

# 控制与决策

Control and Decision

考虑源-荷不确定性的矿山综合能源系统多时间尺度区间优化调度

胡荷娟, 孙晓燕, 曾博, 巩敦卫, 张勇

引用本文:

胡荷娟, 孙晓燕, 曾博, 巩敦卫, 张勇. 考虑源-荷不确定性的矿山综合能源系统多时间尺度区间优化调度[J]. *控制与决策*, 2024, 39(3): 827–835.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2022.1507>

---

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### [基于鲁棒优化的云医疗资源配置问题](#)

Robust optimization based medical resource allocation problem in cloud healthcare system

*控制与决策*. 2021, 36(2): 469–474 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0455>

#### [区间数可重入混合流水车间调度与预维护协同优化](#)

Collaborative optimization of interval number reentrant hybrid flow shop scheduling and preventive maintenance

*控制与决策*. 2021, 36(11): 2599–2608 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0973>

#### [工序加工时间不确定的可重入调度问题的求解](#)

Solution of reentrant scheduling problem with uncertain processing time

*控制与决策*. 2021, 36(5): 1127–1136 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1036>

#### [丢包和量化约束下的不确定系统分布式滚动时域估计](#)

Distributed moving horizon estimation for stochastic uncertain system with packet dropouts and quantized measurements

*控制与决策*. 2021, 36(7): 1771–1778 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1603>

#### [社区产消者能量分享研究综述](#)

A review on energy sharing for community energy prosumers

*控制与决策*. 2020, 35(10): 2305–2318 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0343>

# 考虑源-荷不确定性的矿山综合能源系统 多时间尺度区间优化调度

胡荷娟<sup>1</sup>, 孙晓燕<sup>1†</sup>, 曾博<sup>2</sup>, 巩敦卫<sup>1</sup>, 张勇<sup>1</sup>

(1. 中国矿业大学 信息与控制工程学院, 江苏 徐州 221000;

2. 华北电力大学 新能源电力系统国家重点实验室, 北京 102206)

**摘要:** 在高能耗矿山综合能源系统中,为减小乏风、瓦斯、矿井涌水等伴生能源、可再生能源、负荷不确定预测误差对系统的影响,提出考虑源-荷预测不确定性的矿山综合能源系统多时间尺度区间优化调度策略. 首先,构建含可再生能源、矿山伴生能源、光热电站的矿山综合能源系统架构;其次,根据电-热响应特性和源-荷不确定性在时间上的差异,建立日前-日内-实时多时间尺度区间优化调度模型. 在日前和日内优化阶段,利用区间数描述源-荷不确定性,并通过区间优化方法对伴生能源和可再生能源的实际消纳区间进行优化;日内优化在日前优化的基础上,综合考虑建筑用户热舒适度的模糊性、供热系统的热惯性及热水负荷需求响应调整各设备出力;在实时优化阶段,考虑电负荷需求响应对日内电力设备出力进行修正. 最后,通过算例分析验证所提模型和方法的可行性.

**关键词:** 矿山综合能源系统; 预测不确定性; 区间优化调度; 多时间尺度; 负荷需求响应

中图分类号: TM743

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2022.1507

**引用格式:** 胡荷娟,孙晓燕,曾博,等. 考虑源-荷不确定性的矿山综合能源系统多时间尺度区间优化调度[J]. 控制与决策, 2024, 39(3): 827-835.

## Multi-time-scale interval optimal dispatch of coal mine integrated energy system considering source-load uncertainty

HU He-juan<sup>1</sup>, SUN Xiao-yan<sup>1†</sup>, ZENG Bo<sup>2</sup>, GONG Dun-wei<sup>1</sup>, ZHANG Yong<sup>1</sup>

(1. School of Information and Control Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221000, China; 2. Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

**Abstract:** In coal mine integrated energy system (CMIES) with high energy consumption, to reduce the impact of the coal mine associated energies (CMAEs), renewable energy and load uncertainty prediction error on the system, a multi-time-scale interval optimal dispatch strategy for CMIES considering the source-load uncertainty is proposed. Firstly, the architecture of CMIES including renewable energy, CMAEs, concentrating solar power is constructed. Secondly, according to the time difference of the electricity-thermal response and the prediction errors of uncertain parameters, a multi-time-scale interval scheduling model is established. Interval mathematics is used to describe the uncertainty parameters, and the actual absorption power range of CMAEs and renewable energy are solved by interval optimization in the day-ahead and intraday dispatch. Based on day-ahead dispatch, the ambiguity of user comfort, thermal inertia and hot water load demand response (DR) are comprehensively considered to adjust the output power of equipment in the intraday dispatch. The electrical load DR is considered to revise the output power of electric equipment in the real-time dispatch. Finally, the feasibility of the proposed model and method is proved by example analysis.

**Keywords:** coal mine integrated energy system; forecast uncertainty; interval optimal dispatch; multi-time scale; load demand response

## 0 引言

为实现“碳达峰、碳中和”目标,综合能源系统 (integrated energy system, IES) 成为缓解能源供需矛

盾、促进低碳化的关键技术方向,是能源领域的重要发展方向之一<sup>[1-2]</sup>. 当前,煤炭占我国一次能源消费的 65%,并将在很长一段时期内仍是我国主要的消费

收稿日期: 2022-08-23; 录用日期: 2023-02-10.

基金项目: 国家自然科学基金项目(62133015).

<sup>†</sup>通讯作者. E-mail: xysun78@126.com.

\*本文附带电子附录文件,可登录本刊官网该文“资源附件”区自行下载阅览.

