第 50 卷 第 1 期：55-64 高电压技术 Vol.50, No.1: 55-64
2024 年 1 月 31 日 High Voltage Engineering January 31, 2024
**DOI**: 10.13336/j.1003-6520.hve.20231390

# “东数西算”背景下多数据中心联合消纳可再生能源途径研究综述

苏 娟，董彦君，赵 晶，董 敏，杜松怀
（中国农业大学信息与电气工程学院，北京 100083）

**摘 要**：“碳达峰、碳中和”和“东数西算”战略目标背景下，新能源装机占比和数据中心机架数量持续增长，数据中心的负荷调节能力可有效促进新能源消纳。与传统的可中断、可转移负荷不同，数据中心作为一种用电量可观的新型负荷，在时间、空间尺度上均有调节潜力。因此，立足于现有研究成果，该文首先对数据中心能耗模型进行分析，对比了几种常见的建模方法；其次，通过对数据中心时空转移特性的定性分析和对消纳可再生能源潜力定量评估方法的总结，揭示了数据中心的消纳潜力；再次，分别从技术和管理 2 个层面梳理了数据中心消纳可再生能源的途径；最后，展望了“东数西算”背景下多数据中心联合消纳可再生能源的途径，为可再生能源消纳提供新的思路，助力我国“双碳”目标的实现。

**关键词**：数据中心；可再生能源；能耗模型；潜力评估；消纳途径

## Research of the Approach to Consuming Renewable Energy Across Multiple Data Centers in the Context of “East Data, West Calculation”

SU Juan, DONG Yanjun, ZHAO Jing, DONG Min, DU Songhuai
(College of Information and Electrical Engineering, China Agriculture University, Beijing 100083, China)

**Abstract**: In the context of the strategic goals of “Emission Peak, Carbon Neutrality” and “East Data, West Calculation”, the proportion of new energy installed capacity and the number of data center racks continue to increase, and the load regulation ability of data centers can effectively promote new energy consumption. Unlike traditional interruptible and transferable loads, data centers, as a new type of load with considerable electricity demand, have the potentials in regulation on both the temporal and spatial scales. Therefore, based on the existing research results, firstly, an overview of data center energy consumption models is presented and several common modeling approaches are compared. Secondly, through the qualitative analysis of the spatial and temporal transfer characteristics of data centers and in combination of quantitative assessment methods for the potential of renewable energy consumption, the potentials of data centers for consuming energy are summarized. Thirdly, the ways to consume renewable energy in data centers are sorted out from two aspects of technology and management. Finally, the prospects in the way of multi-data center joint consumption of renewable energy under the background of “East Data, West Calculation” are put forward, providing new ideas for renewable energy consumption and assisting the realization of China’s “Dual Carbon Goal”.

**Key words**: data centers; renewable energy; energy consumption model; potential assessment; consumption pathway

## 0 引言

随着全球各行各业全面数字化转型的发展，算力成为了继热力、电力之后新一代的生产力。中国算力发展指数白皮书指出：“算力发展指数每提高 1 点，国内生产总值增长约 1293 亿元”。因此，数据中心(internet data center，IDC)作为算力基础设施的核心组成部分，具有重要的战略意义。近年来，中国 IDC 的数量和规模呈现平稳增长趋势，截至 2022 年底，我国数据中心机架总规模已超过 650 万标准机架，用电量超过全社会的 2.71%。IDC 已成为我国高耗能、高碳排、高成本的电力负荷之一。为了响应国家“碳达峰、碳中和”目标，中共中央国务院在《2030 年前碳达峰行动方案》中提出了加强以 IDC 为代表的新型基础设施节能降碳，实现“算力+电力”协同[1]。

**基金资助项目**：国家重点研发计划(2022YFB2403002) 。
Project supported by National Key R&D Program of China (2022YFB2403002).

但我国可再生能源的供给和算力需求呈逆向分布[2]。相较于可再生能源密度高、强度大、资源丰富的西部地区，东部地区不仅可再生能源资源较少，可以建造新能源发电机组的土地资源也很紧缺，然而东部是我国经济相对发达的地区，也是算力型数据中心的主要聚集地。在此背景下，中国于 2022 年 3 月全面启动“东数西算”工程，部署八大算力枢纽(宁夏枢纽、甘肃枢纽、内蒙古枢纽等)和十大集群(中卫集群、庆阳集群、和林格尔集群等)，引导算力需求向西迁移，为多数据中心联合消纳可再生能源提供战略机遇。

未来，随着算力枢纽和数据中心集群的建成和完善，一方面，能够充分利用西部地区丰富的可再生能源；另一方面，能有效减少数据中心的碳排放。但如何在不影响 IDC 用户服务质量(quality of service，QoS)的基础上，合理统筹、调度、控制位于不同地理位置的多个数据中心共同处理海量计算任务，并最大化消纳可再生能源是有待解决的问题。因此，本文首先对现有研究中针对数据中心能耗建模的方法进行总结和对比分析；其次对数据中心参与可再生能源消纳潜力进行了定性和定量的评估；再次，从技术和管理 2 个层面，梳理了数据中心消纳可再生能源的途径；最后，基于对已有研究的分析，结合“东数西算”战略，展望了多数据中心联合消纳可再生能源的途径。

## 1 数据中心能耗模型

数据中心能源使用效率(power usage effectiveness，PUE)指标是量化 IDC 能耗的常用方法之一，也即通过 IT 设备的总能耗 $P^{\mathrm{IT}}$ 直接计算数据中心的总能耗 $P^{\mathrm{IDC}}$，如式(1)所示。目前，国内外数据中心 PUE 值 $\lambda_{\mathrm{PUE}}$ 大多控制在 1.3~3.0 之间[3]。

$$P^{\mathrm{IDC}}=\lambda_{\mathrm{PUE}}P^{\mathrm{IT}} \tag{1}$$

除了利用 PUE 值计算外，也可以分别计算数据中心内部用电设备的能耗。数据中心内部的用电设备主要分为电气设备、冷却设备和 IT 设备[4]。其中，电气设备用于照明、供配电和交直流转换等功能，冷却设备用于保持服务器正常工作的温/湿度，IT 设备用于传输、存储和处理数据，$P^{\mathrm{IDC}}$ 的计算式为：

$$P^{\mathrm{IDC}}=P^{\mathrm{L}}+P^{\mathrm{CO}}+P^{\mathrm{IT}} \tag{2}$$

式中：$P^{\mathrm{L}}$ 为电气设备总能耗，由于其占比及波动较小，在同一数据中心模型中，常取固定值；$P^{\mathrm{CO}}$ 为冷却设备总能耗。

