

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.241429

算力-电力联合市场下数据中心与配电网集成规划： 一种多目标区间-随机优化方法

梁晨, 曾博, 雷乐意, 王涵, 王源, 张家祎

(新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 北京 102206)

摘要: 为解决数据中心在电力-算力联合市场与低碳配电网协同规划中的问题, 提出了一种多目标区间-随机优化方法。通过引入算力租赁机制, 优化了资源利用效率与经济效益, 同时降低了运营成本与碳排放。针对协同规划中的多目标优化与高维不确定性问题, 设计了一种基于分解的自适应约束处理区间多目标进化算法—采用两种交叉策略(adaptive constraint-handling interval multi-objective evolutionary algorithm based on decomposition with two crossover strategies, ACIMOE/D-TCS)。该算法能够高效求解帕累托前沿, 提供鲁棒性和可行性兼具的优化方案。结果表明, 数据中心参与算力市场显著提高了资源利用效率和经济效益, 同时有效降低了碳排放。通过对算力资源租赁与配电系统运行的优化, 所提模型在经济和环境效益方面取得显著提升, 为电力-算力联合市场下的协同规划问题提供了新的理论方法与解决方案。

关键词: 数据中心; 算力市场; 低碳配电网; 多目标优化; 区间-随机优化; 可再生能源

Integrated planning of data centers and distribution networks under the computing-electricity joint market: a multi-objective interval-stochastic optimization approach

LIANG Chen, ZENG Bo, LEI Yueyi, WANG Han, WANG Yuan, ZHANG Jiayi

(State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources (North China Electric Power University), Beijing 102206, China)

Abstract: To address the challenges in the collaborative planning of data centers into the low-carbon distribution networks under the computing-electricity joint market, this paper proposes a multi-objective interval-stochastic optimization approach. By introducing a computing power leasing mechanism, the method optimizes resource utilization efficiency and economic benefits while reducing operational costs and carbon emissions. To tackle the multi-objective optimization and high-dimensional uncertainty issues in the collaborative planning process, an adaptive constraint-handling interval multi-objective evolutionary algorithm based on decomposition with two crossover strategies (ACIMOE/D-TCS) is designed. This algorithm efficiently solves the Pareto frontier and provides robust and feasible optimization solutions. The results show that the participation of data centers in the computing power market significantly improves resource utilization efficiency and economic benefits, while also effectively reducing carbon emissions. Through the optimization of computing power resource leasing and distribution system operation, the proposed model achieves significant improvements in both economic and environmental benefits, providing new theoretical methods and solutions for collaborative planning in the computing-electricity joint market.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52177082).

Key words: data center; computing power market; low-carbon distribution network; multi-objective optimization; interval-stochastic optimization; renewable energy

0 引言

信息技术的迅猛发展使得数据中心成为支撑社

会经济的关键基础设施。然而, 数据中心的持续运营和高能耗对城市配电网构成了重大挑战。不稳定的用电需求增加了电网波动, 可能导致电力系统的功率质量下降和局部电网过载, 从而提高电网的运营成本^[1-3]。尤其是在低需求时段, 数据中心的负荷调度问题尤为突出, 这可能导致资源利用效率低下

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(52177082); 北京市科技新星计划项目资助(20220484007)

并增加配电网的运行成本^[4]。因此,急需制定与配电网的协同规划,以解决这些问题,避免电力需求波动对电网稳定性的负面影响,并优化资源配置。

数据中心与配电网协同规划研究已取得一些进展。文献[5]讨论了结合数据中心与可再生能源如光伏和风电以优化能源结构并降低碳排放;文献[6]指出,深度融合数据中心与配电网可以高效利用和动态调配能源,提高运行效率和环境性能;文献[7]建议通过提升冷却系统效率和服务器调度优化来降低能耗和碳排放;文献[8-9]分别探索了引入可再生能源减少对传统能源的依赖,以及利用智能电网和需求响应优化数据中心与配电网的动态协同。尽管如此,电力市场中资源共享和负载调度仍受到电力需求波动的影响,特别是在低需求时段,这导致了资源利用率的下降和运营成本的增加^[10-11]。

为提升资源利用效率与经济效益,研究人员探索了数据中心与配电网在算力市场(computing power market, CPM)中的协同策略。文献[12]介绍了 CPM 通过数据中心共享算力资源支持外部用户,实现资源动态调配;文献[13]表示数据中心参与 CPM 不仅增加了经济效益,也促进了配电网的资源高效利用和低碳发展;文献[14-15]探讨了 CPM 的定价和资源分配,展示了其整合电力与算力的潜力,推动了电力-算力市场的形成。尽管如此,现有研究主要关注 CPM 的经济与技术层面,并未深入考虑其对数据中心与配电网协同的全面影响。随着 CPM 引入,系统的不确定性增加,如算力需求与价格的变化,需开发新方法应对这些问题。

在不确定性处理方面,已有研究采用了多种新方法。文献[16]提出了一种基于场景生成的确定性优化(scenario-based deterministic optimization, SBDO)方法,通过构建多个未来场景进行独立优化,尽管计算复杂度较低,但对未来情景的假设过于理想化,实际应用中缺乏鲁棒性;文献[17]提出了一种基于调整灵敏度参数的自适应模糊优化(adaptive fuzzy optimization, AFO)方法,通过模糊集和模糊规则处理不确定性,尽管提高了系统的适应性,但可能导致的结果不够具体,限制其实际应用效果;文献[18-19]提出了基于贝叶斯推理模型和粒子群优化的贝叶斯优化(Bayesian optimization, BO)方法,采用贝叶斯推理生成不确定参数的概率分布,并结合粒子群优化技术进行优化,尽管理论上更为精确,但在实际应用中由于需要精确的概率分布信息,获取这些信息往往较为困难。针对这些问题,近年来,新的不确定性处理方法逐渐受到关注。文献[20]提出了一种基于量子计算的量子优化(quantum optimization,

QO)方法,通过量子计算在多维空间中寻找最优解,能够更好地处理复杂不确定性;文献[21]探讨了基于混合智能算法(hybrid intelligent algorithm, HIA)的方法,通过结合遗传算法和神经网络处理不确定性,为决策提供了更灵活的方案;文献[22]提出了一种基于区间分析的区间多目标优化(interval multi-objective optimization, IMOO)方法,通过将不确定参数表示为区间数,并结合区间运算和多目标优化技术处理不确定性,提供了更灵活的优化方案。然而,当不确定性具有显著的概率特征时,该方法可能无法准确刻画其影响。

针对上述不足,本文提出了一种多目标区间-随机优化方法,研究电力-算力联合市场下数据中心与配电网协同规划的问题,将 CPM 纳入协同规划框架,通过租赁算力资源优化资源利用效率和经济效益;部分不确定性采用区间表示,而另一部分则通过概率模型来描述,建立了基于条件风险的区间多目标优化模型(condition risk interval multi-objective programming, CRIMOP)模型。该模型以配电系统的经济成本和碳排放最小化为目标,通过优化服务器利用效率和可再生能源消纳来减少运营成本和碳排放,并研究数据中心与配电网的协同规划及其在电力-算力联合市场中的影响。

鉴于上述问题的复杂性,特别是在处理多目标和高维不确定性方面的挑战,本文设计了一种新的算法高效求解帕累托前沿。提出的多目标区间-随机优化方法在处理多目标模型和不确定性方面表现出色,能够提供更为鲁棒和可行的优化方案。

1 算力-电力联合市场下数据中心与配电网交互的系统架构

为提升能源效率与环境性能,现代数据中心正积极整合光伏和风电等可再生能源技术,这不仅优化了能源结构,显著降低了碳排放,还提高了能源自给率。数据中心内部的关键设备包括 IT 设备(如物理服务器)和辅助设备(如照明系统、冷却系统等),这些设备在运行过程中会产生大量散热,因此需要制冷机设备(air conditioning equipment, ACE)来调节温度,确保 IT 设备在适宜的环境下运行。

数据中心在 CPM 中的角色不仅包括提供计算资源,还租用算力以满足其自身的需求。通过 CPM,数据中心能够动态调整其算力资源,优化资源利用效率和经济效益。在计算资源供过于求时,数据中心可以将多余的算力出租给外部用户,从而产生额外收入;在计算需求高峰期,数据中心则可以从 CPM 租用额外的算力,确保服务质量。这种双向互

动的模式,使得数据中心在 CPM 中能够灵活地管理资源,提高整体运营效率。为了实现这一目标,数据中心采用前端代理实时监控计算资源的使用情况,并根据工作负载的特性进行动态分配,将工作负载分为可延迟工作负载(delayable workloads, DW)和实时工作负载(real-time workloads, RW)。

在电力系统深度信息化的背景下,数据中心与配电网的协同运行变得至关重要。能源供应商倾向于发展其数据中心,并采用先进的通信技术来增强

配电网的运行效率。通过多功能的运营模式,数据中心不仅提升了资源利用效率和经济效益,还支持了配电网的数据分析工作,确保其安全、高效运行。配电网则为数据中心提供可靠的电力供应,确保其稳定运行,并通过与数据中心的协同规划实现能源的高效利用和动态调配。

图 1 展示了包含配电网、数据中心和 CPM 的集成系统。包含数据中心的配电网主要包括 3 个要素:配电线路、数据中心本身以及可再生能源。

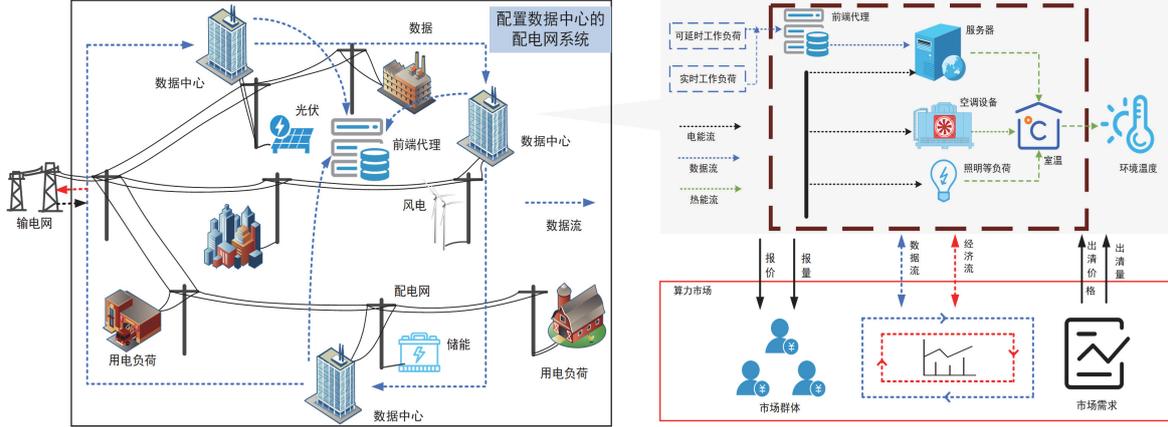


图 1 系统架构

Fig. 1 System architecture

配电网通过配电变压器与上级输电网相连,通过外部市场购电和分布式发电,为配电网内的用户(包括数据中心)提供电力供应服务。数据中心不仅与配电网进行数据交互,还通过 CPM 与外部用户进行算力交易。