能源<sup>[3]</sup>. 开采煤炭的矿山通常地处偏远, 导致生活配套设施不完善, 矿井生产人员洗浴需求、井筒保温、井下供冷和矿井供电等生产和生活需要消耗大量的能源. 煤矿开采过程中会产生乏风、瓦斯、矿井涌水等煤矿的“废弃能源”, 这些“废弃能源”中蕴含丰富的热能, 因此称为矿山伴生能源 (coal mine associated energies, CMAEs). 回风井排出的空气中含有浓度的甲烷, 通常将甲烷浓度低于 0.75% 的煤矿瓦斯称为乏风, 据统计, 甲烷的温室效应是二氧化碳的 21 倍, 我国每年由乏风和瓦斯产生的温室气体效应约为 2 亿吨二氧化碳量<sup>[4]</sup>. 我国每年煤炭开采产生约 45 亿吨矿井涌水, 其温度一般为 10°C~15°C, 是天然的宝贵热源<sup>[5]</sup>. 目前, 很多矿山对 CMAEs 不加以利用, 简单处理后直接排放到自然环境中, 不仅造成了能源浪费而且引起了更严重的环境污染. 因此, 构建含 CMAEs 的矿山综合能源系统 (Coal mine integrated energy system, CMIES), 不仅能够挖掘矿山伴生能源的利用潜力, 而且能够促进风、光等可再生能源的利用, 减少碳排放.

目前, 已有文献对 CMIES 的系统架构设计<sup>[6]</sup>、配置优化<sup>[7]</sup>和运行优化<sup>[8]</sup>进行了研究, 但仅止于针对某一种或几种矿山伴生能源的利用构建的 CMIES 架构和日前优化调度模型, 均未考虑源-荷预测不确定性和电-热异质能源响应尺度差异对 CMIES 优化调度的影响. 在 IES 中, 汤翔鹰等<sup>[9]</sup>根据源-荷不同时间尺度的预测值, 建立了日前-日内-实时多时间尺度的优化模型, 有效降低了波动性的影响, 提高了 IES 运行的经济性. 但上述优化模型的研究是基于源-荷预测信息准确的基础上展开的, 在 IES 实际运行中, 源-荷预测值与真实值存在偏差, 即源-荷预测存在不确定性.

在 CMIES 中, 矿山伴生能源由于受地质条件、开采计划等影响, 具有较大的预测不确定性. 矿井排风量与生产能力有关, 因此空气热和乏风量随着矿井生产能力的变化而变化<sup>[10]</sup>; 矿井涌水量与气候、水文、地貌及煤矿生产等密切相关<sup>[11]</sup>; 风、空气热和地热等可再生能源受季节和气候等环境因素的影响<sup>[12]</sup>, CMAEs、可再生能源及负荷不确定性随着时间尺度的减小而减小. 因此, 研究不同时间尺度下源-荷预测不确定性对 IES 优化调度具有重要意义. 在 IES 调度领域, 解决不确定性优化问题的方法有: 随机优化方法、鲁棒优化方法和区间优化方法. 随机优化方法采用随机场景描述不确定性<sup>[13]</sup>, 但需要大量数据, 获得其概率密度函数是非常困难的; 鲁棒优化是一种在

不确定参数的变化扰动范围内针对最劣情况寻找最优解的优化方法<sup>[14]</sup>, 得到的结果过于保守; 区间优化方法能够反映不确定参数对系统的影响, 不需要不确定参数的精准概率分布模型, 也避免了考虑最恶劣情况时优化结果的保守性. Bai 等<sup>[15]</sup>采用区间数描述参数的不确定性, 并将目标与约束转换成区间数的形式实现能源调度, 取得了较好的效果. 现有的区间优化方法将风、光等不确定参数的预测区间直接代入模型中对其他优化变量优化, 得到确定的优化结果. 但在中长时间优化调度中, 确定的优化结果很难满足实时的负荷需求. 另外, 由于各出力设备不同的容量配置, 预测的 CMAEs 和可再生能源并不能完全被消纳, 因此本文对 CMAEs 和可再生能源实际输出功率区间进行优化.

在 IES 中, 为增加风、光等可再生能源的消纳, 很多学者对负荷需求响应 (demand response, DR) 进行了大量研究<sup>[16]</sup>. 在 CMIES, 热负荷主要包括洗浴热水负荷和建筑热负荷, 且热负荷需求远远大于电负荷需求, 因此需挖掘热负荷调度的潜力. 工人洗浴热水的需求主要集中在矿工交换班期间, 为满足热水负荷需求, 可根据热负荷 DR 调节热水的加热时间、水量及温度. 建筑物热负荷由于其无需额外投资的强大储热能力, 且具有较灵活的用户互动机制, 很多学者将建筑物热特性考虑到热负荷需求响应中<sup>[17]</sup>, 但未将热网特性与热负荷 DR 结合建立相应的调度模型.

基于上述分析, 本文综合考虑含可再生能源、电热负荷和 CMAEs 预测不确定性及负荷 DR 等因素, 提出 CMIES 多时间尺度的区间优化调度策略. 本文主要工作如下:

1) 构建含光热电站 (concentrating solar power, CSP)、可再生能源、CMAEs 和电热负荷的 CMIES 架构, CSP 替代传统的燃煤/燃气机组联合伴生能源装置实现“光-电-热”的能量循环, 增加 CMAEs 和可再生能源的利用.

2) 提出含源-荷不确定性的 CMIES 多时间尺度区间优化调度策略. 在日前和日内优化阶段, 利用区间数描述源-荷不确定性; 日内优化在日前优化调度的基础上, 综合考虑建筑用户热舒适度的模糊性、供热系统的热惯性及热水负荷需求响应调整各设备出力; 实时优化阶段, 考虑电负荷需求响应对日内电力设备出力进行修正, 提高调度结果的准确性.