### 1.1 冷却设备能耗模型

由于 IDC 工作任务增多会导致 IT 设备温度升高，进而增加冷却设备的能耗，因此，$P^{\mathrm{CO}}$ 可以直接与 $P^{\mathrm{IT}}$ 建立线性关系[5]，即：

$$P^{\mathrm{CO}}=\alpha P^{\mathrm{IT}}+\beta \tag{3}$$

式中：$\alpha$ 和 $\beta$ 均为经验常数，与 IDC 的地理位置、能源利用率和最佳工作温度相关。此外，也可以根据冷却设备的种类进行建模。目前，空调和风扇是数据中心常用的冷却设备。

#### 1.1.1 空调的能耗模型

包含冷水机组、变频水泵、冷却塔和精密空调 4 个部分的冷水空调被广泛应用于数据中心，其制冷过程主要为冷冻水循环、制冷剂循环和冷却水循环[6]。为了方便对设备能耗进行控制，常用较为简化的式(4)来表示冷却空调总能耗 $P_{\mathrm{con}}^{\mathrm{CO}}$[7]。

$$P_{\mathrm{con}}^{\mathrm{CO}}=\Phi_{\mathrm{con}}\Delta T \tag{4}$$

式中：$\Phi_{\mathrm{con}}$ 为用于冷循环的热流体密度、比热容和流量的乘积；$\Delta T$ 为设备流出的冷气/水流与返回设备的热气/水流之间的温差。式(4)体现了当空调内热流体不发生改变时，空调能耗与温差呈线性关系。

#### 1.1.2 风扇的能耗模型

通过风扇将外界冷空气直接输送进数据中心，其冷却效果主要取决于室内外温差[8]和数据中心所在地区的气候条件[9]，受其他设备的影响较小，因此，其能耗 $P_{\mathrm{fan}}^{\mathrm{CO}}$[10]可表示为：

$$P_{\mathrm{fan}}^{\mathrm{CO}}=\rho s^3 \tag{5}$$

式中：$s$ 为风扇的转速；$\rho$ 由数据中心室内外温差决定。当考虑不同工作量时，式(5)可被扩展[11]为：

$$P(t)=P_{\mathrm{base}}^{\mathrm{fan}}\left(\frac{R(t)}{R_{\mathrm{base}}^{\mathrm{fan}}}\right)^3 \tag{6}$$

式中：$P(t)$ 表示 $t$ 时刻风扇的能耗；$P_{\mathrm{base}}^{\mathrm{fan}}$ 表示风扇处于空闲状态时的能耗；$R(t)$ 和 $R_{\mathrm{base}}^{\mathrm{fan}}$ 分别表示 $t$ 时刻和空闲状态下风扇每分钟的转速。

### 1.2 IT 设备能耗模型

加性模型、线性回归模型、分段线性化模型和动态模型是常用的 4 种 IT 设备能耗模型，如表 1 所示。

1）加性模型。用内部服务器能耗之和表示 IT 设备能耗，模型复杂度较低，但不能单独测量子系统能耗值[12]。

2）线性回归模型。IT 设备能耗由静态能耗 $P_{\mathrm{base}}$ 和动态能耗 $P_{\mathrm{ac}}$ 组成，如式(7)所示。$P_{\mathrm{base}}$ 指服务器

空闲时的能耗，通常为固定值；$P_{ac}$ 指服务器工作产生的能耗。文献[13-14]将 $P_{ac}$ 与处理器利用率 $u_{CPU}$、内存访问率 $u_{mem}$、硬盘输入/输出请求率 $u_{disk}$、网络输入/输出请求率 $u_{net}$ 等参数视为线性相关，建立线性回归模型，如式(8)所示。

$$P^{IT}=P_{base}+P_{ac}+\Delta P \tag{7}$$

$$P_{ac}=C_{CPU}u_{CPU}+C_{mem}u_{mem}+C_{disk}u_{disk}+C_{net}u_{net} \tag{8}$$

式中：$\Delta P$ 是模型的修正因子；$C_{CPU}$、$C_{mem}$、$C_{disk}$ 和 $C_{net}$ 分别为处理器、内存、磁盘和网络接口的系数。

3）分段线性化模型。实际运行场景下，IT 设备能耗和服务器启用数量呈非线性相关，因此，可以将 IT 设备能耗曲线分为 3 个部分、4 个点，建立准确性更高的分段线性化模型[16]，即：

$$P^{IT}=\begin{cases}k_1(m_t-m_1)+P_{base}, & m_{i,t}\in[m_1,m_2)\\ k_2(m_t-m_2)+k_1(m_2-m_1)+P_{base}, & m_{i,t}\in[m_2,m_3)\\ k_3(m_t-m_3)+k_2(m_3-m_2)+k_1(m_2-m_1)+P_{base}, & m_{i,t}\in[m_3,m_4]\end{cases} \tag{9}$$

式中：$k_w(\forall w\in\{1,2,3\})$ 是 3 个部分的数据中心能耗曲线斜率，表示不同状态下，启用一台服务器时的能耗增量；$m_n(\forall n\in\{1,2,3,4\})$ 为 4 个点对应的 $x$ 轴，表示数据中心内启用服务器的数量。

4）动态模型。随着动态电压和频率缩放(dynamic voltage/frequency scaling，DVFS)技术的应用与发展，可以基于服务器的运行频率、电压及利用率建立 $P^{IT}$ 的动态模型[17]，即：

$$P^{IT}=C_1 f(U)^2\psi\sqrt{a^2+b^2} \tag{10}$$

式中：$f$ 和 $U$ 分别表示服务器的运行频率和电压；$\psi$ 表示数据任务量；$a$、$b$ 和 $C_1$ 均为系数。

## 2　数据中心消纳可再生能源潜力

### 2.1　定性分析

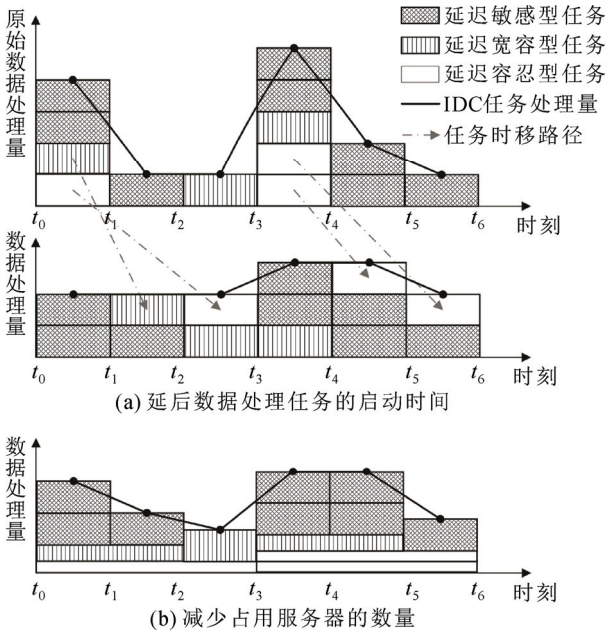
将IDC接收到的数据处理任务按照可延迟等级划分为 3 个类型：延迟敏感型任务、延迟宽容型任务和延迟容忍型任务。延迟敏感型任务，例如：实时通信数据处理，对处理时效性要求较高，如果延后处理将会影响 QoS，进而造成经济损失。而延迟宽容型任务和延迟容忍型任务，例如：大规模的科学计算，则可以不进行实时处理，只要在 QoS 时间约束内完成即可，通常不会对用户用电体验造成影响[18]。