在这种新场景下,配电网的任务是制定最佳的系统配置计划,以降低经济成本。然而,未经适当协调的数据中心整合可能导致发电过程中的碳排放增加。因此,在模型中必须考虑环境因素,构建多目标优化模型,以实现经济效益和环境效益的双赢。决策问题涉及多维不确定性,主要来源于可再生能源输出、批发市场电价、电力需求、工作负载和碳排放系数。本文以区间优化为主体框架,结合随机优化策略处理不确定性,对于大部分不确定性,利用区间优化构建预测置信区间;对于能准确预测其分布的不确定性,则采用随机优化方法处理。

2 数据中心参与 CPM 的多类型服务器配置与能效管理综合模型

2.1 工作负载处理模型

2.1.1 可延时工作负载

考虑到 DW 需求的性质, DW 的特性可表示为

式(1),式中各变量的物理含义参见附录 A 表 A1^[27]。

$$\begin{cases} W_{d,t}^{DW0} = \chi^{DW} \tilde{W}_{d,t}^0 \\ W_{d,t,s}^{DW} = W_{d,t}^{DW0} + \sum_{t'=1}^{t-1} W_{d,t',s}^{DWT} - \sum_{t'=t+1}^T W_{d,t',s}^{DWT} \\ 0 \leq W_{d,t',s}^{DWT} \leq W_{d,t}^{DW0} \\ \sum_{t'=t+1}^T W_{d,t',s}^{DWT} \leq W_{d,t}^{DW0} \end{cases} \quad (1)$$

2.1.2 实时工作负载

对于 RW 的调度控制,相关的约束为

$$\begin{cases} W_{d,t}^{RW0} = \chi^{RW} \tilde{W}_{d,t}^0 \\ W_{d,t,s}^{RW} = D_{d,t}^{RW0} - \sum_{d' \neq d, d' \in Q_{DC}} W_{dd',t,s}^{RW} \end{cases} \quad (2)$$

基于式(1)、式(2),考虑到工作负载的空间和时间分布,每个时间内需要由数据中心处理的总工作负载可以表述为

$$W_{d,t,s} = W_{d,t,s}^{DW} + W_{d,t,s}^{RW} \quad (3)$$

2.1.3 服务器类型与数据处理量均衡

在数据中心内,部署有多种类型的服务器,每一种服务器所处理的数据量之和必须精确匹配总数据量,以确保数据处理的完整性和准确性。

$$\sum_{k \in \Omega_k} W_{d,k,t,s} = W_{d,t,s} \quad (4)$$

2.1.4 服务质量要求

在处理工作负荷时, 必须考虑固有的传输和排队延迟。为了确保数据中心维持可接受的服务质量, 这些传输和排队延迟的总和必须低于工作负荷所允许的最大延迟阈值。基于 M/M/1 排队理论, 工作负荷的服务质量可以确定如式(5)所示。

$$\begin{cases} T_{d,k,t,s}^{\text{Queue}} = 1 / \left(\psi_k - \frac{W_{d,k,t,s}}{n_{d,k,t,s}^{\text{ser-on}} + n_{d,k,t,s}^{\text{Hire}}} \right) \\ T_{d,k,t,s}^{\text{Handle}} = \frac{1}{\psi_k} \\ T_{d,k,t,s}^{\text{Queue}} + T_{d,k,t,s}^{\text{Handle}} \leq T^{\text{Delay}} \end{cases} \quad (5)$$

2.2 热力学特性

2.2.1 服务器散热

由于数据中心服务器通常位于建筑物结构内部, 利用建筑物的蓄热特性和能量守恒原理, 可以制定数据中心的综合热平衡方程为

$$\Delta H_{d,t,s}^{\text{In-DC}} = \rho^{\text{Air}} C^{\text{Air}} V_d \Delta \tau_{d,t,s}^{\text{In-DC}} \quad (6)$$

2.2.2 通过墙壁的热交换功率

墙壁的热交换功率与数据中心建筑物的表面积以及室内外的温差有关, 由式(7)确定。

$$H_{d,t,s}^{\text{Out-In}} = k^w S^w (\tau_{d,t,s}^{\text{Out-DC}} - \tau_{d,t,s}^{\text{In-DC}}) \quad (7)$$

2.2.3 服务器散热功率

当服务器处于运行状态时, 其散热功率可以通过将其电功率消耗与散热系数 k^{Serv} 相乘来计算。

$$H_{d,t,s}^{\text{Serv}} = k^{\text{Serv}} P_{d,t,s}^{\text{Serv}} \quad (8)$$

2.2.4 辅助设备的散热功率

辅助设备(如室内照明和配电系统)的散热功率包括空载损耗和运行损耗, 可以通过式(9)进行量化。

$$\begin{cases} H_{d,t,s}^{\text{Aux}} = k^{\text{NI}} P_d^{\text{Rated}} + k^{\text{R}} P_{d,t,s}^{\text{Serv}} \\ P_d^{\text{Rated}} = n_d^{\text{Ser}} P_d^{\text{Ser-p}} + P_d^{\text{AC-R}} \end{cases} \quad (9)$$

数据中心建筑通常是无窗的封闭结构, 其内部热量受到 $H_{d,t}^{\text{Out-In}}$ 、 $H_{d,t}^{\text{Serv}}$ 、 $H_{d,t}^{\text{Aux}}$ 、 $H_{d,t}^{\text{AC}}$ 综合影响^[23]。

$$\begin{cases} \Delta H_{d,t,s}^{\text{In-DC}} = H_{d,t,s}^{\text{Out-In}} + H_{d,t,s}^{\text{Serv}} + H_{d,t,s}^{\text{Aux}} - H_{d,t,s}^{\text{AC}} \\ (H_{d,t,s}^{\text{Out-In}} + H_{d,t,s}^{\text{Serv}} + H_{d,t,s}^{\text{Aux}} - H_{d,t,s}^{\text{AC}}) \Delta t = \\ \rho^{\text{Air}} C^{\text{Air}} V_d (\tau_{d,t,s}^{\text{In-DC}} - \tau_{d,t-1,s}^{\text{In-DC}}) \end{cases} \quad (10)$$

2.2.5 气候温度限制

为确保数据中心内设备的安全和稳定运行, 必须将室内温度及其波动控制在规定的范围内^[24]。

$$\begin{cases} \tau_{d,t,s}^{\text{In-DC-min}} \leq \tau_{d,t,s}^{\text{In-DC}} \leq \tau_{d,t,s}^{\text{In-DC-max}} \\ \left| \tau_{d,t,s}^{\text{In-DC}} - \tau_{d,t-1,s}^{\text{In-DC}} \right| < \Delta \tau^{\text{In-DC}} \end{cases} \quad (11)$$

2.3 能耗特性

数据中心的能耗主要由服务器、冷却系统和各种辅助设备 3 部分^[25]组成。通常, 服务器和冷却系统共同使用的电量占数据中心整个能耗的 90% 以上^[26], 因此, 数据中心在运行时的总能耗可以表示为

$$P_{d,t,s}^{\text{DC}} = (P_{d,t,s}^{\text{Serv}} + P_{d,t,s}^{\text{AC}}) / \eta^{\text{DC}} \quad (12)$$

2.3.1 服务器能耗

服务器的能耗主要受活跃服务器的数量和给定时间范围内工作负载强度的影响, 数据中心内可以使用的服务器不仅受到最大数量的限制, 还受处理器水平限制, 其特征表示为

$$\begin{cases} P_{d,k,t,s}^{\text{Serv}} = \\ \sum_{k \in \Omega_k} \left((P_{d,k,s}^{\text{Serv-p}} - P_{d,k,s}^{\text{Serv-s}}) \frac{W_{d,k,t}}{n_{d,k,t,s}^{\text{Ser-on}} \psi_k} n_{d,k,t,s}^{\text{Ser-on}} + \right. \\ \left. n_{d,k,t,s}^{\text{Ser-on}} P_{d,k,s}^{\text{Serv-s}} + P_{d,k,s}^{\text{Serv-p}} n_{d,k,t,s}^{\text{Lease}} \right) \\ 0 \leq n_{d,k,t,s}^{\text{Ser-on}} + n_{d,k,t,s}^{\text{Lease}} \leq (1 - \phi) n_{d,k}^{\text{Serv}} \\ 0 \leq \frac{D_{d,k,t,s}}{n_{d,k,t,s}^{\text{Ser-on}} \psi_{d,k}} \leq U_{k,\text{max}} \end{cases} \quad (13)$$

2.3.2 ACE 能耗

制冷机系统的制冷功率受额定功率限制, 其运行特性可以表示为

$$\begin{cases} P_{d,t,s}^{\text{AC}} = H_{d,t,s}^{\text{AC}} / \eta^{\text{AC}} \\ 0 \leq P_{d,t,s}^{\text{AC}} \leq P_d^{\text{AC-R}} \end{cases} \quad (14)$$

3 基于条件风险的多目标区间-随机优化

本节构建了一个双目标优化模型, 旨在探讨数据中心协同配电网在 CPM 中的参与策略。

3.1 目标函数

3.1.1 经济成本最小化

所提 CRIMOP 模型的规划框架旨在通过减少财务支出并增加数据中心在 CPM 中的收益, 来优化资本投资的年化成本以及运营费用的结构, 具体涵盖以下方面。

$$\min f_1 = (1 - \lambda)(C^{\text{inv}} + C^{\text{op}}) + \lambda(C^{\text{inv-CVaR}} + C^{\text{op-CVaR}}) \quad (15)$$

权重系数 λ 能够体现决策者对待风险的态度。投资成本 C^{inv} 对应于 RES、储能、配电网和数据中心设备安装所需的初始资本成本, 具体表示为

$$C^{\text{inv}} = \beta^{\text{TF}} c^{\text{TF}} P^{\text{TF-add}} + \sum_X \sum_{d \in \Omega_{\text{DC}}} \beta^X c^X n_d^X + \quad (16)$$

$$\beta^{\text{line}} \sum_{ij \in \Omega_F} \sum_{m \in \Omega_{\text{line}}} c_m^{\text{Line}} e_{ij}^{\text{Line}} x_{ij,m}^{\text{Line}}$$