3) 日前和日内优化, 将 CMAEs、可再生能源和大电网的实际输出功率区间作为优化变量, 即优化变量为区间. 通过仿真分析, 表明所提出的区间优化方法

能够增加调度结果的适应性。

## 1 CMIES框架及设备数学模型

### 1.1 CMIES框架

本文构建的CMIES框架如图1所示。大电网、风电机组、CSP及电储能装置提供电能。CSP内部具有“光-热-电”多能转换功能,实现了CSP内部能量的循环<sup>[18]</sup>。乏风氧化装置、水源热泵、空气源热泵和地源热泵从乏风、矿井水、空气热和地热中提取热量供热,同时需要消耗电能,具有电-热转化功能,联合CSP构成矿山综合能源循环系统实现了能源梯级利用。负荷主要分为电负荷和热负荷,电负荷除乏风氧化装置、水源热泵、空气源热泵和地源热泵,还有刚性电负荷和不确定电负荷;热负荷分为建筑热负荷、热水负荷和不确定性热负荷。

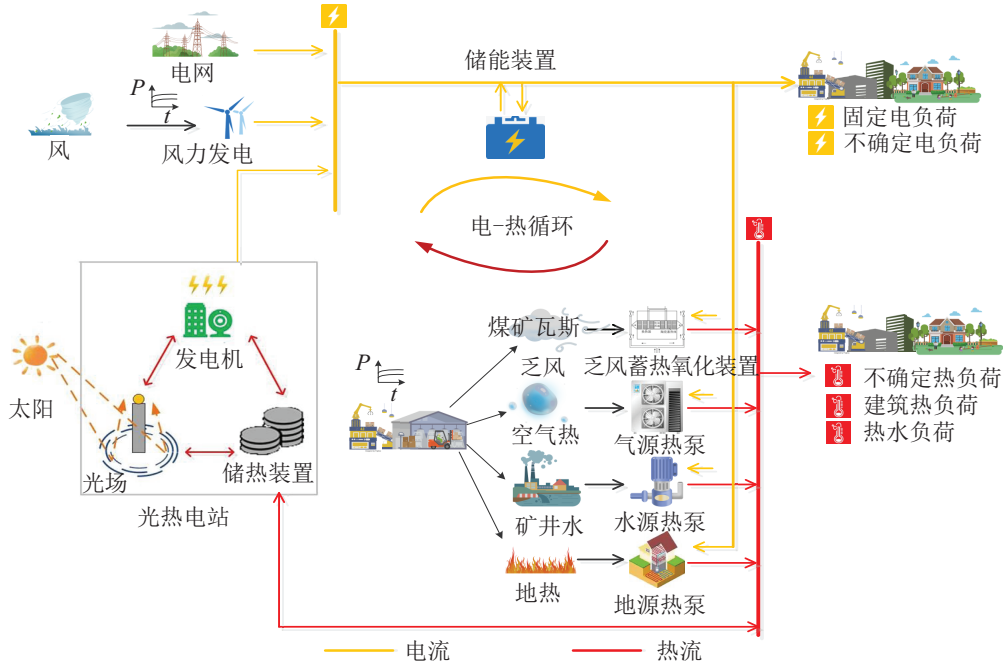


图1 CMIES框架

CMIES模型与典型园区IES模型相比具有如下特征:

1) 矿山伴生能源的利用实现了变废为宝的目的,同时乏风氧化装置、水源热泵、空气源热泵和地源热泵是热源的供给者也是电能的消耗者,使得在尽可能少消费能源的前提下产生更多的能源和经济价值;

2) CSP替代传统的燃煤/燃气机组,不仅减少了煤炭一次能源的消耗,而且联合伴生能源装置实现了“光-电-热”能源的循环利用;

3) 利用区间数表示可再生能源、CMAEs、电、热负荷的不确定预测功率,并利用区间优化算法对可再生能源和CMAEs的实际消纳功率进行优化。

### 1.2 不确定预测功率的区间表示

该系统中的不确定预测功率区间具体表示如下。

1) CMAEs不确定性的区间。

CMAEs预测功率区间 $T_{i,t}^{preI}$ 表示为

$$T_{i,t}^{preI} = [T_{i,t}^{pre-}, T_{i,t}^{pre+}], \quad (1)$$

CMAEs实际消纳的功率区间 $T_{i,t}^I$ 表示为

$$T_{i,t}^I = [T_{i,t}^-, T_{i,t}^+]. \quad (2)$$

其中: $T_{i,t}^{pre+}$ 和 $T_{i,t}^{pre-}$ 表示功率预测区间的上、下限, $T_{i,t}^+$ 和 $T_{i,t}^-$ 表示实际消纳功率区间的上、下限, $i$ 取1、2、3、4分别表示乏风、水源热、空气热和地热。

2) 风功率预测区间。

$$P_{w,t}^{preI} = [P_{w,t}^{pre-}, P_{w,t}^{pre+}], \quad (3)$$

其中 $P_{w,t}^{pre+}$ 和 $P_{w,t}^{pre-}$ 为风功率预测区间的上、下限。

3) 负荷预测功率区间。

$$\begin{cases} P_{load1,t}^{preI} = [P_{load1,t}^{pre-}, P_{load1,t}^{pre+}], \\ T_{load3,t}^{preI} = [T_{load3,t}^{pre-}, T_{load3,t}^{pre+}]. \end{cases} \quad (4)$$