因此，在时间维度上，同一数据中心内部通过延后或延长宽容型任务和容忍型任务的处理时间来改变数据中心整体用电曲线，如图 1 所示。其中，

表 1　数据中心 IT 设备能耗建模方法

Table 1　Energy consumption modeling methods for IT equipment in data centers

| 模型 | 建模方法 | 优点 | 不足 | 文献 |
|---|---|---|---|---|
| 加性模型 | 内部服务器能耗之和 | 模型复杂程度低 | 存在无法独立测量子系统能耗值的问题 | [12] |
| 线性回归模型 | 静态能耗+动态能耗 | 形式简单，易于训练 | 易产生较大误差，且实际中 IT 设备的功耗随服务器利用率的增长呈非线性趋势 | [13-15] |
| 分段线性化模型 | 与服务器运行数量关联 | 模型准确性较高 | 未考虑 IDC 内部服务器的差异性 | [16] |
| 动态模型 | 基于 DVFS 技术 | 便于灵活控制 | 不适用于需要精准计算能耗的场景 | [17] |




(a) 延后数据处理任务的启动时间

(b) 减少占用服务器的数量

图 1　数据中心的负荷时间转移特性

Fig.1　Data center load time transfer characteristics

减少任务占用的服务器数量可以延长任务处理时间。而在空间维度上，数据中心根据实际运行情况，通过数据链路将宽容型任务和容忍型任务转移至位于不同用电节点的其他数据中心进行处理，改变多个数据中心的用电曲线，如图 2 所示。以用电需求的转移替代电能的传输，不仅能减少输电过程中的损耗，也缓解了区域间输电阻塞。

可以看出，延迟宽容型任务和延迟容忍型任务使数据中心具备了显著的时空转移特性。而数据中心消纳可再生能源的本质就是充分利用该特性，将可灵活调节的数据任务转移至可再生能源出力较多的时段或地区进行处理。相较于一般可中断、可转移负荷，多个数据中心联合可以实现跨区域消纳。

基于此，待处理的延迟敏感型任务越少、任务 QoS 时间约束越宽松、不同数据中心所在地区的气候条件差异越大，数据中心的消纳潜力越大。

### 2.2 定量计算

在上述定性分析的基础上，近年来国内外学者大多采用 2 种定量计算方法对数据中心消纳可再生能源的潜力进行评估。

1）指标评价法[19-23]

从多个维度构建数据中心消纳可再生能源潜力的评估指标体系，并依据指标的重要性进行赋权，该评估方法虽然考虑较为全面，但部分指标受主观影响大，因此量化难度较高。

2）负荷模型法[24-26]

基于实际的数据中心负荷模型，通过仿真分析，量化评估其消纳潜力，不受主观因素影响，但结果依赖于模型性能及参数设置。对 IDC 而言，其负荷特性建模研究相对成熟，因此多数研究选择该方法评估数据中心消纳可再生能源的潜力。

例如：文献[27]根据数据中心能耗、服务器能耗和数据负荷量之间的线性函数关系构建模型，并通过IDC覆盖所有敏感型任务的最低能耗值和数据任务的可延迟界限量化评估其消纳潜力，如式(11)所示。基于此，根据表 2[28]中 3 个数据中心在时间槽 $t$ 内的运营数据计算得到，数据中心 3 在该时间段的可调节负荷量为 5315 MW。在没有进行任务迁移前，数据中心 3 的负荷量为 5762 MW，也即，在该场景下，数据中心 3 中 92.2% 的负荷可以进行调节，参与可再生能源消纳。

$$e_i^t = \beta_i + \frac{\vartheta_t \alpha_i - \sum_{j \in N, j \neq i} \left( \alpha_j \left( e_{j,\min}^t - \beta_j \right) \right)}{\alpha_i} \tag{11}$$

式中：$e_i^t$ 为 IDC$i$ 在时间槽$t$内的负荷调节潜力；$\alpha_i$ 表示 IDC$i$ 处理单位数据所需的最小变动功耗；$\beta_i$ 表示 IDC$i$ 功耗下限；$\vartheta_t$ 表示时间槽$t$内 IDC$i$ 所需处理的数据负荷总量；$e_{j,\min}^t$ 表示 IDC$j$ 满足任务处理延迟约束时的最小功耗值。IDC$i$ 和 IDC$j$ 为不同的数据中心。

## 3 数据中心消纳可再生能源的技术与管理途径

从技术和管理 2 个层面梳理数据中心消纳可再生能源的途径：一方面基于数据中心用能设备的优化调度与控制策略，在技术上实现合理调度、高效响应；另一方面通过经济激励和利润分摊机制，提高参与成员的主动性和积极性。

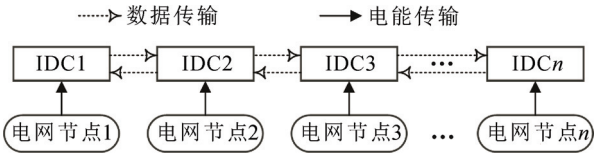



图 2 数据中心的负荷空间转移特性

Fig.2 Data center load space transfer characteristics

表 2 数据中心参数

Table 2 Parameters of data centers

| IDC 编号 | $\alpha_i$ / (MW·个$^{-1}$) | $\beta_i$ / MW | $\vartheta_t$ / (个·s$^{-1}$) | $e_{j,\min}^t$ / MW |
|---|---|---|---|---|
| 1 | $9.6\times10^{-4}$ | 2.0 | 0 | 77.0 |
| 2 | $9.6\times10^{-4}$ | 2.0 | 30 | 10.1 |
| 3 | $9.6\times10^{-4}$ | 2.0 | 5 999 970 | 9.4 |

### 3.1 基于可再生能源消纳的数据中心用能设备优化调度策略

表 3 从优化调度对象、目标、约束条件、数据任务转移方式和优化结果几个方面，总结了部分基于可再生能源消纳的数据中心用能设备优化调度策略，并在下文中进行了详细阐述[29-34]。

#### 3.1.1 优化调度对象

1）IT 设备

数据中心可以通过 IT 设备的监控器获取服务器节点的资源利用率、请求率和运行状态等信息，并通过自动缩放器(auto-scale)实现对 IT 设备物理层面的控制[28]。基于不同的 IT 设备能耗建模方法，控制指令可以通过改变启用服务器的数量、待处理的数据任务量或服务器的 CPU 频率来调整 IT 设备的能耗，如表 4 所示[29, 32, 35-38]。