式中: β^X 为设备的单位 X 的年化系数, $\beta^X =$

$$I r_X (1 + I r_X)^{y_X} / ((1 + I r_X)^{y_X} - 1)。$$

系统的运营成本包括购电成本、可再生能源削减罚款以及数据中心参与需求响应所产生的相关成本，数据中心通过参与 CPM 产生的收益则在一定程度上抵消了部分成本。

$$C^{\text{op}} = C^{\text{grid}} + C^{\text{waste}} + C^{\text{DR}} - E^{\text{inc}} \quad (17)$$

$$\begin{cases} C^{\text{grid}} = \sum_{s \in \Omega_S} p_s \sum_{t \in \Omega_T} \tilde{c}_t^{\text{grid}} P_{t,s}^{\text{grid}} \Delta t \\ C^{\text{waste}} = \sum_{s \in \Omega_S} p_s \sum_{t \in \Omega_T} \sum_{l \in \Omega^{\text{RES}}} \xi (P_{i,t,s}^{\text{RES},g} - P_{i,t,s}^{\text{RES}}) \Delta t \\ C^{\text{DR}} = \sum_{s \in \Omega_S} p_s \sum_{d \in \Omega_{\text{DC}}} \sum_{t \in \Omega_T} \sum_{t'=t+1}^T c^{\text{DR}} W_{d,t',s}^{\text{DWT}} (t' - t) \end{cases} \quad (18)$$

数据中心通过参与算力租赁市场，实现了基于服务器类型与租赁时长的盈利模式，具体计算公式为

$$E^{\text{inc}} = \sum_{s \in \Omega_S} p_s \sum_{d \in \Omega_{\text{DC}}} \sum_{k \in \Omega_{\text{Kind}}} \sum_{t \in \Omega_T} \left(\tilde{e}_{d,k,t}^{\text{Lease}} n_{d,k,t,s}^{\text{Lease}} \Delta t - \tilde{e}_{d,k,t,s}^{\text{Hire}} n_{d,k,t,s}^{\text{Hire}} \Delta t \right) \quad (19)$$

3.1.2 碳排放最小化

在配电网中，由于发电侧化石能源占比相对较高，建立高能耗的数据中心将导致大量碳排放。因此，将最小化系统的碳排放量作为第二个目标。

$$\min f_2 = (1 - \lambda) C^c + \lambda C^{\text{c-CVaR}} \quad (20)$$

$$C^c = \tilde{\varphi}_t \sum_{t \in \Omega_S} p_s \sum_{t \in \Omega_T} P_t^{\text{grid}} \Delta t \quad (21)$$

3.2 约束条件

3.2.1 规划阶段

在规划阶段，由于整体投资预算和可用空间的限制，必须对不同类型设备在系统内可安装的最大容量施加限制。

$$\begin{cases} 0 \leq P^{\text{TF-add}} \leq P^{\text{TF-A-max}} \\ 0 \leq \sum_{m \in \Omega_{\text{line}}} x_{ij,m}^{\text{Line}} \leq 1 \\ 0 \leq n_d^X \leq \chi_d^{\text{DC}} n_d^{X-\text{max}} \end{cases} \quad (22)$$

3.2.2 运行阶段

RES 的发电量受其最大安装容量和天气条件的影响。

$$\begin{cases} 0 \leq P_{i,t,s}^{\text{RES}} \leq P_{i,t,s}^{\text{RES},g} \\ Q_{i,t,s}^{\text{RES}} = P_{i,t,s}^{\text{RES}} \tan \varphi_{\text{RES}} \end{cases} \quad (23)$$

储能系统需满足能量平衡、充放电速率及存储容量的多重约束，以确保电力系统的稳定运行和供需平衡。

$$\begin{cases} 0 \leq \lambda_{d,t,s}^{\text{ch}} + \lambda_{d,t,s}^{\text{dch}} \leq 1 \\ 0 \leq P_{d,t,s}^{\text{ch}} \leq \lambda_{d,t,s}^{\text{ch}} P^{\text{chmax}} \\ 0 \leq P_{d,t,s}^{\text{dch}} \leq \lambda_{d,t,s}^{\text{dch}} P^{\text{dchmax}} \\ E_{d,t,s} = E_{d,t-1,s} + \eta^{\text{ch}} P_{d,t,s}^{\text{ch}} \Delta t - P_{d,t,s}^{\text{dch}} \Delta t / \eta^{\text{dch}} \\ S_{\text{OCmin}} E_d^{\text{rated}} \leq E_{d,t,s} \leq S_{\text{OCmin}} E_d^{\text{rated}} \\ E_{d,1,s} = E_{d,T,s} \end{cases} \quad (24)$$

为确保配电网内的电压质量符合预设标准，在运行过程中，必须对每个节点的电压变化施加限制。

$$V_d^{\text{min}} \leq V_{d,t,s} \leq V_d^{\text{max}} \quad (25)$$

配电网中每个节点的输出功率应等于输入功率，表示为

$$\begin{cases} \sum_{jd \in \Omega_Q} P_{jd,t,s} + P_{d,t,s}^{\text{RES}} + P_{d,t,s}^{\text{dch}} = \sum_{ik \in \Omega_Q} P_{ik,t,s} + P_{i,t,s}^{\text{DC}} + \tilde{P}_{i,t}^{\text{L}} + P_{i,t,s}^{\text{ch}} \\ \sum_{ji \in \Omega_Q} Q_{ji,t,s} + Q_{i,t,s}^{\text{RES}} = \sum_{ik \in \Omega_Q} Q_{ik,t,s} + Q_{i,t,s}^{\text{DC}} + Q_{i,t,s}^{\text{L}} \end{cases} \quad (26)$$

配电网的运行必须遵守电网内的电力流限制，具体如式(27)、式(28)所示。

$$V_{i,t,s} - V_{j,t,s} = 2P_{ij,t,s} e_{ij}^{\text{Line}} \left(x_{ij,m}^{\text{L-R}} R_{ij}^0 + \sum_{m \in \Omega_l} x_{ij,m}^{\text{Line}} R_{ij,m} \right) + \quad (27)$$

$$2Q_{ij,t,s} e_{ij}^{\text{Line}} \left(x_{ij,m}^{\text{L-R}} X_{ij}^0 + \sum_{m \in \Omega_l} x_{ij,m}^{\text{Line}} X_{ij,m} \right) \\ x_{ij,m}^{\text{L-R}} = 1 - \sum_{m \in \Omega_l} x_{ij,m}^{\text{Line}} \quad (28)$$

配电网中每条线路传输的有功功率和无功功率不得超过其设定的电流容量，具体表述为

$$P_{ij,t,s}^2 + Q_{ij,t,s}^2 \leq x_{ij,m}^{\text{L-R}} (S_{ij}^{\text{(no)max}})^2 + \sum_{m \in \Omega_l} x_{ij,m}^{\text{Line}} (S_{ij,m}^{\text{max}})^2 \quad (29)$$

受配电变压器容量的限制，从主电网购入的电力在每个时间段内必须满足的约束如式(30)所示。

$$0 \leq P_{i,t,s}^{\text{Trans}} \leq (P^{\text{TF-add}} + P^{\text{TF-0}}) \quad (30)$$

3.2.3 CVaR 约束

风险损失约束用于描述因不确定性带来的系统经济成本和碳排放风险。基于 CVaR 定义，通过将 $\omega_s^X = [C_s^X - \alpha^X]^+$ 松弛化，可得线性化的 CVaR 风险约束如式(31)所示。

$$\begin{cases} \omega_s^{\text{IO}} \geq C_s^{\text{inv}} + C_s^{\text{op}} - \alpha^{\text{IO}} \\ \omega_s^{\text{C}} \geq C_s^{\text{C}} - \alpha^{\text{C}} \\ \omega_s^{\text{IO}} \geq 0 \\ \omega_s^{\text{C}} \geq 0 \end{cases} \quad \forall s \in \Omega_S \quad (31)$$

3.2.4 市场约束

市场需求约束：

$$n_{d,k,t,s}^{\text{Lease}} \leq \tilde{D}_{d,k} \quad (32)$$

市场供给约束:

$$n_{d,k,t,s}^{\text{Hire}} \leq \tilde{S}_{d,k} \quad (33)$$

市场非负约束:

$$n_{d,k,t,s}^{\text{Lease}} \geq 0, n_{d,k,t,s}^{\text{Hire}} \geq 0 \quad (34)$$

3.3 不确定变量

如前所述, 数据中心与配电网的协同规划决策问题受到多种不确定性的影响, 这些不确定性主要来源于 RES 出力、电价、算例租赁价格、市场最大需求/供给量、碳排放因子、电力负荷需求以及数据工作负载。本节设定风速符合威尔分布, 光照强度符合 Beta 分布^[23], 并采用基于区间的方法, 以捕捉其余不确定性对本文所提出规划方案的影响。

$$\begin{cases} \tilde{c}_t^{\text{grid}} = [c_t^{\text{grid}-}, c_t^{\text{grid}+}] & \forall t \in \Omega_T \\ \tilde{\phi}_t = [\phi_t^-, \phi_t^+] & \forall t \in \Omega_T \\ \tilde{P}_{i,t}^{\text{L}} = [P_{i,t}^{\text{L}-}, P_{i,t}^{\text{L}+}] & \forall i \in \Omega_D, \forall t \in \Omega_T \\ \tilde{W}_{d,t}^0 = [W_{d,t}^{0-}, W_{d,t}^{0+}] & \forall d \in \Omega_D, \forall t \in \Omega_T \\ \tilde{D}_{d,k} = [D_{d,k}^-, D_{d,k}^+] & \forall d \in \Omega_D, \forall k \in \Omega_K \\ \tilde{S}_{d,k} = [S_{d,k}^-, S_{d,k}^+] & \forall d \in \Omega_D, \forall k \in \Omega_K \end{cases} \quad (35)$$

4 求解算法

所提协同规划的总体表达概述为

$$\min_{X,Y} [f_1(X,Y,U), f_2(X,Y,U)] \quad (36)$$

$$\text{s.t. } k(X) \leq 0 \quad (37)$$

$$h_i(X,Y,U) \leq b_i^l = [b_i^{\text{min}}, b_i^{\text{max}}] \quad (38)$$

$$U \in U^I = [U^{\text{min}}, U^{\text{max}}] \quad (39)$$

式中: X 表示包含规划变量的 n 维向量; Y 表示包含运营变量的 m 维向量; U 表示包含不确定变量的 q 维向量。

本节先提供 CVaR 的计算方法, 并给出 MOEA/D 框架的概述, 之后深入探讨了所提 ACIMOE/D-TCS 方法的详细开发, 该方法旨在有效解决 CRIMOP 模型。

4.1 基于模拟和聚类的 CVaR 计算方法

根据风速和光照强度概率分布, 分别利用 Monte-Carlo 模拟和 K-means 聚类法进行场景生成和削减, 从而可得到系统总场景集 $\Omega_S = \{SC_s, s = 1, 2, \dots, S_S\}$ (其中 S_S 为场景数量) 及其各场景发生概率。

当置信水平为 σ 时, 系统 CVaR 为

$$C^{\text{CVaR}} = C^{\text{VaR}} + \frac{1}{1-\sigma} \sum_{s \in \Omega_S} p_s [C_s - C^{\text{VaR}}]^+ \quad (40)$$