其中: $P_{load1,t}^{pre+}$ 和 $P_{load1,t}^{pre-}$ 表示 $t$ 时刻不确定电负荷预测功率区间的上、下限, $T_{load3,t}^{pre+}$ 和 $T_{load3,t}^{pre-}$ 表示不确定热负荷预测功率区间的上、下限。

4) 大电网输出功率区间表示。

本文假设风功率完全消纳,大电网应对源-荷不确定性变化,则大电网的购电功率区间 $P_{ex,t}^I$ 为

$$P_{ex,t}^I = [P_{ex,t}^-, P_{ex,t}^+], \quad (5)$$

其中  $P_{\text{ex},t}^+$  和  $P_{\text{ex},t}^-$  分别表示大电网的购电功率区间的上、下限。

### 1.3 各设备的数学模型

#### 1) 热电转化装置模型.

乏风氧化装置、水源热泵、气源热泵和地源热泵消纳CMAEs的热功率与耗电功率的关系可描述为

$$T_{i,t}^I = \psi_i P_{i,t}^I, \quad (6)$$

其中  $\psi_i$  表示各设备的能效系数。

#### 2) 负荷DR模型.

##### ① 热水负荷DR模型.

$$T_{\text{load}0,t} = \frac{C_w \cdot V_{2,t} \cdot (T_{w,0} - T_t)}{3.6 \times 10^6 \Delta t}, \quad (7)$$

$$T_{\text{load}2,t} = \frac{C_w \cdot V_{2,t} \cdot (T_{w,t} - T_t)}{3.6 \times 10^6 \Delta t}. \quad (8)$$

其中:  $T_{\text{load}0,t}$  为DR前热水负荷功率,  $T_{\text{load}2,t}$  为DR后热水负荷功率;  $T_{w,0}$  表示DR前热水设定温度,  $T_t$  为  $t$  时刻冷水温度,  $T_{w,t}$  表示DR后  $t$  时刻的热水温度, 单位  $^{\circ}\text{C}$ ;  $C_w$  为单位体积热容;  $V_{2,t}$  为  $t$  时刻热水用量, 单位  $\text{m}^3$ . 式(8)可以改写为

$$T_{\text{load}2,t} = T_{\text{load}0,t} + \Delta T_{\text{load},t}, \quad (9)$$

其中  $\Delta T_{\text{load},t}$  表示  $t$  时刻热水负荷改变量, 有

$$\Delta T_{\text{load},t} = \frac{C_w \cdot V_{2,t} \cdot (T_{w,t} - T_{w,0})}{3.6 \times 10^6 \Delta t}. \quad (10)$$

##### ② 建筑热负荷DR模型.

设定供热系统仅通过供回水温度改变供热功率, 传输中热水流量不变, DR前建筑热负荷  $T_{\text{load}1,t}$  为

$$T_{\text{load}1,t} = cv_{1,t}(T_g - T_h). \quad (11)$$

其中:  $c$  为水的比热容;  $v_{1,t}$  为建筑物热水供应量, 单位为  $\text{m}^3$ ;  $T_g$  和  $T_h$  分别为供、回水温度, 为设定值。

DR后建筑热负荷  $T_{\text{load}1,t}^1$  为

$$T_{\text{load}1,t}^1 = cv_{1,t}(T_{g,t} - T_{h,t}), \quad (12)$$

其中  $T_{g,t}$  和  $T_{h,t}$  为DR后的供、回水温度。

##### ③ 电负荷DR模型.

柔性电负荷可在一定范围内削减负荷量来降低电负荷峰值, DR后的电负荷  $P_{\text{load}0,t}^1$  可以表示为

$$P_{\text{load}0,t}^1 = P_{\text{load}0,t} - y_{c,t} P_{c,t}. \quad (13)$$

其中:  $P_{\text{load}0,t}$  为DR前的固定电负荷,  $P_{c,t}$  为消减负荷量;  $y_{c,t}$  为0-1决策变量, 0为不消减, 1为消减。

## 2 CMIES 区间优化调度模型

### 2.1 CMIES 日前区间优化调度模型

#### 2.1.1 目标函数

##### 1) 经济运行成本最小.

CMIES 经济运行成本  $F_1(P, P^I)$ , 包括CSP输出

电、热功率运维成本  $C_{\text{csp},t}^E$  和  $C_{\text{csp},t}^T$ , 大电网的购电成本  $C_{\text{ex},t}$ , 蓄电池存放电成本  $C_{\text{es},t}$ , 伴生能源、可再生能源装置输出热功率成本  $C_{\text{bsny},t}$ .

$$\text{Min } F_1(P, P^I) =$$

$$\sum_{t=1}^T (C_{\text{csp},t}^E + C_{\text{csp},t}^T + C_{\text{ex},t} + C_{\text{es},t} + C_{\text{bsny},t}); \quad (14)$$

$$C_{\text{csp},t}^E = \alpha_{\text{csp}}^E P_{\text{csp},t}, \quad (15)$$

$$C_{\text{csp},t}^T = \alpha_{\text{csp}}^T T_{\text{dis}2,t}, \quad (16)$$

$$C_{\text{es},t} = \alpha_{\text{es}}(P_{\text{dis},t} + P_{\text{cha},t}), \quad (17)$$

$$C_{\text{ex},t} = c_{\text{ex},t} P_{\text{ex},t}^I, \quad (18)$$

$$C_{\text{bsny},t} = \sum_{i=1}^4 \alpha_i T_{i,t}^I. \quad (19)$$

其中:  $T$  表示日前调度时长;  $\alpha_{\text{csp}}^E$  和  $\alpha_{\text{csp}}^T$  分别表示CSP供电、供热的运维成本系数;  $\alpha_{\text{es}}$  表示电储能装置的维护成本系数;  $c_{\text{ex},t}$  表示大电网购电电价;  $T_i$  ( $i = 1, 2, 3, 4$ ) 分别表示乏风氧化装置、水源热泵、空气热泵和地源热泵输出功率,  $\alpha_i$  为对应的成本系数;  $P_{\text{csp},t}$  表示CSP发电机输出电功率;  $T_{\text{dis}2,t}$  表示CSP储热装置供给热负荷功率;  $P_{\text{cha},t}$  和  $P_{\text{dis},t}$  分别表示电储能装置的充、放电功率。