调整数据中心待处理的数据任务量后，还需要将其分配部署在具体的服务器上进行计算，也即建立数据任务与服务器的映射关系。合理的分配不仅可以提高数据中心服务器的资源利用率，还可以减少数据交互传输的次数。例如：文献[39]基于新型多任务分解-协调有向无环图，提出了一种 Stoer-Wagner 二叉树(SWBT)云数据中心任务映射算法。

2）冷却设备

数据中心冷却设备的能耗约占数据中心总能耗的 30%，调节目标温度或控制设备启停可以改变其用电曲线[40-42]，具有可观的调节潜力。通常采用

表 3　基于可再生能源消纳的数据中心用能设备优化调度策略

Table 3　Typical optimal scheduling strategy for data center energy equipment based on renewable energy consumption

| 优化调度对象 | 调度设备 | 优化调度目标 1 | 优化调度目标 2 | 约束条件 | 数据任务转移 | 优化结果 | 文献 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 多个数据中心 | IT 设备 | 可再生能源消纳率最高 | 数据中心经济效益最高 | DK+SLA | 时空转移 | 较离线算法，数据中心运营成本降低约 18.5% | [29] |
| 多个数据中心 | IT 设备+冷却设备 | | 数据中心经济效益最高 | EC+SLA | 时空转移 | 较优化前，数据中心运营成本降低约 61% | [30] |
| 单个数据中心 | IT 设备 | | 数据中心联络线的功率波动最小 | SLA | 时间转移 | 有效平滑了数据中心联络线的功率波动 | [31] |
| 单个数据中心 | IT 设备 | | 数据中心经济效益最高 | DK+SLA | 时间转移 | 保证了风光出力的全额消纳，且提高了数据中心的经济收益 | [32] |
| 单个数据中心 | IT 设备 | | 数据中心经济效益最高 | SLA | 时间转移 | 提高了可再生能源利用率，降低了数据中心用电成本 | [33] |
| 单个数据中心 | IT 设备 | | 数据中心经济效益最高 | EC+SLA | 时间转移 | 较传统优化模型，降低了约 10%的数据中心运营成本 | [34] |

表 4　不同 IT 设备能耗建模方式下的调度对象

Table 4　Control objects in different IT device power consumption modeling approaches

| IT 设备能耗建模方法 | 调度对象 | 文献 |
|---|---|---|
| 基于服务器的 IT 设备线性能耗模型 | 启用服务器的数量 | [28, 32, 35] |
| 基于 DVFS 的能耗模型 | 待处理的数据任务量 | [36] |
| 基于 DVFS 的能耗模型 | 启用服务器的数量，服务器的 CPU 频率 | [37-38] |

基于模型预测控制(model predictive control，MPC)[43]或基于强化学习(reinforcement learning，RL)[44]的方法对其进行优化控制[10]。

3.1.2　优化调度目标

数据中心优化调度策略的主要目标之一是最大化可再生能源消纳率，但同时也需要考虑数据中心自身的效益与运行稳定性，提高数据中心参与可再生能源消纳的意愿。

1）数据中心联络线功率波动最小

具有随机性和波动性[45-46]的可再生能源发电机组向数据中心供电，可能会降低供电质量，进而对数据中心内精密的 CPU/GPU 芯片产生影响[31]。因此，最小化数据中心联络线上的功率波动是优化调度策略的重要目标。文献[47]将可再生能源出力波动视为干扰，通过引入双态低通滤波器得到数据中心用能设备的目标功率，并将实际运行功率与目标功率之间的差值最小作为优化调度目标。

2）数据中心经济效益最高

将最大化数据中心经济效益作为优化调度目标之一，可以有效促进数据中心主动参与可再生能源消纳。文献[29]提出相较于传统的发电机组，由发电成本低的可再生能源机组向数据中心供电可以显著降低数据中心的用电成本，增大其盈利空间。文献[30]考虑了不同地理位置、气候条件地区的电价差异，对位于 3 个不同地区的 16 个数据中心进行了优化调度，验证了相比于优化前，数据中心节省了约 61%的运营成本。

除此之外，在量化数据中心经济效益时，需要考虑数据任务空间转移所产生的额外经济成本。文献[48]将迁移成本分为了数据传输成本和 IDC 排队延迟成本。其中，数据传输成本由迁移的数据任务量大小 $S_h$ 和每传输单位数据需要向网络支付的费用 $N^{\text{price}}$ 共同计算，如式(12)所示。排队延迟成本考虑了迁移过程中可能造成的任务处理超时情况，例如：由可再生能源机组大量供电的某 IDC 持续高容量运行，导致其内部服务器和网络设备出现问题，无法及时处理传入的数据任务，造成经济损失。平均排队延迟可由式(13)计算。

$$C_i(\tau)=\sum_{h=1}^{|H|}\sum_{i=1}^{I}\left(N^{\text{price}}S_h\right) \tag{12}$$

$$d_{h,i}^{\text{queue}}(\tau)=\frac{1}{R_{h,i}^{\text{cal}}(\tau)-R_{h,i}^{\text{arr}}(\tau)} \tag{13}$$

式中：$C_i(\tau)$ 表示数据中心 $i$ 的数据传输成本；$|H|$ 为数据处理任务类型的集合，$h$ 表示单种任务类型，$h=1,2,\cdots,|H|$ 且 $h\in H$；$S_h$ 表示第 $h$ 种任务的大小，单位为 GB；$I$ 为数据中心的数量；$d_{h,i}^{\text{queue}}(\tau)$ 表示任务 $h$ 在第 $i$ 个数据中心的预期排队延迟；$R_{h,i}^{\text{cal}}(\tau)$ 表示数据中心 $i$ 的最大计算速率；$R_{h,i}^{\text{arr}}(\tau)$ 表示数据中心 $i$ 的任务到达率。

3）数据中心服务质量最优

数据中心接收到的数据处理任务均有最晚完成时间限制，如果在规定时间内未完成，将会对数

据中心的服务质量产生负面影响。文献[35]通过平均延迟概率来衡量 QoS 水平，如式(14)所示，并将其作为数据中心优化调度目标之一。

$$P_i^{\mathrm{av}} = \sum_{i=1}^{I} P_i(m_i(t),\psi_i(t)) / M_i \tag{14}$$

式中：$P_i^{\mathrm{av}}$ 是数据中心 $i$ 能达到的最优 QoS 水平；$P_i(m_i(t),\psi_i(t))$ 表示 Erlang 损失函数；$m_i(t)$ 和 $\psi_i(t)$ 分别表示数据中心 $i$ 在 $t$ 时刻启用的服务器数量和接收到的数据任务量；$M_i$ 表示数据中心 $i$ 拥有的服务器数量。