式中: C^{VaR} 为辅助变量, 不需要单独计算。

4.2 基于分解的多目标优化进化算法

基于分解的多目标进化算法 (multi-objective evolutionary algorithm based on decomposition, MOEA/D) 是一个框架, 它将传统数学规划中常用的分解方法引入到进化算法中, 以解决多目标优化问题 (multi-objective optimization problem, MOP)。通过明确将 MOP 分解为多个标量优化子问题, 它生成了一个近似的帕累托前沿。这些子问题通过进化算法同时并协作地优化, 通过进化解决方案种群来实现, 本文主要采用切比雪夫法, 其表述为

$$\min g^{\text{vc}}(x|r, z) = \max_{1 \leq i \leq m} \{r_i | (f_i(x) - z_i)\} \quad (41)$$

$$\text{s.t. } x \in \Xi$$

$$z_i = \min \{f_i(x) | x \in \Omega\} \quad (42)$$

$$\sum_{i=1}^m r_i = 1 \quad (43)$$

式中: m 为目标函数的数量; $z = \{z_1, z_2, \dots, z_m\}$ 表示参考点, 而 $\{r_1, r_2, \dots, r_m\}$ 为权重向量; Ξ 为可行解区域。对于每个指标 $i = 1, 2, \dots, m$, 参考点和权重向量都必须遵守式(41)一式(43)。

4.3 基于两种交叉策略的自适应约束处理区间多目标优化算法

虽然 MOEA/D 框架在解决 MOP 方面展现出了较强的性能, 但在直接处理含区间表述的优化问题时存在局限, 特别是当目标函数以区间形式呈现时。为了克服这些局限, 本文开发了 ACIMOE/D-TCS 方法, 这一方法不仅有效解决了配电网和数据中心的协同规划问题, 还能够同时处理和保留所有区间的不确定性信息。ACIMOE/D-TCS 方法的核心在于 3 个关键技术。首先, 采用区间值切比雪夫标量函数处理区间不确定性; 其次, 通过评估区间目标的集成策略确保对区间目标的全面考量; 最后, 该方法采用了两种交叉策略, 并采用自适应约束处理方法以加快迭代速度。

4.3.1 区间值切比雪夫标量函数

鉴于提出的含区间的多目标优化问题 (interval multi-objective optimization problem, IMOP) 的目标函数是基于区间的, 帕累托前沿被特征化为矩形或超立方体等几何形状, 如图 2 所示。为了充分表征不确定性, 本文定义了一个参考超立方体, 该超立方体由两个顶点构建, 每个顶点代表每个目标的区间帕累托前沿的高低边界的最小值。这些顶点分别被称为高边界点和低边界点。图 2 中: $Z = \{(\bar{Z}_1, \bar{Z}_2), (Z_1, Z_2)\}$ 构成了参考超立方体, 其中 $\bar{Z} = (\bar{Z}_1, \bar{Z}_2)$ 和 $Z = (Z_1, Z_2)$ 分别是高边界点和低边界点。

受 MOEA/D 框架的启发, 本文提出了区间值切

比雪夫标量函数(如式(44)所示),该函数根据参考超立方体制定。这种方法通过修改权重向量 $r_i(x)$ 将 IMOP 问题转换为几个标量 IO 子问题。在算法的每次迭代中,同时努力最小化所有这些 IO 子问题,从而更新种群。

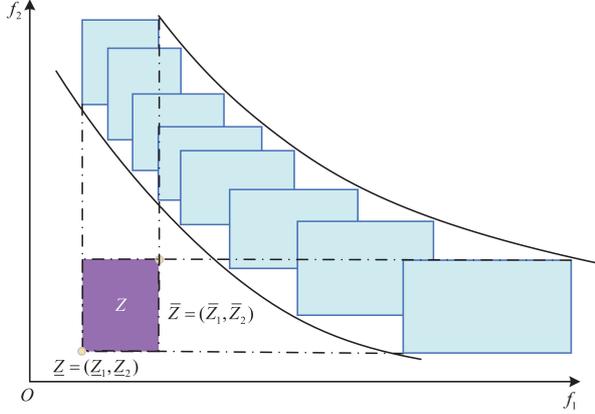


图2 具有参考超立方体的区间帕累托前沿

Fig. 2 Interval Pareto front with reference hypercube

$$\text{IN } g^{\text{lc}}(x|r(x), Z) = \max_{1 \leq i \leq m} \{r_i(x)(f_i(x, U) - Z_i)\} \quad (44)$$

式中: $g^{\text{lc}}(x|r(x), Z)$ 是含区间参数的切比雪夫聚合函数; Z 是参考超立方体; Z_i 是参考超立方体中的第 i 个分量。

4.3.2 评估区间目标的集成策略

由于区间值切比雪夫标量函数在更新种群中扮演着关键角色,因此需要比较具有区间目标的两个个体,以确定哪一个更优。以往研究已经提出了区间偏序关系(interval partial order relations, IPORs)来促进区间数的比较^[24],这些关系在附录 B^[27]中进行了总结。鉴于在算法中使用不同的 IPORs 会导致结果的差异,这些关系的选择显著影响了协同规划的结果。为解决这一问题,本文设计了一个集成策略,利用了 7 种类型的 IPORs,旨在全面比较区间值目标,从而减少在选择区间序关系时的主观决策,这一策略的具体内容如下所述。

假设需要比较两个候选个体 x_i 和 x_j , 其具有区间参数的切比雪夫聚合函数值分别为 A^l 和 B^l 。当使用任何一个区间序关系来比较区间 A^l 和 B^l 时,比较结果可能是以下 3 种情况之一:

- 1) A^l 小于 B^l , 表示 $A^l <_{\text{IN}} B^l$;
- 2) B^l 小于 A^l , 表示 $B^l <_{\text{IN}} A^l$;
- 3) A^l 和 B^l 无法比较, 表示 $B^l \parallel_{\text{IN}} A^l$ 。

本文利用附录 B^[27]中概述的 7 种不同类型的 IPORs 来比较区间 A^l 和 B^l , 从而得出它们的比较

结果。然后,本文基于频率评估这些比较结果,频率指的是在 7 种 IPORs 中每种特定比较结果出现的次数,最终选择出现频率最高的结果作为两个区间数之间的确定性比较结果。这种方法确保了全面评估,以减少任何单一 IPORs 对最终决策的影响。

4.3.3 两种交叉策略与改进约束处理方法

ACIMOEA/D-TCS 使用两种交叉策略来保持全局搜索和局部搜索之间的平衡,SBX 算子是第一个交叉策略,由式(45)给出。

$$x_{i,d}^{G+1} = 0.5[(1 + \beta_d)x_{k,d}^G + (1 - \beta_d)x_{l,d}^G] \quad (45)$$

式中: k 和 l 表示在领域中随机选取的两个亲本的索引; i 表示与第 i 个权重向量 $\lambda_i (i=1, \dots, N)$ 相对应的解的索引; d 表示解中变量的索引; G 表示迭代次数; β_g 表示一个动态参数,其表达式为

$$\beta_g = \begin{cases} (2u_d)^{\frac{1}{\eta_c+1}} & u_d \leq 0.5 \\ \left(\frac{1}{2(1-u_d)}\right)^{\frac{1}{\eta_c+1}} & \text{其他} \end{cases} \quad (46)$$

式中: η_c 表示分布参数; u_d 表示在 [0,1] 范围内均匀生成的随机数。

SBX 算子大多数情况下都是在父个体的邻域内进行局部搜索,这在一定程度上限制了其全局搜索能力。为此,改进鲸鱼优化算法(whale optimization algorithm, WOA)的螺旋更新位置被设置为第二个交叉策略,以提高 ACIMOEA/D-TCS 的全局搜索能力。

$$x_{i,d}^{G+1} = |x_{i_r,d}^G - x_{i,d}^G| e^{bL} \cos(2\pi L) + x_{i_r,d}^G \quad (47)$$

式中: i_r 表示从父解中随机选择的解的索引; b 是一个常数,决定了对数螺旋的形状; L 表示在 [0,1] 范围内均匀生成的随机数。

将上述两种交叉策略组合起来更新各解的变量,组合公式表示为

$$x_{i,d}^{G+1} = \begin{cases} 0.5[(1 + \beta_d)x_{k,d}^G + (1 - \beta_d)x_{l,d}^G] & r_c < 0.9 \\ |x_{i_r,d}^G - x_{i,d}^G| e^{bL} \cos(2\pi L) + x_{i_r,d}^G & \text{其他} \end{cases} \quad (48)$$

式中: r_c 是指在 [0,1] 范围内均匀生成的随机数。

对于每个个体,计算单个约束上的约束违反指数 V_t^c , 其中如果在时间段 t 内违反约束 c , 则 V_t^c 设置为 1; 否则,它被设置为 0。然后,通过对所有约束的 V_t^c 求和来确定约束违规总数 V^{Total} , 如式(49)所示。

$$V^{\text{Total}} = \sum_{t \in \Omega_T} \sum_{c \in \Omega_{\text{con}}} V_t^c \quad (49)$$

将约束违规总数 V^{Total} 乘以一个衰减指数,并以自适应罚函数的形式加到 g^{lc} 上,优化函数将其改进为

$$\min Y = \min g^{\text{te}} + \alpha_0 \left(\frac{g}{G} \right)^c V^{\text{Total}} \quad (50)$$

4.3.4 将 ACIMOE/D-TCS 应用于协同规划问题

所提 ACIMOE/D-TCS 方法用于确定数据中心的选址和规模、RES 的容量、配电线路的更新改造以及最优运营策略的过程如图 3 所示。算法的详细步骤描述如下。

步骤 1: 输入 ACIMOE/D-TCS 的初始参数, 如最大迭代次数 Gen , 邻域大小 T , 均匀分布的权重向量 $\{r_1, r_2, \dots, r_m\}$, 种群大小 N ;

步骤 2: 输入数据中心、RES 和配电网的参数;

步骤 3: 计算两个权重向量之间的欧氏距离,

求出每个权重向量最近的 T 个权重向量 r_i , 并生成邻域矩阵 $B_{N \times T}$;

步骤 4: 随机生成 RES、配电网、数据中心规划运行解的初始种群;

步骤 5: 初始化参考超立方体 Z ;

步骤 6: 选择个体 $x_{i,d}^G$;

步骤 7: 运用两种交叉策略生成新解 $x_{i,d}^{G+1}$;

步骤 8: 更新参考超立方体;

步骤 9: 根据区间参数集成比较方案以及约束违背数量更新领域解;