##### 2) 弃光、弃伴生能源成本最小.

为充分利用可再生能源和伴生能源, 减少伴生能源排放对环境的污染, 以弃可再生能源和弃伴生能源成本最小为目标函数, 有

$$\text{Min } F_2(P, P^I) =$$

$$\sum_{t=1}^T (k_i(T_{i,t}^{\text{pre}I} - T_{i,t}^I) + k_5(P_{\text{csp},t}^{\text{pre}} - P_{\text{csp},t})). \quad (20)$$

其中:  $k_i$  ( $i = 1, 2, 3, 4$ ) 分别为弃乏风、弃气源、弃水源、弃地源成本系数,  $k_5$  为弃光成本系数。

#### 2.1.2 约束条件

##### 1) 电功率平衡约束.

$$P_{\text{csp},t} + P_{\text{dis},t} - P_{\text{cha},t} + P_{\text{ex},t}^I + P_{w,t}^{\text{pre}I} - \sum_{i=1}^4 P_{i,t}^I = P_{\text{load}0,t} + P_{\text{load}1,t}^{\text{pre}I}. \quad (21)$$

其中:  $P_i$  ( $i = 1, 2, 3, 4$ ) 分别为乏风氧化装置、水源热泵、空气热泵和地源热泵消耗的电功率,  $P_{\text{load}1,t}^{\text{pre}I}$  为不确定电负荷预测功率区间。

##### 2) 热功率平衡约束.

$$\sum_{i=1}^4 T_{i,t}^I + T_{\text{dis}2,t} - T_{\text{cha}2,t} = T_{\text{load}1,t} + T_{\text{load}0,t} + T_{\text{load}3,t}^{\text{pre}I}. \quad (22)$$

其中:  $T_{\text{cha}2,t}$  为系统向CSP储热装置储存的热功率,

$T_{\text{load}3,t}^{\text{pre}I}$  为  $t$  时刻不确定热负荷预测功率区间。

3) 功率上下限约束。

$$30 \leq T_{i,t}^- \leq T_{i,t}^+ \leq T_i^{\text{pre}+}. \quad (23)$$

电储能装置的约束条件参见文献[8], CSP 相关的约束条件参见文献[18].

## 2.2 CMIES 日内区间优化调度模型 (15 min)

### 2.2.1 目标函数

1) 系统功率改变量成本最小。

$$\begin{aligned} \text{Min } F_3(P, P^I) = & \\ & \sum_{t=1}^{T_1} \left( \sum_{i=1}^4 \mu_i (\Delta T_{i,t}^I)^2 + \mu_5 \Delta P_{\text{csp},t}^2 + \mu_6 (\Delta P_{\text{ex},t}^I)^2 \right). \end{aligned} \quad (24)$$

其中:  $T_1$  为日内调度时长;  $\Delta T_{i,t}^I$  ( $i = 1, 2, 3, 4$ ) 分别为乏风氧化装置、水源热泵、空气热泵和地源热泵输出功率变化量,  $\mu_i$  为对应输出功率改变量的惩罚系数;  $\Delta P_{\text{csp},t}$  和  $\Delta P_{\text{ex},t}^I$  为 CSP 输出电功率、大电网购电功率的改变量,  $\mu_5$  和  $\mu_6$  为对应的惩罚成本系数。

2) 经济运行成本最小。

日内经济目标函数同式(14).

### 2.2.2 约束条件

1) 电功率平衡约束。

$$\begin{aligned} P_{\text{csp},t} + P_{\text{dis},t} - P_{\text{cha},t} + P_{\text{ex},t}^I + P_{w,t}^{\text{pre}I*} - \sum_{i=1}^4 P_{i,t}^I = & \\ P_{\text{load}0,t} + P_{\text{load}1,t}^{\text{pre}I*} & \end{aligned} \quad (25)$$

其中  $P_{w,t}^{\text{pre}I*}$  和  $P_{\text{load}1,t}^{\text{pre}I*}$  为日内预测的风和不确定电负荷功率区间。

2) 热功率平衡约束。

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^4 T_{i,t}^I + T_{\text{dis}2,t} - T_{\text{cha}2,t} = & \\ T_{\text{load}1,t}^1 + T_{\text{load}2,t} + T_{\text{load}3,t}^{\text{pre}I*} & \end{aligned} \quad (26)$$

其中:  $T_{\text{load}1,t}^1$  和  $T_{\text{load}2,t}$  分别为负荷 DR 后的热水负荷和建筑热负荷,  $T_{\text{load}3,t}^{\text{pre}I*}$  为日内预测的热负荷功率区间。

3) 热负荷 DR 约束。

① 热水负荷 DR 约束。

$$\begin{cases} |T_{w,t} - T_{w,0}| \leq \Delta T, \\ \sum_{t=1}^{T_1} \Delta T_{\text{load},t} = 0. \end{cases} \quad (27)$$