3.1.3 优化调度约束条件

1）电力平衡(energy constraints，EC)约束：系统供用电平衡和最大功率输出约束[49]。即：

$$\begin{cases} P_{i,t}^{\mathrm{grid}} + P_{i,t}^{\mathrm{re}} = P^{\mathrm{IDC}} \\ 0 \le P_{i,t}^{\mathrm{re}} \le P_{\max}^{\mathrm{re}} \end{cases} \tag{15}$$

式中：$P_{i,t}^{\mathrm{grid}}$ 为数据中心从大电网获取的电能；$P_{i,t}^{\mathrm{re}}$ 为数据中心从可再生能源发电机组获取的电能；$P_{\max}^{\mathrm{re}}$ 为可再生能源发电机组最大功率输出。

2）任务等级协议(service-level agreement，SLA)约束：每个数据处理任务的执行时间都有严格的 SLA 约束，且服务器的资源利用率 $\mu_i$ 在任何时候都不能超过上限 $\mu_{i,\max}$ [49]。即：

$$\begin{gathered} 0 \le t_{\mathrm{delay}}(i,h) \le \Delta t_{\mathrm{delay,max}}(i,h) : \forall h \\ 0 \le \mu_i \le \mu_{i,\max} : \forall i \end{gathered} \tag{16}$$

式中：$t_{\mathrm{delay}}(i,h)$ 为数据处理任务的延迟时间；$\Delta t_{\mathrm{delay,max}}(i,h)$ 为数据处理任务的最大可延迟时间。

3）数据链路(data link，DK)约束：多数据中心联合消纳可再生能源时需要考虑数据处理任务空间转移的约束。文献[50]考虑了数据任务传输过程中会受到链路容量限制，因此引入了网络阻塞率和带宽约束，用 2 种启发式算法近似求解任务迁移方案，在降低 IDCs 用电成本和提高可再生能源消纳率的基础上，避免了数据链路拥塞造成 QoS 降低的问题。文献[51]将每个数据中心的最大服务器数量作为约束条件，减少了数据处理任务排队情况。

3.1.4 数据中心用能设备优化调度策略

由于可再生能源发电机组出力受当天的环境、气候影响[52-55]，无法提前获取准确的出力曲线，且出力过程中也具有波动性和随机性，因此，一方面，可以耦合传统发电机组或储能装置共同参与可再生能源消纳，保证数据中心的 QoS[56]，例如：文献[47]提出了一种通过 IDC 和不间断电源(uninterruptable power supply，UPS)共同消纳风/光发电机组出力的方法。由 IDC 处理高频波动，UPS 处理低频和大范围的功率波动。该方法充分利用了 IDC 内部常配备的 UPS，使得 IDC 用电曲线与目标用电曲线之间的平均绝对误差达到 0.018%。文献[32]将 IDC 和风光水互补系统进行了耦合，其中，水电机组代替了 UPS 的部分作用，有效提高了经济效益。其调度对象包括 IT 设备和内部空调，可调节空间更大。文献[57]探讨了完全使用配备储能装置的可再生能源机组向多个数据中心供电的可行性，验证了由数据中心和储能装置联合追踪地区可再生能源出力曲线，实现数据中心所在地区源荷平衡，可以更为有效地利用能源，此外，还论证了小规模储能设备的有效性。

另一方面，可以结合可再生能源出力预测模型或不确定性建模[58-62]，提前规划用电曲线，例如：文献[33]基于可再生能源发电出力的短期预测结果，以最大化消纳可再生能源为首要目标，对 IDC 任务进行优化调度，当可再生能源出力不足时，引入传统能源，并根据实时电价分配数据处理任务。文献[34]在孤岛数据中心微电网场景下，通过灵活不确定性集合和可仿射调节策略处理风电机组出力和实时工作量的不确定性，然后以 IDC 运行成本最低和风电利用率最高为目标，建立 IDC 日前优化调度模型。基于预测结果对 IDCs 用电曲线进行优化调度，可以有效追踪可再生能源出力曲线，但无法充分利用数据中心实时接收到的工作任务。

### 3.2 数据中心参与可再生能源消纳的激励机制

可再生能源发电机组出力具有随机性和波动性，因此参与可再生能源消纳的数据中心会面临一系列问题，例如：供电可靠性降低、数据处理任务延后风险增加、频繁启停导致服务器寿命减少等。对于设备拥有者和实际使用者为同一主体的自管式数据中心而言，显著减少的用电成本可以提供足够的经济激励。但是对设备拥有者和实际使用者并非同一主体的托管式数据中心，还需考虑激励其租户积极参与可再生能源消纳的机制。

文献[63]利用反向拍卖，根据与租户商定的消纳可再生能源量向租户直接提供经济补偿。文献[64]在现有的基于使用量确定租户租金模式的基础上，根据租户设定的任务截止时间，按比例发放经济奖励。实行该机制后，不仅电网用电峰值负荷显著降低，IDC 在自身利润没有下降的同时能源成本也呈降低趋势。文献[65]引入纳什议价理论，由 IDCs 拥

有者和租户进行议价，使得整体经济效益最大化，再根据比例将收益分摊给双方。在该方案下，托管式数据中心运营商节省了大量用电成本，而租户也获得了额外的经济报酬。文献[66]提出了一个合作框架，确保每个租户参与合作获得的利润不低于独立工作时的利润，并通过沙普利值法确定托管式数据中心参与可再生能源消纳获得的全部利润在租户之间的分配结果。文献[67]提出了一种以市场为导向的激励机制，其中包含本地激励机制、全局激励机制和服务器共享激励机制，鼓励用户释放闲置服务器资源参与可再生能源的消纳。

## 4　“东数西算”背景下多数据中心联合消纳可再生能源途径展望

2022 年，中国约 2700 亿 kWh 的电量用于算力，而到 2023 年，有望超过 3100 亿 kWh，根据国家“东数西算”工程的布局，大量的数据任务传输至可再生资源丰富地区的集群式数据中心，必然会发挥更大的消纳潜力，提高所在地区的风、光等清洁能源利用率。因此，根据对数据中心消纳可再生能源研究现状的梳理，结合我国实际国情，对“东数西算”背景下多数据中心联合消纳可再生能源的途径展望如下：

1）结合人工智能技术，降低多数据中心调度误差。

目前，基于可再生能源消纳的数据中心优化调度策略多采用线性回归模型或动态模型量化用电设备能耗。这虽然有效降低了求解难度，但应用于大型数据中心集群时，理论计算结果和实际控制结果会有难以忽略的误差。因此，采用更能准确描述用电设备运行状态的物理模型，结合人工智能技术解决非线性问题，可以提高数据中心优化调度的准确度。

2）搭建算力一体化平台，实现计算任务跨枢纽调度。

2023 年 2 月 24 日，我国首个东数西算一体化算力服务平台在宁夏银川正式上线运营，成为全国各行业算力流通调度交易的载体。平台利用飞速发展的数据信息技术将地理位置分散的算力资源有效聚合在一起。在此基础上，建立全国算力枢纽一体化平台，可以实现八大算力枢纽间的信息交互，有效利用不同地区间的气候、环境差异，提高可再生能源消纳率和数据处理任务时效性。

