZHANG Junying. Strategic analysis of the application of natural gas combined power supply system in new data centers [J]. *Shanghai Construction Science & Technology*, 2022(5): 77-80.
- [40]韩冰冰.数据中心可再生能源和余热利用现状[J].*智能建筑*,2020(5):47-53.
- HAN Bingbing. Current status of renewable energy and waste heat utilization in data centers [J]. *Green Construction and Intelligent Building*, 2020(5): 47-53.
- [41]张钟平,周宇昊,赵大周,等.基于数据中心的燃气分布式能源集成与优化分析[J].*电器与能效管理技术*,2022(9):32-37.
- ZHONG Zhongping, ZHOU Yuhao, ZHAO Dazhou, et al. Gas distributed energy integration and optimization analysis based on data center [J]. *Electrical & Energy Management Technology*, 2022(9): 32-37.
- [42]陈卉,刘颖,赵龙生.楼宇型分布式能源系统在数据中心的應用[J].*华电技术*,2021,43(3):76-81.
- CHEN Hui, LIU Ying, ZHAO Longsheng. Application of building-type distributed energy systems for data centers [J]. *Huadian Technology*, 2021, 43(3): 76-81.
- [43]刘自发,谭雅之,李炯,等.区域综合能源系统规划关键问题研究综述[J].*综合智慧能源*,2022,44(6):12-24.
- LIU Zifa, TAN Yazhi, LI Jiong, et al. Review on key points in the planning for a district-level integrated energy system [J]. *Integrated Intelligent Energy*, 2022, 44(6): 12-24.
- [44]ZHAO J, CHANG H, LUO X, et al. Dynamic analysis of a cchp system based on fuel cells integrated with methanol—Reforming and dehumidification for data centers [J]. *Applied Energy*, 2022(309):1-12.
- [45]WAN J, ZHOU J, GUI X. Sustainability analysis of green data centers with cchp and waste heat reuse systems [J]. *IEEE Transactions on Sustainable Computing*, 2021, 6(1): 155-167.
- [46]TIAN M, ZHANG H, WU H. Energy management for data centre microgrids considering co-optimisation of workloads and waste heat [J]. *IET Energy Systems Integration*, 2021, 4(1):43-53.
- [47]LIU J, XU Z, WU J, et al. Optimal planning of internet data centers decarbonized by hydrogen-water-based energy systems [C]//*Proceedings of the IEEE International Conference on Automation Science and Engineering*. 2021: 1276-1281.
- [48]CAI S, ZOU Y, LUO X, et al. Investigations of a novel proton exchange membrane fuel cell-driven combined cooling and power system in data center applications [J].