其中:  $\Delta T$  为允许的热水温度偏差最大值,  $\Delta T_{\text{load},t}$  为  $t$  时刻 DR 实施前后热水负荷变化量。

② 建筑热负荷 DR 约束。

$$T_{\text{min}} \leq T_{g,t} \leq T_{h,t} \leq T_{\text{max}}, \quad (28)$$

其中  $T_{\text{max}}$  和  $T_{\text{min}}$  分别表示建筑热水管道温度的上、下限。

日内约束条件还包括 CSP 相关约束、电储能装置约束和设备的上下限约束,同时还应遵从日前储能装置的运行状态。

## 2.3 CMIES 实时优化调度模型

在实时优化阶段,不确定参数的预测值为定值。热输出功率在日内优化调度中已确定,该阶段只修正电设备的输出功率。

### 2.3.1 目标函数

1) 经济运行成本最小。

CMIES 经济运行成本  $F_1(P, P^I)$ , 包括 CSP 输出电功率运维成本  $C_{\text{csp},t}^E$ 、大电网的购电成本  $C_{\text{ex},t}$  和电储能装置存放电成本  $C_{\text{es},t}$ 。

$$\text{Min } F_5(P, P^I) = \sum_{t=1}^{T_2} (C_{\text{csp},t}^E + C_{\text{ex},t} + C_{\text{es},t}). \quad (29)$$

2) 系统功率改变量成本最小。

$$\text{Min } F_6(P, P^I) = \sum_{t=1}^{T_2} (\mu_5 (\Delta P_{\text{csp},t}^*)^2 + \mu_6 (\Delta P_{\text{ex},t}^{I*})^2). \quad (30)$$

其中:  $T_2$  为实时调度时长,  $\Delta P_{\text{csp},t}^*$  和  $\Delta P_{\text{ex},t}^{I*}$  分别为实时较日内优化 CSP 输出电功率和大电网购电功率的改变量。

### 2.3.2 约束条件

1) 电功率平衡约束。

$$\begin{aligned} P_{\text{csp},t} + P_{\text{dis},t} - P_{\text{cha},t} + P_{\text{ex},t} + P_{w,t}^{\text{pre}} - \sum_{i=1}^4 P_{i,t} = & \\ P_{\text{load}0,t}^1 + P_{\text{load}1,t}^{\text{pre}} & \end{aligned} \quad (31)$$

其中:  $P_{w,t}^{\text{pre}}$  和  $P_{\text{load}1,t}^{\text{pre}}$  为实时预测的风和不确定电负荷功率,  $P_{\text{ex},t}$  为大电网购电功率。

2) 电负荷 DR 约束。

电负荷 DR 需要满足单次削减负荷最大、最小持续时间约束和削减次数约束。

$$\begin{cases} 0 \leq P_{c,t} \leq \tilde{P}_{c,t}, \\ t+T_{c,\text{max}} \\ \sum_{t \in \Omega} y_{c,t} \leq T_{c,\text{max}}, \\ T_{c,\text{min}}(y_{c,t} - y_{c,t-1}) \leq \sum_{t=1}^{t+T_{c,\text{min}}-1} y_{c,t}, \\ \sum_{t \in \Omega} y_{c,t} \leq \bar{l}_c. \end{cases} \quad (32)$$

其中:  $T_{c,\text{max}}$ 、 $T_{c,\text{min}}$  分别为单次调用时长的上、下限;  $\bar{l}_c$  为调度周期内最大调用次数,  $\tilde{P}_{c,t}$  为  $t$  时刻可削减功率的上限。

### 3 基于CMIES区间不确定性的优化模型转换

本文基于对区间数不确定性水平容忍度的区间序关系转换方法,将系统的不确定优化模型转化为确定优化模型,以便于优化问题求解.区间的定义、区间可能度的定义可参见文献[15],以下就目标函数及约束条件转换等内容进行介绍.

#### 1) 目标函数确定性转化.

利用区间序关系使目标函数转换为由区间中点  $f_n^m(P, P^I)$  和半径  $f_n^w(P, P^I)$  构成的确定性目标

$$\min f_n(P, P^I) = \min(f_n^m(P, P^I), f_n^w(P, P^I)), \quad (33)$$

$$\begin{cases} f_n^m(P, P^I) = \frac{1}{2}(f_n^+(P, P^I) + f_n^-(P, P^I)), \\ f_n^w(P, P^I) = \frac{1}{2}(f_n^+(P, P^I) - f_n^-(P, P^I)). \end{cases} \quad (34)$$

其中  $n$  为目标函数个数,本文  $n = 2$ .在实际应用中,由于决策者对系统的经济运行成本和弃光弃伴生能源成本具有不同的偏好,为灵活满足决策者需求,本文采用线性加权求和法将式(34)中的  $f_n^m(P, P^I)$  和  $f_n^w(P, P^I)$  集成,最终得到的优化目标函数如下:

$$\min[\beta f_n^m(P, P^I) + (1 - \beta)f_n^w(P, P^I)], \quad (35)$$

其中  $\beta$  为决策者对优化目标偏好的权重系数.

#### 2) 平衡约束确定性转化.

以日前优化电平衡约束为例,根据参考文献[15],其可转化为

$$\begin{cases} P(g_1^+(t) \geq P_{load,t}^-) = \frac{g_1^+(t) - P_{load,t}^-}{g_1^+(t) - g_1^-(t)} \geq \lambda_1, \\ P(P_{load,t}^+ \geq g_1^+(t)) = \frac{P_{load,t}^+ - g_1^+(t)}{g_1^+(t) - g_1^-(t)} \leq \lambda_2, \\ g_1^-(t) \geq P_{load,t}^- \end{cases} \quad (36)$$

其中

$$g_1^I(t) = P_{csp,t} + P_{dis,t} - P_{cha,t} + P_{ex,t}^I + P_{w,t}^{preI} - P_{i,t}^I - P_{load0,t}. \quad (37)$$

同理,可对热平衡进行确定性转化.