3）推进数据中心集群消纳可再生能源的交易模式和市场机制建设。

目前，可再生能源市场配套交易体系主要包括绿证交易和碳排放权交易，但是整体交易模式和市场机制尚未成熟。在此背景下，我国八大算力枢纽和东部负荷密集地区又归属于不同的电力市场，进一步增大了交易难度。因此，亟待完善我国可再生能源市场跨地区的交易模式和市场机制。此外，也需完善数据中心参与可再生能源消纳的相关激励机制与违约的惩罚机制，合理分摊风险和收益。

## 5　总结

本文根据数据中心能耗模型、数据中心消纳可再生能源潜力和多个数据中心联合消纳可再生能源途径的顺序，进行了研究现状的综述及分析，主要有以下 3 个方面：

1）数据中心的总能耗是内部用电设备能耗之和，因此，分别梳理了数据中心常用的 2 种冷却设备能耗模型和 IT 设备的 4 种建模方法。

2）通过定性分析和对定量计算方法的总结，归纳得到数据中心消纳可再生能源的潜力与其接收到的数据任务可延迟界限强相关。

3）从技术和管理 2 个层面对数据中心消纳可再生能源途径进行了综述。在技术层面，通过优化调度策略改变数据中心用电曲线，追踪可再生能源出力曲线；在管理层面，给予数据中心经济激励，并应用合理的效益分摊机制，提高数据中心参与可再生能源消纳的积极性。

最后，结合上述研究现状和我国实际国情，展望了“东数西算”背景下多个数据中心联合消纳可再生能源的途径。

## 参考文献　References

[1] 耿圣杰，贾燕冰，江坷滕，等. 电网数据中心服务器容量及其综合供能系统联合规划策略研究[J]. 电网技术，2022，46(9)：3281-3289.
GENG Shengjie, JIA Yanbing, JIANG Keteng, et al. Joint planning strategy of grid data center server capacity and its integrated energy supply system[J]. Power System Technology, 2022, 46(9): 3281-3289.

[2] 马为民，王　玲，李　明，等. 新型电力系统中的特高压直流输电 SLCC 换流技术[J]. 高电压技术，2022，48(12)：4941-4948.
MA Weimin, WANG Ling, LI Ming, et al. SLCC converter technology of UHVDC transmission in new power system[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(12): 4941-4948.

[3] 谷丽君. 基于热感知的数据中心能耗优化策略研究[D]. 北京：华北电力大学，2019.
GU Lijun. Research on temperature-aware energy optimization strate-

gy in data center[D]. Beijing, China: North China Electric Power University, 2019.

[4] 周远翔，陈健宁，张 灵，等.“双碳”与“新基建”背景下特高压输电技术的发展机遇[J]. 高电压技术，2021，47(7)：2396-2408.
ZHOU Yuanxiang, CHEN Jianning, ZHANG Ling, et al. Opportunity for developing ultra high voltage transmission technology under the emission peak, carbon neutrality and new infrastructure[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(7): 2396-2408.

[5] CHEN M, GAO C W, SONG M, et al. Internet data centers participating in demand response: a comprehensive review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2020, 117: 109466.

[6] 朱介北，杨顺坡，俞露杰，等. 数据中心制冷系统即时消纳可再生能源的建模和变温控制[J]. 电力系统自动化，2022，46(20)：13-22.
ZHU Jiebei, YANG Shunpo, YU Lujie, et al. Modeling and variable temperature control for instant consumption of renewable energy in data center cooling systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(20): 13-22.

[7] 冯 成，王 毅，陈启鑫，等. 能源互联网下的数据中心能量管理综述[J]. 电力自动化设备，2020，40(7)：1-9.
FENG Cheng, WANG Yi, CHEN Qixin, et al. Review of energy management for data centers in energy internet[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(7): 1-9.

[8] VOS D. Reducing the data center energy costs through the implementation of short-term thermal energy storage[C]// Proceedings in the 8th Int Renew Energy Storage Conference. Berlin, Germany: Elsevier, 2013: 11-19.

[9] LEE K P, CHEN H L. Analysis of energy saving potential of air-side free cooling for data centers in worldwide climate zones[J]. Energy and Buildings, 2013, 64: 103-112.

[10] ZHANG Q X, MENG Z H, HONG X W, et al. A survey on data center cooling systems: technology, power consumption modeling and control strategy optimization[J]. Journal of Systems Architecture, 2021, 119: 102253.

[11] LEWIS A W, TZENG N F, GHOSH S. Runtime energy consumption estimation for server workloads based on chaotic time-series approximation[J]. ACM Transactions on Architecture and Code Optimization, 2012, 9(3): 15.

[12] 高晋坤，余 娟，刘珏麟，等. 考虑多时段设备耦合的数据中心能效优化方法[J]. 电力系统自动化，2022，46(15)：153-161.
GAO Jinkun, YU Juan, LIU Juelin, et al. Optimization method for energy efficiency of data center considering multi-period equipment coupling[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(15): 153-161.

[13] BELOGLAZOV A, ABAWAJY J, BUYYA R. Energy-aware resource allocation heuristics for efficient management of data centers for cloud computing[J]. Future Generation Computer Systems, 2012, 28(5): 755-768.

[14] ALAN I, ARSLAN E, KOSAR T. Energy-aware data transfer tuning[C]// 2014 14th IEEE/ACM International Symposium on Cluster, Cloud and Grid Computing. Chicago, USA: IEEE, 2014: 626-634.

[15] JIN C Q, BAI X L, YANG C, et al. A review of power consumption models of servers in data centers[J]. Applied Energy, 2020, 265: 114806.

[16] CHEN S R, LI P, JI H R, et al. Operational flexibility of active distribution networks with the potential from data centers[J]. Applied Energy, 2021, 293: 116935.

[17] JI H R, CHEN S R, YU H, et al. Robust operation for minimizing power consumption of data centers with flexible substation integration[J]. Energy, 2022, 248: 123599.

[18] 陈冬林，邹安琪，王 蕾，等.“东数西算”赋能数据中心可再生能源消纳研究[J]. 情报杂志，2023，42(7)：77-85.
CHEN Donglin, ZOU Anqi, WANG Lei, et al. Research on the renewable energy accommodation in east data and west calculation empowering data centers[J]. Journal of Intelligence, 2023, 42(7): 77-85.

[19] 陈 冰，伦振坚，张学昶，等. 面向数据中心的柔性直流配电系统多目标综合评估[J]. 高电压技术，2022，48(10)：3987-3995.
CHEN Bing, LUN Zhenjian, ZHANG Xuechang, et al. Multi-objective comprehensive evaluation method of flexible DC distribution system for data center application scenarios[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(10): 3987-3995.