步骤 10: 如果达到最大迭代次数, 则输出最优种群。

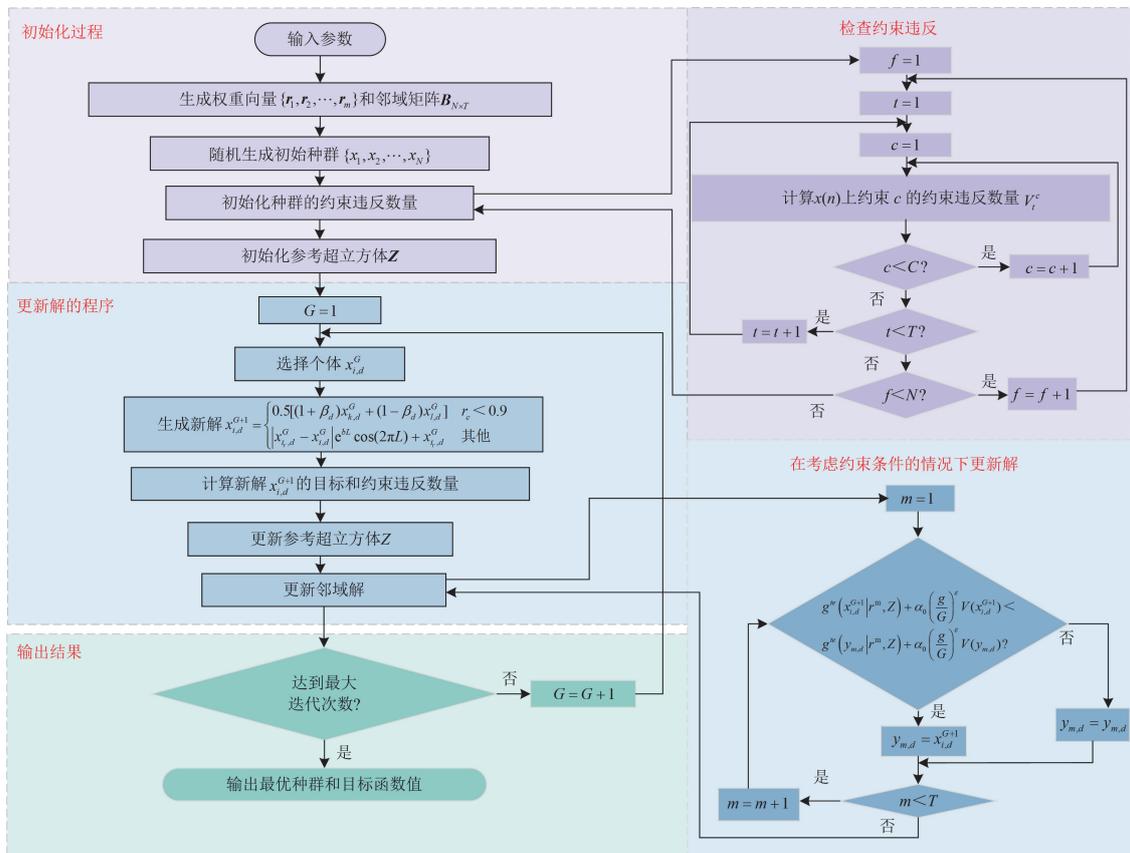


图 3 ACIMOE/D-TCS 流程图

Fig. 3 Flowchart of the proposed ACIMOE/D-TCS

5 算例分析

5.1 系统参数

为了验证本文提出的方法的有效性, 本文利用改进的 IEEE33 节点配电网网络进行了算例分析。如图 4 所示, 该系统包括 32 个负载节点和 1 个变电站节点, 系统额定电压为 12.66 kV。系统被划分为 4 个区域, 每个区域计划设立一个数据中心, 以满足

该区域内用户的数据需求, 设定的安装位置为 {5, 10}、{15,17}、{21,24}、{27,33}。本文考虑的 RES、储能都安装在数据中心同节点, 更好地为数据中心提供用电支撑。

在本文的数据中心模拟中, 室内温度被设定在 22 °C~24 °C 以优化硬件性能及能源效率。工作负载管理中, 最大延迟设定为 500 ms, DW 与 RW 的比例为 3:1, 优先处理 DW 以降低能源成本并满足实

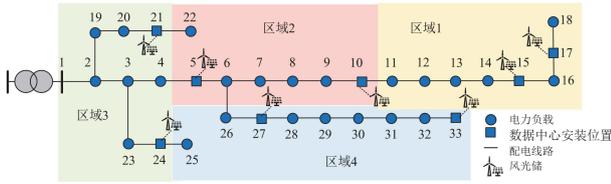


图4 改进的 IEEE33 节点配电网结构

Fig. 4 Structure of the improved IEEE33-bus distribution network

时数据需求。系统工作负载根据文献[23]设定，不确定性范围为±15%，详见附录 A 图 A1^[27]。在系统中，每个数据中心节点的风机数量假定为 10 台，光伏最大装机容量设为 1000 kW，风光发电模型的参数根据北京 2023 年实际记录的风速和光照数据确定，设备相关参数详见附录 A 表 A1^[27]。

系统内不同设备的技术和经济特性详见附录 A 表 A2^[27]。变电站的扩建费用固定为 150 万元/MVA，与数据中心相关的参数可在附录 A 表 A3^[27]中找到。电网线路扩展的具体数值详见附录 A 表 A4^[27]。基于负载需求的年度波动，电力负载的不确定性边界设定为±10%，预测电价来源于文献[24]，不确定性设为±12%，如图 5 所示。预测的碳足迹系数设定为 0.899，不确定性限制为±10%。

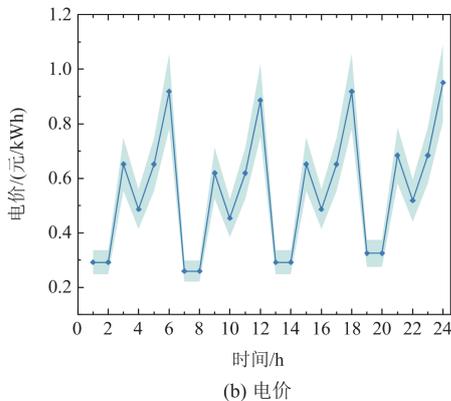
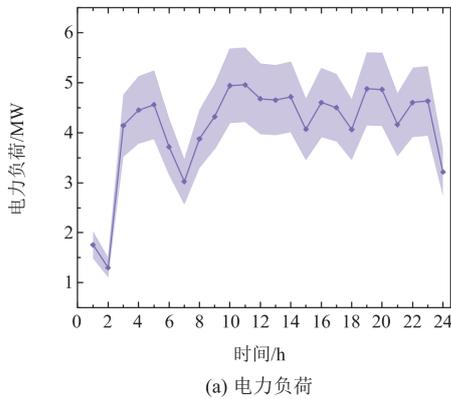


图5 不确定参数的区间预测

Fig. 5 Interval forecasts of ambiguous parameters

数据中心配置了 3 种性能等级的服务器，分别为 Dell PowerEdge T40、HPE ProLiant DL360 Gen10 和 Dell PowerEdge R940。这些服务器的性能从低到高排序，具体数据详见表 1。

表 1 服务器与 CPM 参数

Table 1 Parameters of servers and CPM

	Dell Power Edge T40	HPE ProLiant DL360 Gen10	Dell Power Edge R940
P^{Ser-P}/W	100	600	600
P^{Ser-I}/W	200	300	1000
ψ_d	150	500	1300
n_d^{S-max}	500	500	500
$I_{r_{serv}}/\%$	8	8	8
Y_{serv}	20	20	20
$c^{Ser}/元$	3200	15 200	37 000

算力市场的数据来源于腾讯云，市场需求上限和供给上限被设置为 300，不确定性设为±15%，算力出租价格和租用价格见图 6，不确定性设为±15%。

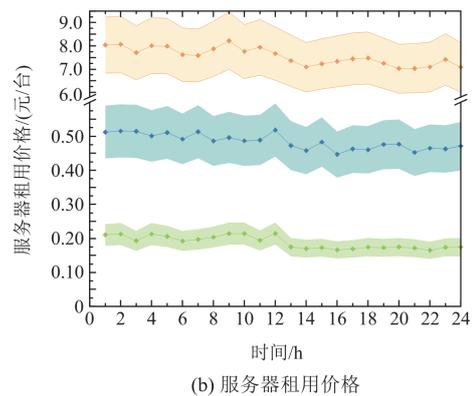
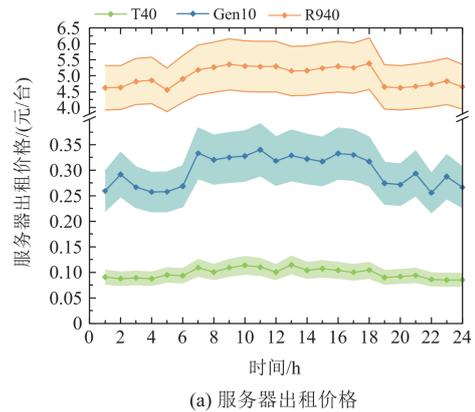


图6 算力市场参数区间预测

Fig. 6 CPM parameter interval forecast

5.2 仿真结果

为阐述数据中心与配电网协同规划，数据中心

参与 CPM 所带来的益处, 本节通过对 4 种场景进行比较分析来进行说明。

场景 I: 数据中心与配电网独立规划, 数据中心位置固定, 未与配电网互动, 首先规划数据中心设备容量, 再根据负载需求确定配电网扩展计划。

场景 II: 数据中心与配电网协同规划, 数据中心不参与需求响应, 且不参与 CPM。

场景 III: 数据中心与配电网协同规划, 数据中心参与需求响应, 但不参与 CPM。

场景 IV: 本文提出的规划运行模型。

使用本文提出的方法, 从每个场景中得出的区间帕累托前沿在图 7 中展示。与传统的由点构成的帕累托前沿不同, 区间导向的帕累托前沿特征是一系列矩形。这些矩形沿两个轴绘制, 水平轴表示预期的经济开支, 垂直轴表示系统的碳排放。此外, 每个矩形的长度表示系统经济成本的变化范围, 宽度则表示碳排放的变化程度。在实践中, 决策者可以根据对系统益处的偏好以及对不确定性和风险的容忍度, 使用图 7 中展示的区间帕累托前沿来选择最优的规划运行方案。

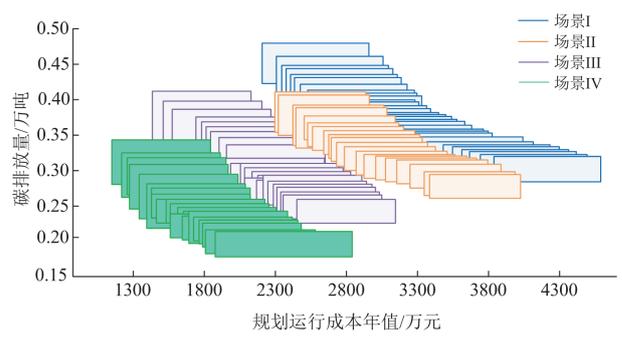


图 7 不同场景下生成的区间帕累托前沿

Fig. 7 Generated interval Pareto fronts across various scenarios

可以看出, 总体费用与碳足迹之间存在冲突, 这表明要最小化碳排放就需要增强 RES 的规划容量, 并在数据中心中利用需求响应, 同时灵活参与 CPM, 反之亦然。本节采用区间 TOPSIS 方法来确定区间帕累托前沿的最终折衷解决方案, 为简化问题, 本文假设经济和环境目标具有相同的权重。不同场景的经济成本(年值)和规划方案分别如表 2 和表 3 所示。