## 4 算例分析

### 4.1 实验背景与设置

该综合能源系统以山西某矿山冬季某一天24h的调度为研究对象,日前、日内和实时的调度时间尺度分别为1h、15min和5min.已知该矿区工人的交接班时间为6:00、14:00和22:00.分时电价参见文献[8],基于Matlab平台与Yalmip工具箱构建CMIES数学模型与约束条件,并采用Gurobi求解器求解.

### 4.2 实验分析

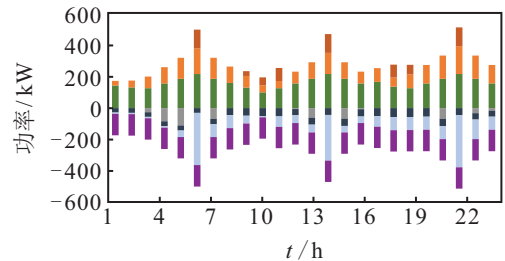
为证明源-荷预测不确定性和负荷DR对CMIES优化调度的影响,设置以下两种场景.

case 1: 不考虑源-荷预测不确定性的多时间尺度的优化调度,日内优化阶段考虑热负荷DR,在实时优化阶段考虑电负荷DR;

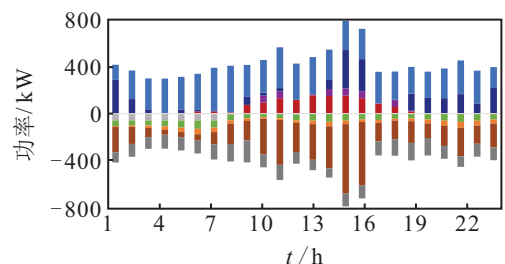
case 2: 考虑源-荷预测不确定性的多时间尺度的优化调度,日内优化阶段考虑热负荷DR,在实时优化阶段考虑电负荷DR.

#### 1) 日前优化结果分析.

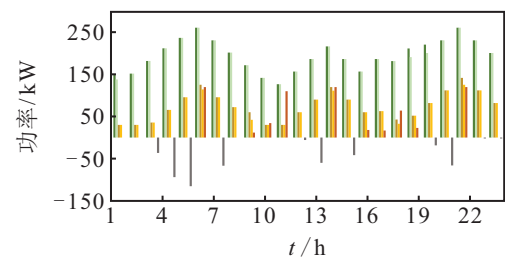
case 1 日前优化各设备输出功率如图2(a)和2(b)



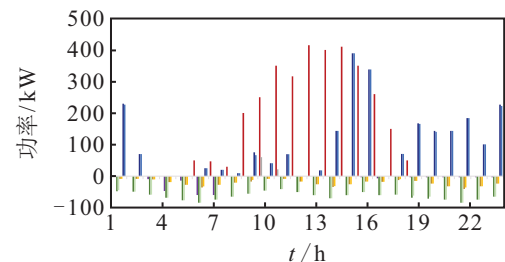
(a) case1 日前优化各设备输出的热功率



(b) case1 日前优化各设备输出的电功率



(c) case2 日前优化各设备输出的热功率



(d) case2 日前优化各设备输出的电功率

图2 日前优化各设备输出功率

所示,供电设备有风电机组、CSP和大电网.在0h~5h和20h~24h时段,由于光照强度为0,电负荷主要由风电功率和大电网购电功率供给;在6h时刻光照强度增强,CSP开始供电;在6h~19h时段,当风电和CSP输出电功率小于电负荷需求时,通过大电网购电补充电能.在低电价1h~7h时段电储能装置充电,在高电价10h~18h时段电储能装置放电.

在整个调度时段,乏风氧化装置输出功率约是水源热泵的1.64倍,其主要原因是乏风比水源热的环境污染大,弃乏风的成本系数高于弃水源热的成本系数,为降低CMIES的总经济成本优先消纳乏风.在低电价1h~7h和23h~24h时段,热能主要有乏风氧化装置供给,水源热泵输出热功率作为补充热能以满足热负荷需求;由于水源热泵能效系数大于乏风氧化装置的能效系数,在高电价8h~21h时段水源热泵的输出热功率增大以减少耗电成本.在矿区工人交接班6:00、14:00和22:00时热负荷需求较大,乏风氧化装置和水源热泵输出热功率不能满足热负荷需求,CSP的储能装置释放热能.

case 2日前优化各设备输出功率如图2(c)和2(d)所示.由图可知,各设备输出功率的变化趋势如case 1所述.对比case 2和case 1有以下结论.

① case 2为应对负荷、CMAEs和可再生能源的功率预测不确定性,乏风氧化装置、水源热泵和电网的输出功率均为区间.从图2(c)可知,在5h~7h和13h~15h时段,由于弃乏风的成本系数大于弃水源热的成本系数,为了降低系统运行成本优先消纳乏风,乏风氧化装置的输出功率达到最大且上下限重合,水源热泵的输出功率为区间以应对热负荷区间变化.在17h~21h时段,不确定热负荷的预测区间较大,乏风氧化装置和水源热泵的输出功率均为区间.对应地,在17h~21h时段电负荷不确定区间变大,风电预测功率区间不足以应对电负荷的区间变化,电网购电功率为区间,如图2(d)所示.当乏风氧化装置和水源热泵输出热功率取上限、电网购电功率取下限时,弃光弃伴生能源成本和经济成本最小;当乏风氧化装置输出热功率和水源热泵输出热功率取下限、电网购电功率取上限时,弃光弃伴生能源成本和经济成本最大.case 2中乏风氧化装置、水源热泵和电网的输出功率为区间,能够满足优化目标上限和下限之间的所有场景,增加了调度结果的适应性.