[20] 宋 毅，罗凤章，冯少亭，等. 面向区域网格的灵活性资源响应潜力评估方法[J]. 电力系统及其自动化学报，2023，35(8)：103-113.
SONG Yi, LUO Fengzhang, FENG Shaoting, et al. Flexible resource response potential evaluation method for regional grid[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2023, 35(8): 103-113.

[21] 郭浩然，刘 洋，许立雄，等. 基于多源异构数据关联规则分析的需求响应潜力居民用户辨识方法[J]. 电网技术，2023，47(5)：1950-1961.
GUO Haoran, LIU Yang, XU Lixiong, et al. Identification method for demand response potential of residential users based on correlation analysis of multi-source heterogeneous data[J]. Power System Technology, 2023, 47(5): 1950-1961.

[22] 和 鹏，吴兴扬，何廷一，等. 风电参与电网频率调控潜力的价值评估研究[J]. 可再生能源，2023，41(7)：986-994.
HE Peng, WU Xingyang, HE Tingyi, et al. Research on value evaluation of potential of wind power participating in power grid frequency regulation[J]. Renewable Energy Resources, 2023, 41(7): 986-994.

[23] 张大海，孙 锴，史一茹，等. 考虑灵活资源及模数驱动方法的电力系统调度方法综述[J/OL]. 高电压技术，2023：1-13[2023-12-15]. https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20230766.
ZHANG Dahai, SUN Kai, SHI Yiru, et al. Overview of power system dispatching methods considering flexible resources and model-data driven[J/OL]. High Voltage Engineering, 2023: 1-13[2023-12-15]. https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20230766.

[24] AGBONAYE O, KEATLEY P, HUANG Y, et al. Mapping demand flexibility: a spatio-temporal assessment of flexibility needs, opportunities and response potential[J]. Applied Energy, 2021, 295: 117015.

[25] 张 新，岳园园，曾 好，等. 面向电网规划的重点需求侧资源响应潜力评估方法[J]. 电力系统自动化，2023，47(16)：162-170.
ZHANG Xin, YUE Yuanyuan, ZENG Hao, et al. Response potential evaluation method of key demand-side resources for power grid planning[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(16): 162-170.

[26] 张华鲁，严干贵，石 杰，等. 蓄热式电采暖柔性负荷特性建模及可调潜力研究[J]. 高电压技术，2022，48(6)：2108-2116.
ZHANG Hualu, YAN Gangui, SHI Jie, et al. Research on the characteristics modeling and adjustable potential of regenerative electric heating flexible load[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(6): 2108-2116.

[27] 陈 敏，高赐威，陈宋宋，等. 考虑数据中心用电负荷调节潜力的双层经济调度模型[J]. 中国电机工程学报，2019，39(5)：1301-1313.
CHEN Min, GAO Ciwei, CHEN Songsong, et al. Bi-level economic dispatch modeling considering the load regulation potential of internet data centers[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(5): 1301-1313.

[28] TOOSI A N, QU C H, DE ASSUNÇÃO M D, et al. Renewable-aware geographical load balancing of web applications for sustainable data centers[J]. Journal of Network and Computer Applications, 2017, 83:

155-168.

[29] KHOSRAVI A, TOOSI A N, BUYYA R. Online virtual machine migration for renewable energy usage maximization in geographically distributed cloud data centers[J]. Concurrency and Computation: Practice and Experience, 2017, 29(18): e4125.

[30] HOGADE N, PASRICHA S, SIEGEL H J, et al. Minimizing energy costs for geographically distributed heterogeneous data centers[J]. IEEE Transactions on Sustainable Computing, 2018, 3(4): 318-331.

[31] YANG T, ZHAO Y J, PEN H B, et al. Data center holistic demand response algorithm to smooth microgrid tie-line power fluctuation[J]. Applied Energy, 2018, 231: 277-287.

[32] 温正楠，刘继春. 风光水互补发电系统与需求侧数据中心联动的优化调度方法[J]. 电网技术，2019，43(7)：2449-2459.
WEN Zhengnan, LIU Jichun. A optimal scheduling method for hybrid wind-solar-hydro power generation system with data center in demand side[J]. Power System Technology, 2019, 43(7): 2449-2459.

[33] LEI H T, ZHANG T, LIU Y J, et al. SGEESS: smart green energy-efficient scheduling strategy with dynamic electricity price for data center[J]. Journal of Systems and Software, 2015, 108: 23-38.

[34] LIAN Y C, LI Y Z, ZHAO Y, et al. Robust multi-objective optimization for islanded data center microgrid operations[J]. Applied Energy, 2023, 330: 120344.

[35] CHIU W Y, HSIEH W K, CHEN C M, et al. Multiobjective demand response for internet data centers[J]. IEEE Transactions on Emerging Topics in Computational Intelligence, 2022, 6(2): 365-376.

[36] ALSADIE D. A metaheuristic framework for dynamic virtual machine allocation with optimized task scheduling in cloud data centers[J]. IEEE Access, 2021, 9: 74218-74233.

[37] GU L, ZENG D Z, BARNAWI A, et al. Optimal task placement with QoS constraints in geo-distributed data centers using DVFS[J]. IEEE Transactions on Computers, 2015, 64(7): 2049-2059.

[38] 刘　迪，曹军威，刘明爽. 分布式数据中心信息能量协同优化策略[J]. 清华大学学报(自然科学版)，2022，62(12)：1864-1874.
LIU Di, CAO Junwei, LIU Mingshuang. Collaborative optimization strategy of information and energy for distributed data centers[J]. Journal of Tsinghua University (Science & Technology), 2022, 62(12): 1864-1874.

[39] YANG T, HAN X T, LI H, et al. Parallel scientific power calculations in cloud data center based on decomposition-coordination directed acyclic graph[J]. IEEE Transactions on Cloud Computing, 2023, 11(3): 2491-2502.

[40] NESMACHNOW S, PERFUMO C, GOIRI Í. Controlling datacenter power consumption while maintaining temperature and QoS levels[C]//2014 IEEE 3rd International Conference on Cloud Networking. Luxembourg: IEEE, 2014: 242-247.

[41] NESMACHNOW S, PERFUMO C, GOIRI Í. Holistic multiobjective planning of datacenters powered by renewable energy[J]. Cluster Computing, 2015, 18(4): 1379-1397.

[42] ITURRIAGA S, NESMACHNOW S, TCHERNYKH A, et al. Multiobjective workflow scheduling in a federation of heterogeneous green-powered data centers[C]//2016 16th IEEE/ACM International Symposium on Cluster, Cloud and Grid Computing (CCGrid). Cartagena, Colombia: IEEE, 2016: 596-599.