表 2 不同场景下的系统效益

Table 2 System benefits under different scenarios

场景	投资成本/万元						运行成本/ 万元	CVaR/万元		总成本/ 万元	碳排放/ 万吨
	配电线路	变压器	服务器	制冷机	风机	光伏		$C^{cost-CVaR}$	C^{c-CVaR}		
I	86.50	33.10	512.30	11.20	245.50	105.32	(1645.35,	(3279.49,	(436.13,	(2507.07,	(0.345,
							2460.04)	4008.27)	533.04)	3321.55)	0.415)
II	65.30	33.40	512.30	11.20	238.90	102.49	(1465.52,	(3069.11,	(377.09,	(2298.81,	(0.303,
							2190.56)	3751.13)	460.88)	3024.37)	0.367)
III	39.50	10.30	276.80	6.90	219.80	94.29	(1320.44,	(2503.22,	(340.84,	(1855.72,	(0.242,
							1980.50)	3059.50)	416.60)	2510.13)	0.295)
IV	71.59	9.01	1150.80	9.51	455.68	195.29	(270.96,	(1960.72,	(308.26,	(1561.13,	(0.221,
							676.11)	2448.81)	357.53)	2288.00)	0.266)

表 3 不同场景下的规划结果

Table 3 Optimal planning outcomes across diverse scenarios

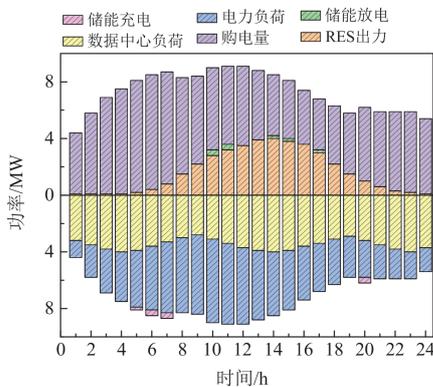
场景	配电线路(节点到节点)			服务器/台(节点)			风机/台 (节点)	光伏/kW (节点)	制冷机/台 (节点)
	线型 1	线型 2	线型 3	T40	Gen10	R940			
I	6-7/7-8/8-9/			500(5),500(15)	500(5),500(15)	153(5),158(15)	6(5),5(15),	568(5),566(15),	3(5),4(15),
	12-13/23-24/	3-4/4-5/5-6	1-2/2-3						
II	6-7/7-8/8-9/			500(5),500(15)	500(5),500(15)	153(5),158(15)	5(5),5(15),	572(5),435(15),	3(5),4(15),
	22-23/25-26	3-4/4-5/5-6	1-2/2-3						
III	4-5/5-6/6-7			500(5),500(15)	320(5),310(15)	15(27)	3(5),5(15),	535(5),325(15),	2(5),2(15),
	2-3/3-4	1-2	500(24),500(27)						
IV	5-6/6-7			500(5),500(15)	434(5),450(15)	205(5),280(15)	10(5),10(15),	1000(5),1000(15),	3(5),4(15),
	2-3/3-4	—	500(24),500(27)						

比较分析表明, 场景 I 和场景 II 验证了所提出的数据中心与配电网协同规划方法的有效性。在场景 I 中, 较高的 RES 容量(4373 kW)导致较高的经济成本和碳排放, 相比之下, 场景 II 的 RES 容量为 4007 kW, 表现出更低的成本和碳排放。这表明, 位置选择不佳的数据中心站点会加剧网络拥堵并降低能源效率。场景 II 通过合理选择数据中心、配电线路和 RES 的最佳组合, 不仅提高了 RES 利用效率, 还显著减少了碳排放。

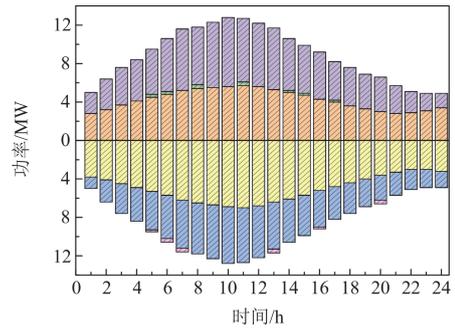
通过对场景 III 的进一步分析展示了数据中心需求响应的影响。与场景 II 相比, 场景 III 在经济和碳排放方面具有明显优势, 同时减少了 578 kW 的 RES 容量。这表明, 数据中心和配电网的互动更强, 通过优化数据负载的时间和空间分布, 最小化了数据中心的功率消耗, 优化了负载曲线, 从而降低了服务器、RES 和相关设备的容量需求。充分利用数据中心的需求响应潜力, 最大化 RES 的利用率, 减少了对高碳电力的依赖。相比之下, 场景 II 未能有效管理数据中心的负载需求, 导致在高峰期和 RES 输出低时功率消耗增加, 因此需要更大容量的 RES 和额外的外部电力。

场景 IV 进一步考虑了数据中心参与 CPM 的优势。在电价高时, 数据中心租用外部服务器, 减少了外购电力的需求, 并通过充分利用可再生能源满足服务器电力需求。尽管场景 IV 的投资成本高于场景 III, 但通过积极参与 CPM 获得了更多的经济收益。场景 IV 的服务器和可再生能源配置更多, 提高了系统的能源利用效率, 减少了对高碳排放外部电力的依赖, 并进一步降低了碳排放。

图 8(a)和图 8(b)说明了场景 III 和 IV 中功率调度的操作决策变量结果, 由于数据中心参与 CPM 的实现, 数据中心的功率随时间变化很大, 与 RES 出力在时间尺度上更为匹配, 有助于减少系统的电力消耗。



(a) 场景 III



(b) 场景 IV

图 8 功率平衡调度

Fig. 8 Power balance scheduling

5.3 数据中心参与 CPM 的灵活性

本节考虑到服务器租赁特性, 对数据中心参与 CPM 的运营灵活性进行了考虑。为了阐明灵活性的影响, 定义 3 种场景并进行了比较分析。

场景 a: 数据中心独立运行, 不参与 CPM, 不进行算力的出租或租用。

场景 b: 数据中心通过市场出租服务器以获取额外收入, 但不租用外部服务器。

场景 c: 数据中心不仅出租自身服务器获取收入, 还在电价高时租用外部服务器, 以优化成本。

为了更深入地探讨数据中心参与 CPM 的灵活性如何增强系统效益, 图 9 和图 10 展示了从场景 a 到场景 c 的实际 RES 输出和服务器调度情况。图 9 中: 当数据中心不参与 CPM 时(如场景 a 所示), RES 输出与数据中心的电力消费匹配度不高, 导致在某些时期需要对 RES 进行限制, 从而降低了系统的低碳效益。然而, 当考虑数据中心参与 CPM 的灵活性时(即场景 b 和 c), RES 的利用率明显提高。此外, 通过比较 3 种场景, 当数据中心同时出租和租用服务器时(如场景 c 所示), 与仅参与服务器出租的场景 b 相比, 系统的低碳效益达到最高。

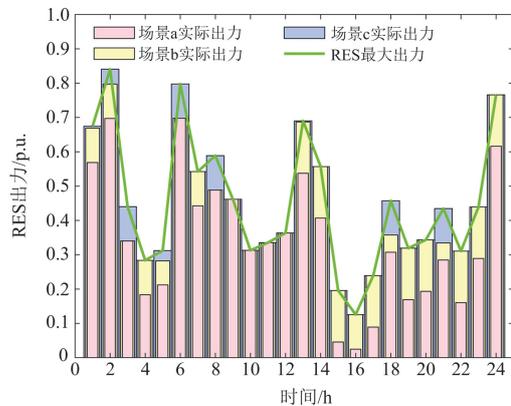


图 9 RES 预测出力和实际出力

Fig. 9 RES forecasted output and actual output

从图 10(a)与图 10(b)的比较中可以看出, 场景 a 中, 数据中心通过将负荷时间转移至 RES 高发时间段来集中处理工作负荷。然而, 由于 DW 仅调整了能源使用的时间而未增加总量, 00:00—03:00、06:00—08:00 和 13:00—14:00 期间仍存在能源限制。与此相比, 场景 b 中, 数据中心通过出租自身服务器, 不仅获得收益, 还大幅度消纳了可再生能源, 将 RES 限制率从 10.34%降低至 5.1%。进一步

比较图 10(b)与图 10(c)可以发现, 场景 c 中, 数据中心为了进一步提升 RES 消纳效率, 在 00:00—03:00、06:00—08:00 和 13:00—14:00 期间租用了外部服务器。这不仅因为此时电价较高, 还因为租赁外部服务器可以降低数据中心内部功率和温度, 从而在其他时间节点能够更大幅度出租自身服务器, 实现更多的利润和 RES 消纳。