- Energy Conversion and Management, 2021, 250: 114906.
- [49] LIU Z, YU H, LIU R, et al. Configuration optimization model for data-center-park-integrated energy systems under economic, reliability, and environmental considerations [J]. Energies, 2020, 13(2). DOI: 10.3390/en13020448.
- [50] TIAN Q, GUO Q, NOJAVAN S, et al. Robust optimal energy management of data center equipped with multi-energy conversion technologies [J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 329. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.129616.
- [51] FU C, GUO M, TANG C, et al. Optimal configuration strategy of integrated energy system in green data center [C]//Proceedings of the 2021 IEEE 11th Annual International Conference on Cyber Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems. 2021.
- [52] WANG Y, LI Z, WEN F, et al. Energy management for an integrated energy system with data centers considering carbon trading [C]// Proceedings of The IEEE Power and Energy Society General Meeting. 2020.
- [53] 刘成运, 孟超, 景锐, 等. A 级数据中心综合能源系统多目标优化设计和调度 [J]. 电力系统自动化, 2019, 43(14): 136-142.
- LIU Chengyun, MENG Chao, JING Rui, et al. Multi-objective optimization design and scheduling of integrated energy system in A-level data center [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(14): 136-142.
- [54] YUAN H, FENG K, LI W, et al. Multi-objective optimization of virtual energy hub plant integrated with data center and plug-in electric vehicles under a mixed robust-stochastic model [J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 363: 1-14.
- [55] KESKIN I, SOYKAN G. Optimal cost management of the cchp based data center with district heating and district cooling integration in the presence of different energy tariffs [J]. Energy Conversion and Management, 2022, 254: 115211.
- [56] DAI Y, ZENG Y. Optimization of CCHP integrated with multiple load, replenished energy, and hybrid storage in different operation modes [J]. Energy, 2022, 260: 125129.
- [57] WANG D, XIE C, WU R, et al. Optimal energy scheduling for data center with energy nets including CCHP and demand response [J]. IEEE Access, 2021, 9: 6137-6151.
- [58] Datacenter outages are costing more, \$1m+ failures now common [EB/OL]. (2022-9-21) [2023-3-28]. [https://www.theregister.com/2022/09/21/uptime\\_institute\\_datacenter\\_outages/](https://www.theregister.com/2022/09/21/uptime_institute_datacenter_outages/).
- [59] LI J, JURASZ J, LI H, et al. A new indicator for a fair comparison on the energy performance of data centers [J]. Applied Energy, 2020, 276: 15497.1-115497.8.
- [60] 甘文凤, 黄群骥, 刘东雪, 等. 数据中心能效指标 PUE 与 EEUE 的比较 [J]. 智能建筑, 2019(12): 27-29.
- GAN Wenfeng, HUANG Qunji, LIU Dongxue, et al. Comparison of data center energy efficiency index PUE and EEUE [J]. Green Construction and Intelligent Building, 2019(12): 27-29.
- [61] 王丹阳, 张沈习, 程浩忠, 等. 考虑数据中心用能时空可调的多区域能源站协同规划 [J]. 电力系统自动化, 2023, 47(3): 77-85.
- WANG Danyang, ZHANG Shenxi, CHENG Haozhong, et al. Coordinated planning of multi-regional energy stations considering spatio-temporal adjustment of energy consumption in data centers [J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(3): 77-85.
- [62] 王丹阳, 张沈习, 程浩忠, 等. 考虑数据中心用能时空可调的电-气互联综合能源系统分布式光伏最大准入容量计算 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2023, 35(2): 121-131.
- WANG Danyang, ZHANG Shenxi, CHENG Haozhong, et al. Calculation of maximum allowable access capacity of distributed photovoltaic in electricity-gas integrated energy system considering spatio-temporal adjustability of energy consumption by data centers [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2023, 35(2): 121-131.
- [63] 张军华, 潘京津. 《数据中心能源综合利用评价方法》标准编制研究 [J]. 中国能源, 2021, 43(4): 60-66, 86.
- ZHANG Junhua, PAN Jingjin. Research on the standard compilation of "evaluation method for comprehensive utilization of data center energy" [J]. Energy of China, 2021, 43(4): 60-66, 86.
- [64] 蔺昊欣, 彭妍妍, 夏玉娟, 等. 我国数据中心能耗评价方法标准综述 [J]. 中国能源, 2020, 42(8): 36-39.
- LIN Haoxi, PENG Yanyan, XIA Yujuan, et al. Summary of energy consumption evaluation method standard for China's data center [J]. Energy of China, 2020, 42(8): 36-39.

(本文责编: 陆华)

收稿日期: 2023-05-17; 修回日期: 2023-06-19  
 上网日期: 2023-07-05; 附录网址: [www.iienenergy.cn](http://www.iienenergy.cn)

#### 作者简介:

王永真(1988), 男, 副教授, 博士, 从事综合智慧能源、氢能动力系统、热力循环等方面的研究, [wyz80hou@bit.edu.cn](mailto:wyz80hou@bit.edu.cn);

韩艺博(2000), 男, 在读硕士研究生, 从事综合能源系统建模优化等方面的研究;

韩恺(1978), 男, 教授, 博士, 从事能源动力系统控制及优化等方面的研究, [autosim@bit.edu.cn](mailto:autosim@bit.edu.cn);

韩俊涛(1994), 男, 在读博士研究生, 从事综合能源系统建模优化等方面的研究。

\*为通信作者。