[43] LAZIC N, LU T, BOUTILIER C, et al. Data center cooling using model-predictive control[C]//Proceedings of the 32nd International Conference on Neural Information Processing Systems. Montréal, Canada: Curran Associates Inc., 2018: 3818-3827.

[44] VAN LE D, WANG R R, LIU Y B, et al. Deep reinforcement learning for tropical air free-cooled data center control[J]. ACM Transactions on Sensor Networks, 2021, 17(3): 24.

[45] 侯　恺，刘泽宇，贾宏杰，等. 含高比例可再生能源的电力系统运行可靠性解析评估方法综述[J]. 高电压技术，2023，49(7)：2697-2710.
HOU Kai, LIU Zeyu, JIA Hongjie, et al. Review of analytical methods for operation reliability assessment of power systems with high-penetration renewable energy[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(7): 2697-2710.

[46] 汪　鸿，朱正甲，陈建华，等. 基于人工智能技术与物理方法结合的新能源功率预测研究[J]. 高电压技术，2023，49(增刊 1)：111-117.
WANG Hong, ZHU Zhengjia, CHEN Jianhua, et al. Research on new energy power prediction based on the combination of artificial intelligence technology and physical methods[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(Supplement 1): 111-117.

[47] YANG T, HOU Y C, LEE Y C, et al. Power control framework for green data centers[J]. IEEE Transactions on Cloud Computing, 2022, 10(4): 2876-2886.

[48] HOGADE N, PASRICHA S, SIEGEL H J. Energy and network aware workload management for geographically distributed data centers[J]. IEEE Transactions on Sustainable Computing, 2022, 7(2): 400-413.

[49] YANG T, JIANG H, HOU Y C, et al. Carbon management of multi-datacenter based on spatio-temporal task migration[J]. IEEE Transactions on Cloud Computing, 2023, 11(1): 1078-1090.

[50] ZHANG L, HAN T, ANSARI N. Renewable energy-aware inter-datacenter virtual machine migration over elastic optical networks[C]//2015 IEEE 7th International Conference on Cloud Computing Technology and Science (CloudCom). Vancouver, Canada: IEEE, 2015: 440-443.

[51] GU C L, LIU C Y, ZHANG J T, et al. Green scheduling for cloud data centers using renewable resources[C]//2015 IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS). Hong Kong, China: IEEE, 2015: 354-359.

[52] 王开艳，杜浩东，贾　嵘，等. 基于相似日聚类和 QR-CNN-BiLSTM 模型的光伏功率短期区间概率预测[J]. 高电压技术，2022，48(11)：4372-4384.
WANG Kaiyan, DU Haodong, JIA Rong, et al. Short-term interval probability prediction of photovoltaic power based on similar daily clustering and QR-CNN-BiLSTM model[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(11): 4372-4384.

[53] 张青山，王丽婕，郝　颖，等. 基于卫星云图和晴空模型的分布式光伏电站太阳辐照度超短期预测[J]. 高电压技术，2022，48(8)：3271-3281.
ZHANG Qingshan, WANG Lijie, HAO Ying, et al. Ultra-short-term solar irradiance prediction of distributed photovoltaic power stations based on satellite cloud images and clear sky model[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(8): 3271-3281.

[54] 白捷予，董　存，王　铮，等. 考虑云层遮挡的光伏发电功率超短期预测技术[J]. 高电压技术，2023，49(1)：159-168.
BAI Jieyu, DONG Cun, WANG Zheng, et al. Ultra-short-term prediction of photovoltaic power generation considering cloud cover[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(1): 159-168.

[55] 刘雅婷，杨　明，于一潇，等. 基于多场景敏感气象因子优选及小样本学习与扩充的转折性天气日前风电功率预测[J]. 高电压技术，2023，49(7)：2972-2982.
LIU Yating, YANG Ming, YU Yixiao, et al. Transitional-weather-considered day-ahead wind power forecasting based on multi-scene sensitive meteorological factor optimization and few-shot learning[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(7): 2972-2982.

[56] LIU L J, SUN H B, LI C, et al. RE-UPS: an adaptive distributed ener-

gy storage system for dynamically managing solar energy in green datacenters[J]. The Journal of Supercomputing, 2016, 72(1): 295-316.

[57] LIU Z H, LIN M H, WIERMAN A, et al. Geographical load balancing with renewables[J]. ACM SIGMETRICS Performance Evaluation Review, 2011, 39(3): 62-66.

[58] YANG H F, JIANG P, WANG Y, et al. A fuzzy intelligent forecasting system based on combined fuzzification strategy and improved optimization algorithm for renewable energy power generation[J]. Applied Energy, 2022, 325: 119849.

[59] SAHOO S K, YANINE F F, KULKARNI V, et al. Editorial: recent advances in renewable energy automation and energy forecasting[J]. Frontiers in Energy Research, 2023, 11: 1195418.

[60] SHAMSI M, CUFFE P. Prediction markets for probabilistic forecasting of renewable energy sources[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2022, 13(2): 1244-1253.

[61] GABOITAOLELWE J, ZUNGERU A M, YAHYA A, et al. Machine learning based solar photovoltaic power forecasting: a review and comparison[J]. IEEE Access, 2023, 11: 40820-40845.

[62] LI G M, YU L Y, ZHANG Y, et al. An integrated method with adaptive decomposition and machine learning for renewable energy power generation forecasting[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2023, 30(14): 41937-41953.

[63] ZHANG L Q, REN S L, WU C, et al. A truthful incentive mechanism for emergency demand response in colocation data centers[C]// 2015 IEEE Conference on Computer Communications (INFOCOM). Hong Kong, China: IEEE, 2015: 2632-2640.

[64] ZHAN Y, GHAMKHARI M, XU D, et al. Extending demand response to tenants in cloud data centers via non-intrusive workload flexibility pricing[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(4): 3235-3246.

[65] GUO Y X, LI H N, PAN M. Colocation data center demand response using Nash bargaining theory[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(5): 4017-4026.

[66] ZHANG P, YANG P, ZHAO Z L, et al. A framework for several electricity retailers cooperatively implement demand response to distributed data center[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2023, 14(1): 277-289.

[67] WANG Y S, ZHANG F, CHI C, et al. A market-oriented incentive mechanism for emergency demand response in colocation data centers[J]. Sustainable Computing: Informatics and Systems, 2019, 22: 13-25.



**苏　娟**

1980—，女，博士，副教授，博导

主要从事农村能源优化运行与发展战略、电力市场理论与关键技术方面的研究

E-mail: sujuan@cau.edu.com

SU Juan

Ph.D.

Associate professor



**董彦君**(通信作者)

1997—，女，博士生

主要从事数据中心参与可再生能源消纳的关键技术和交易机制方面的研究

E-mail: dongyanjun@cau.edu.com

DONG Yanjun

Ph.D. candidate

Corresponding author

收稿日期　2023-07-31　修回日期　2023-11-28　　编辑　程子丰