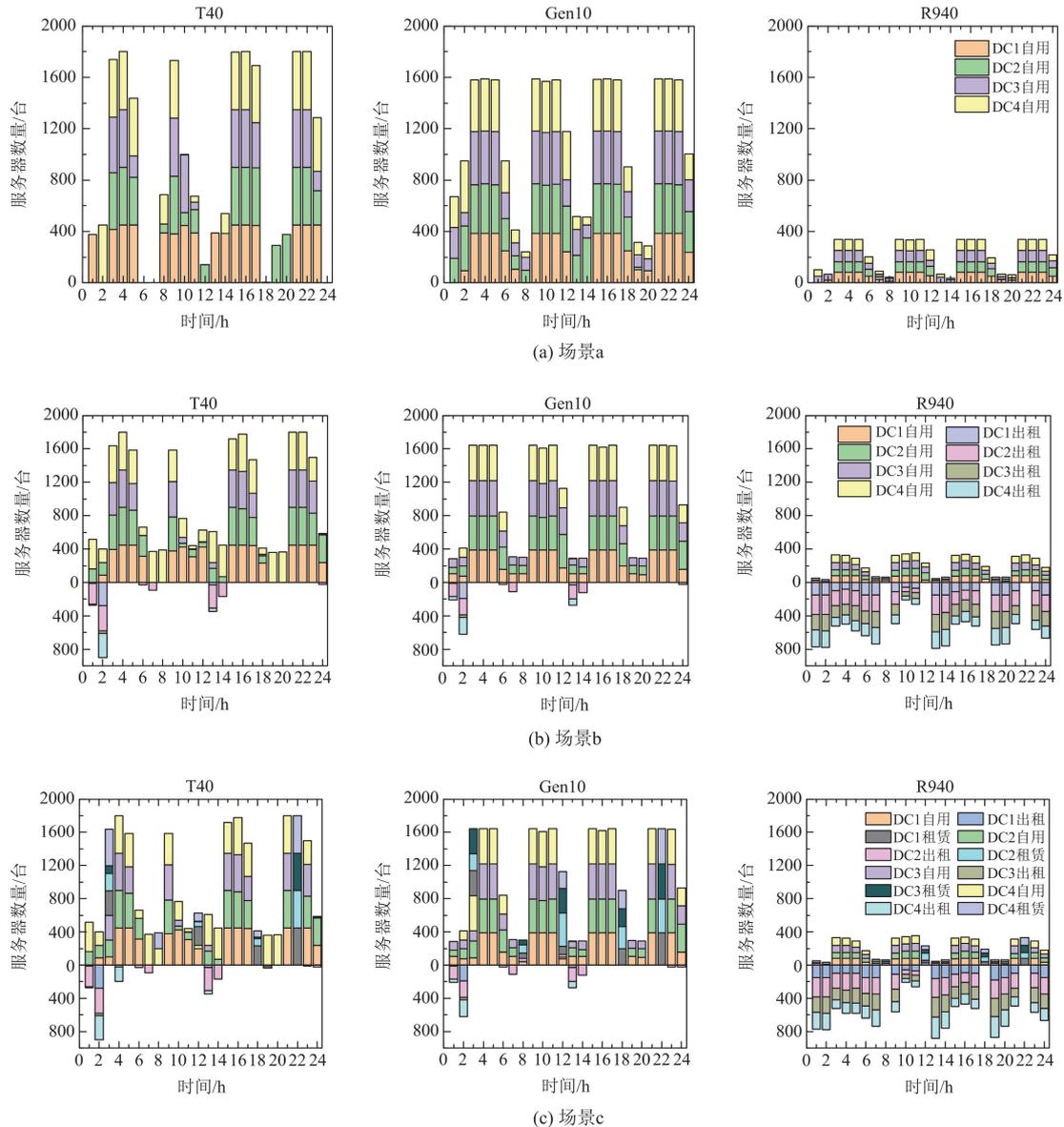


图 10 服务器开机与租赁数量

Fig. 10 Server power-on and rental/leasing quantity

如图 11 所示, 当数据中心既出租又租用服务器时, 温度曲线最为平滑, 最不容易达到最高温度限制。在这种情况下, 数据中心可以消纳所有的 RES, RES 限制率为 0%。通过这样的调整和优化, 数据

中心不仅能够实现能源的高效利用, 还能够经济效益和环境效益之间取得良好的平衡。

不同服务器的横向对比表明, 高性能的 R940 在市场上更受欢迎, 具有更高的价格和更大的需求。

通过这种资源分配策略，数据中心能够有效地平衡自身运作成本和租赁收益，最大化经济效益。

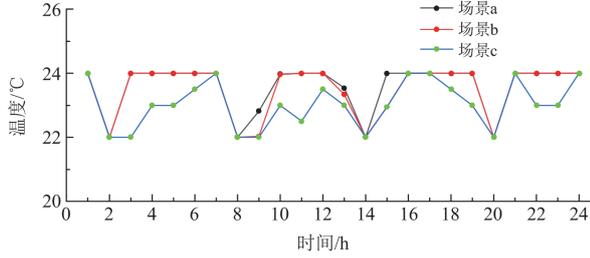


图 11 数据中心内部温度

Fig. 11 Internal temperature of the data center

5.4 改进区间-随机优化的有效性

为验证所提方法的有效性，本文将考虑 CVaR 的区间-随机优化(interval optimization-stochastic optimization, IO-SO)方法与确定性优化(deterministic optimization, DO)、鲁棒优化(robust optimization, RO)、随机优化(stochastic optimization, SO)和传统区间优化(interval optimization, IO)4 种不确定性建模方法进行了比较。这些方法的预期性能计算结果见表 4 的前

5 列。结果表明，SO 模型的规划性能高度依赖于数据分布信息，不同分布条件下效益差异显著，表明 SO 结果并不普遍适用。

为了展示 IO-SO 方法在不确定性风险下的优势，本文假设不确定变量遵循均匀分布并使用蒙特卡洛模拟生成 1000 个样本，计算平均运行成本和碳排放成本。结果见表 4 的最后 3 列。

尽管 DO 和传统 IO 方法的预期性能较好，考虑 CVaR 的 IO-SO 方法的平均运行成本为 2284.1 万元，显著低于 DO 的 3073.13 万元和传统 IO 的 2410.43 万元。此外，碳排放也显示出类似的优势，IO-SO 为 2.35 万吨 CO₂，比 DO 的 2.98 万吨和传统 IO 的 2.44 万吨分别减少 21.14%和 3.68%。这些结果展示了方法在成本效率和环境友好性方面的双重优势。

尽管 RO 在最坏情况下表现较为稳定，实际运营中的平均成本却高出 4.66%。相比之下，IO-SO 即使在不确定性最高的情景下，也能保持较低的性能波动，其平均性能优于传统方法 23.88%以上，凸显了其优越的鲁棒性和可靠性。

表 4 基于不同不确定优化方法的比较

Table 4 Comparison based on different uncertain optimization approaches

方法	投资成本/ 万元	期望运行 成本/万元	期望总成本/万元	期望碳排放量/ 万吨	平均实际总 成本/万元	平均实际碳排 放量/万吨
SO	均匀分布	2147.56	553.86	270 142	2.59	—
	正态分布	1693.27	467.90	216 117	2.49	—
	截断高斯分布	1940.56	508.87	244 943	2.55	—
DO	1598.23	428.70	202 693	2.28	3073.13	2.98
RO	2255.76	611.74	286 750	2.89	3000.99	2.91
传统 IO	1818.45	(263.82,656.22)	(208 227,247 467)	(2.18,2.64)	2410.43	2.44
IO-SO	1891.88	(270.96,676.11)	(216 284,256 799)	(2.21,2.66)	2284.10	2.35

5.5 算法性能

5.5.1 运行性能比较

本文提出了一种新颖的求解算法 ACIMOEA/D-TCS，用于解决所提出的 CRIMOP 问题。为展示 ACIMOEA/D-TCS 算法的优越性，本文将其结果与现有文献中使用的两种确定性转换方法进行了对比。

S1: 仅优化区间值目标函数的中点。

S2: 采用基于权重的方法，协同规划区间值目标函数的中点和偏差。

S3: 本文提出的 ACIMOEA/D-TCS 算法。

相关的统计结果显示在表 5 和图 12 中。结果表明，S3 策略的平均成本最低，S2 次之，S1 的平均支出最高。这凸显了有效管理区间不确定性在 CRIMOP 模型中对决策过程的关键影响。尽管 S1 在预期成本效益上看似最优，但由于其未充分利用

不确定性信息，这种策略在实际操作中可能不是最有效或最佳的选择。因此，对这些方法进行了性能抽样分析。随机生成了 400 个情景，代表不确定变量的多种可能实现。通过将规划解决方案应用于这些生成的情景，并计算系统性能指标，本文评估了在不确定性存在时这些解决方案的表现。

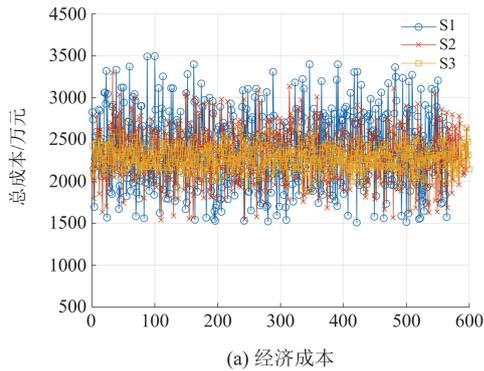
如图 12 和表 5 的最后 5 列所示，尽管基于确定性转换的规划结果在预期的经济和环境性能上表现更优，但在涉及不确定性的情况下，其实际效益显著下降。此外，S1 和 S2 的实际效益存在明显差异，这进一步表明当面对不确定性时，基于确定性转换的规划解决方案的表现并不理想。

研究结果表明，基于确定性转换的规划因未能充分考虑不确定因素的影响，当某些参数偏离预测值时，可能无法保证最优。相反，采用 ACIMOEA/

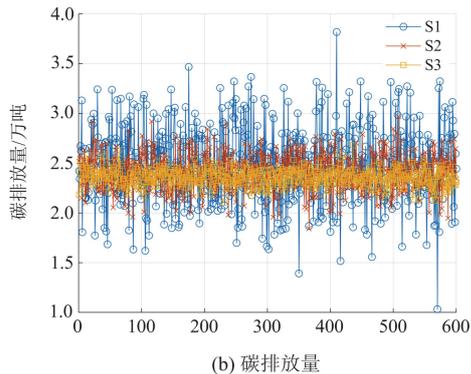
表 5 不同求解算法的性能比较

Table 5 Comparison of system performances with different solution algorithms

投资成本/ 万元	预期表现			实际表现					
	运行成本/ 万元	总成本/ 万元	碳排放量/ 万吨	平均值			标准差		
				运行成本/ 万元	总成本/ 万元	碳排放量/ 万吨	总成本/ 万元	碳排放量/ 万吨	
S1	1778.67	(244.58,602.54)	(1923.25,2281.21)	(2.09,2.42)	546.53	2325.20	2.48	515.41	0.398 843
S2	1799.44	(265.56,643.24)	(2020.00,2397.68)	(2.18,2.57)	512.57	2311.61	2.42	313.22	0.186 872
S3	1891.88	(270.96,676.11)	(2162.84,2567.99)	(2.21,2.66)	386.28	2278.16	2.35	134.60	0.084 065



(a) 经济成本



(b) 碳排放量

图 12 系统运行性能比较

Fig. 12 Comparison of system operation performances

D-TCS 进行规划能够有效地保留不确定性的特征, 与基于确定性转换的方法相比, 展现出更低的实际性能下降和标准差。这凸显了其在风险规避能力和应对不确定性方面的优越性和鲁棒性。

5.5.2 求解速度比较

为了检测两种交叉策略以及自适应约束处理技术的有效性, 将其与两种算法进行了比较。

经典 IMOEA/D: 保持与 ACIMOEA/D-TCS 相同的参数设置(例如: 种群大小、迭代次数、交叉和变异概率等), 不使用交叉算子, 不进行自适应约束条件处理, 采用固定的约束处理方法。

采用自适应约束处理的 IMOEA/D: 不使用交叉算子, 运用自适应约束条件处理。

图 13 显示了在第 200 次、第 400 次、第 600 次和第 800 次迭代时, 3 种方法的平均解与已知最优解之间的差距, 用百分比表示。结果显示, 所提方法在第 20 次迭代时的平均差距仅为 2.3%, 表明几乎已经达到最优解。相比之下, 经典 IMOEA/D 和采用自适应约束处理的 IMOEA/D 的平均差距分别为 22.6%和 11.5%。在提出的方法中, 种群在第 278 次迭代后全部成为最优解; 而在采用自适应约束处理的 IMOEA/D 方法中, 种群在第 646 次迭代后全部成为最优解。然而, 经典 IMOEA/D 方法在 800 次迭代后仍未全部成为最优解。因此, 所提 ACIMOEA/D-TCS 方法能够高效地应对此类问题。

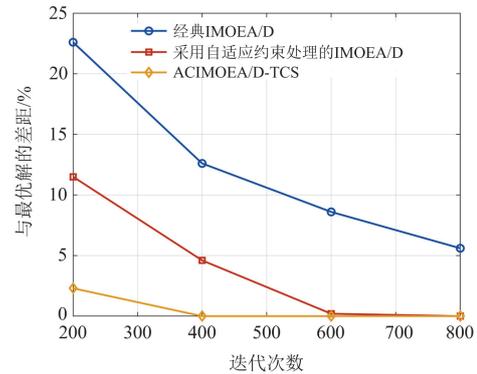


图 13 不同算法收敛速度比较

Fig. 13 Comparison of convergence speed of different algorithms

6 结论

本文研究了基于多目标区间-随机优化方法的数据中心与低碳配电网协同规划, 特别关注数据中心参与 CPM 和多目标区间-随机优化的应用。本文还提出了一种 CRIMOP 的框架。通过提出的 ACIMOEA/D-TCS 算法解决了数据中心与配电网的协同规划问题。主要结论如下。

1) 数据中心通过参与 CPM, 能够在电价高时租用外部服务器, 降低额外电力的购买需求, 同时满配 RES 来满足出租服务器的电力需求。这一策略使

得数据中心不仅能够实现能源的高效利用,还能够
在经济效益和环境效益之间取得良好的平衡。

2) 在考虑数据中心参与 CPM 的灵活性时, RES
的利用率明显提高。通过租赁服务器, 数据中心能
够有效消纳 RES, 降低 RES 限制率。当数据中心既
出租又租用服务器时, 温度曲线最为平滑, RES 限
制率降为 0%。

3) 考虑 CvaR 的 IO-SO 相比 DO、RO、SO 和
常规 IO, 在处理系统不确定性方面更为有效。IO
方法通过将不确定变量表示为区间数, 能够在成本
和可靠性之间取得平衡。通过仿真分析, IO 方法比
RO 平均成本降低了 19.7%, 平均碳排放降低了
16.2%。相比传统 IO, IO-SO 方法在处理不确定性
时表现出更低的实际成本和碳排放量, 显示出更好
的鲁棒性和适应性。

4) 提出的 ACIMOE/D-TCS 算法在应对不确定
性方面表现出色, 能够保留不确定参数的特性。与
传统的确定性方法相比, ACIMOE/D-TCS 方法的
平均总成本降低了 2.1%, 成本标准差减少了 74.0%,
平均碳排放降低了 5.2%, 碳排放标准差减少了 78.9%。
此外, ACIMOE/D-TCS 方法能够高效处理含多变
量和约束条件的复杂问题, 显著降低了计算复杂度。

参考文献

- [1] 朱子恒, 张策, 丁肇豪, 等. 数据中心纳入全国碳排放权交易市场机制研究[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(14): 5562-5574.
ZHU Ziheng, ZHANG Ce, DING Zhaohao, et al. Incorporating data centers into China's national carbon emissions trading system[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(14): 5562-5574.
- [2] 易文飞, 朱卫平, 郑明忠. 计及数据中心和风电不确定性的微电网经济调度[J]. 中国电力, 2024, 57(2): 19-26.
YI Wenfei, ZHU Weiping, ZHENG Mingzhong. Economic dispatch of microgrid considering data center and wind power uncertainty[J]. Electric Power, 2024, 57(2): 19-26.
- [3] 王雨欣, 陆海波, 叶承晋, 等. 考虑多类型市场协同的互联数据中心运营策略[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(24): 121-131.
WANG Yuxin, LU Haibo, YE Chengjin, et al. Operation strategy for internet data centers considering collaboration of multi-type markets[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(24): 121-131.
- [4] HAJISAMI A, TRAN T X, YOUNIS A, et al. Elastic resource provisioning for increased energy efficiency and resource utilization in Cloud-RANs[J]. Computer Networks, 2020, 172.
- [5] 可思为, 董萍, 马铭宇, 等. 考虑风光荷时空互补的多能源绿色数据中心多目标配置方法[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(22): 22-33.
KE Siwei, DONG Ping, MA Mingyu, et al. A multi-objective allocation method for multi-energy green data centers considering wind, solar and load spatial-temporal complementarity[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(22): 22-33.
- [6] 高万胜, 蔺红. 考虑配电网灵活性不足风险的分布鲁棒低碳优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(16): 49-61.
GAO Wansheng, LIN Hong. Distributionally robust low-carbon optimal scheduling considering flexibility deficiency risk in a distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(16): 49-61.
- [7] WANG P, ZHONG P, YU M, et al. Trends in energy consumption under the multi-stage development of ICT: evidence in China from 2001 to 2030[J]. Energy Reports, 2022, 8: 8981-8995.
- [8] GÜĞÜL G N, GÖKÇÜL F, EICKER U. Sustainability analysis of zero energy consumption data centers with free cooling, waste heat reuse and renewable energy systems: a feasibility study[J]. Energy, 2023, 262.
- [9] 王辉东, 高晋坤, 黄佳斌, 等. 考虑数据中心负载灵活性的电力系统运行可靠性评估方法[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(21): 96-105.
WANG Huidong, GAO Jinkun, HUANG Jiabin, et al. Power system operational reliability evaluation method considering data center load flexibility[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(21): 96-105.
- [10] BRADY G A, KAPUR N, SUMMERS J L, et al. A case study and critical assessment in calculating power usage effectiveness for a data center[J]. Energy Conversion and Management, 2013, 76: 155-161.
- [11] WANG J, DENG H, LIU Y, et al. Coordinated optimal scheduling of integrated energy system for data center based on computing load shifting[J]. Energy, 2023, 267.
- [12] 傅文军, 张如, 钱军波, 等. 东数西算视角下算力业务的商业化逻辑研究[J]. 中国仪器仪表, 2022(5): 31-34.
FU Wenjun, ZHANG Ru, QIAN Junbo, et al. Research on the marketization logic of computing power business from the perspective of eastern digital computing and western computing[J]. China Instrumentation, 2022(5): 31-34.
- [13] 丁巧宜, 王梓耀, 潘振宁, 等. 面向电量-调频-容量市场的数据中心园区算力及电力资源规划[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(1): 59-66.
DING Qiaoyi, WANG Ziyao, PAN Zhenning, et al. Planning

- of computing power and electric power resources in data center parks for electricity, frequency regulation and capacity markets[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2024, 48(1): 59-66.
- [14] 陈敏, 高赐威, 郭庆来, 等. 互联网数据中心负荷时空可转移特性建模与协同优化: 驱动力与研究架构[J]. *中国电机工程学报*, 2022, 42(19): 6945-6958.
CHEN Min, GAO Ciwei, GUO Qinglai, et al. Modeling and coordinated optimization for spatiotemporal load regulation potentials of internet data centers: motivation and architecture[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2022, 42(19): 6945-6958.
- [15] 吴卓钊. 数据中心产业发展进入新阶段[J]. *中国电信业*, 2024(2): 20-23.
WU Zhuozhao. The development of the data center industry has entered a new phase[J]. *China Telecommunications Trade*, 2024(2): 20-23.
- [16] CAO F, WANG Y, ZHU F, et al. UPS node-based workload management for data centers considering flexible service requirements[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2019, 55(6): 5533-5542.
- [17] LI F, WANG D, GUO H, et al. Distributionally robust optimization for integrated energy system accounting for refinement utilization of hydrogen and ladder-type carbon trading mechanism[J]. *Applied Energy*, 2024, 367.
- [18] 张安安, 张红, 李茜, 等. 电-气联合储能的海上微能系统模糊随机规划[J]. *中国电机工程学报*, 2019, 39(20): 5915-5925, 6172.
ZHANG Anan, ZHANG Hong, LI Qian, et al. Fuzzy stochastic programming of offshore MIES including electricity and associated gas storage[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2019, 39(20): 5915-5925, 6172.
- [19] FUSCO A, GIOFFRÈ D, CASTELLI A F, et al. A multi-stage stochastic programming model for the unit commitment of conventional and virtual power plants bidding in the day-ahead and ancillary services markets[J]. *Applied Energy*, 2023, 336.
- [20] ZENG B, ZHANG W, HU P, et al. Synergetic renewable generation allocation and 5G base station placement for decarbonizing development of power distribution system: a multi-objective interval evolutionary optimization approach[J]. *Applied Energy*, 2023, 351.
- [21] FUSCO A, GIOFFRÈ D, CASTELLI A F, et al. A multi-stage stochastic programming model for the unit commitment of conventional and virtual power plants bidding in the day-ahead and ancillary services markets[J]. *Applied Energy*, 2023, 336.
- [22] 曾博, 徐富强, 刘裕, 等. 考虑可再生能源与需求响应协同增效的能量枢纽多目标区间优化规划方法[J]. *中国电机工程学报*, 2021, 41(21): 7212-7225.
ZENG Bo, XU Fuqiang, LIU Yu, et al. Multi-objective interval optimization approach for energy hub planning with consideration of renewable energy and demand response synergies[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2021, 41(21): 7212-7225.
- [23] 曾博, 刘念, 张玉莹, 等. 促进间歇性分布式电源高效利用的主动配电网双层场景规划方法[J]. *电工技术学报*, 2013, 28(9): 155-163, 171.
ZENG Bo, LIU Nian, ZHANG Yuying, et al. Bi-level scenario programming of active distribution network for promoting intermittent distributed generation utilization[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2013, 28(9): 155-163, 171.
- [24] GAN X, SUN J, GONG D, et al. An adaptive reference vector-based interval multi-objective evolutionary algorithm[J]. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2022, 27(5): 1235-1249.
- [25] 张玉莹, 曾博, 周吟雨, 等. 碳减排驱动下的数据中心与配电网交互式集成规划研究[J]. *电工技术学报*, 2023, 38(23): 6433-6450.
ZHANG Yuying, ZENG Bo, ZHOU Yinyu, et al. Research on interactive integration planning of data centers and distribution network driven by carbon emission reduction[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2023, 38(23): 6433-6450.
- [26] 马浩天, 胡俊杰, 童宇轩. 考虑灵活性的数据中心微网两阶段鲁棒规划方法[J]. *中国电机工程学报*, 2023, 43(19): 7396-7409.
MA Haotian, HU Junjie, TONG Yuxuan. A two-stage robust planning approach for data center microgrids considering flexibility[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2023, 43(19): 7396-7409.
- [27] Data[EB/OL]. [2024-12-12]. <https://pan.baidu.com/s/1p0s1tCaoML2ZnDYtEshg?pwd=1111>

收稿日期: 2024-10-25; 修回日期: 2025-01-23

作者简介:

梁晨(2001—), 男, 硕士研究生, 研究方向为智能配电网优化规划; E-mail: 2891668991@qq.com

曾博(1987—), 男, 通信作者, 副教授, 博士生导师, 研究方向为智能配用电系统规划、电力信息物理社会系统建模与分析等。E-mail: alosecity@126.com

(编辑 石晋美)