② case 2较case 1总经济成本增加,弃光弃伴生能源成本减少.如表1所示,case 2考虑CMAEs、可再生能源和负荷预测的不确定性,经济运行成本优化结

果的上下限值分别为4554.47元和4502.80元,弃伴生能源成本优化结果的上下限值分别为1024.64元和293.53元.case 2经济运行成本中点为4528.64元,大于case 1的4156.35元,弃伴生能源成本中点值为659.09元,小于case 1的692.75元.实验表明,case 2考虑了CMAEs、负荷和可再生能源预测不确定性的区间优化调度,促进了光和伴生能源的消纳,但增加了系统的总经济成本.

表1 日前优化调度方案优化结果

	case 1	case 2		
		上限值	下限值	中点值
经济运行成本/元	4156.35	4554.47	4502.80	4528.64
弃光弃伴生能源成本/元	692.75	1024.64	293.53	659.09

2) 日内优化结果分析.

日内优化各设备输出功率如图3所示.日内预测较日前预测误差减少,综合考虑日前设备运行状态和热负荷DR,调整各设备的出力.如图3(a)和(b),乏风氧化装置、水源热泵输出功率和电网购电量的变化趋势与日前调度结果总体是一致的.

在日内优化调度阶段,热负荷DR具有消峰填谷的作用.具体地如图3(c)所示,较DR前,热水负荷在6:00、14:00和22:00时刻下降,在7h~9h、20h~21h和23h~24h增加;由图3(d)可知,8h~21h时段,建筑热负荷较DR前减少,其主要原因是该时段电价高,为减少系统的运行成本,建筑热负荷只满足人体的最低舒适度.据统计,在高电价时段负荷响应前的热负荷为4299.5kW,热负荷DR后下降到3990.06kW,下降了约8.47%.由表2可知,热负荷DR后,日内的经济运行成本和总经济成本较日前减少,但弃光弃伴生能源成本增加.

表2 日内优化调度方案优化结果

	case 1	case 2		
		上限值	下限值	中点值
经济运行成本/元	4012.92	4168.07	4160.70	4164.39
功率改变量惩罚成本/元	409.71	374.59	362.34	368.47

对比case 2和case 1有以下结论.

① case 2与case 1相比,乏风氧化装置和水源热泵的输出热功率为区间,增加了调度结果的适应性.由图3(a)可知,为应对热负荷的区间变化,在5h~6h、14h~16h和22h时段,乏风氧化装置的输出功

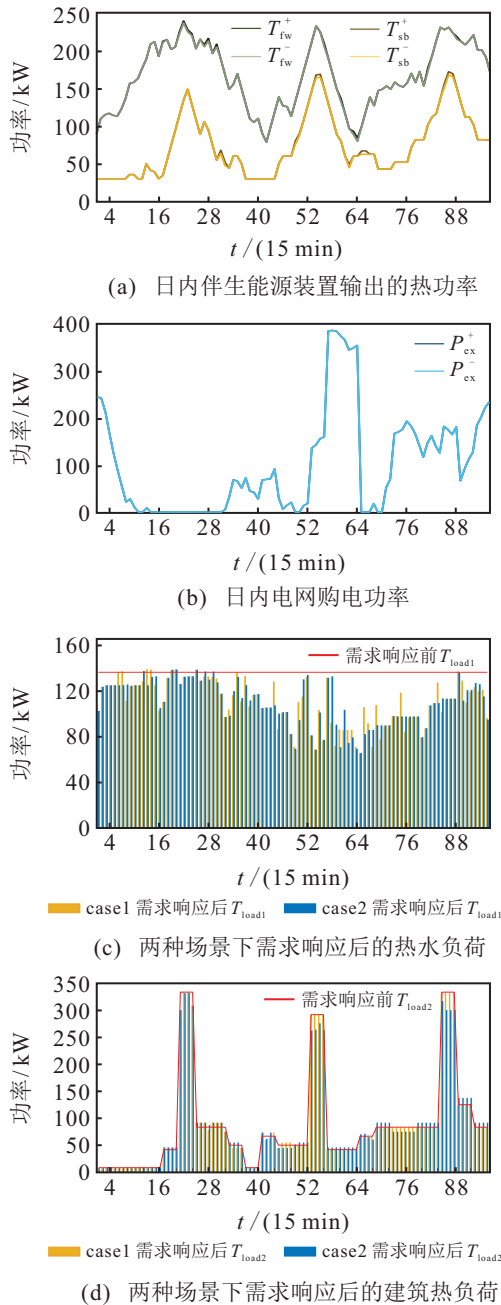


图3 日内优化各设备输出功率

率区间为 $[79.63, 239.4]$  kW; 在13 h~15 h和22 h时段, 水源热泵输出功率区间为 $[44.51, 172.13]$  kW.

② 热负荷DR后, case 2的热水负荷和建筑热负荷小于case 1的热水负荷和建筑热负荷. 由图3(c)所示, case 2在6:00、14:00和22:00时段, DR后的热水负荷转移到低负荷时段, 该时段的热水负荷小于case 1且小于DR前的热水负荷. 由图3(d)可知, 在整个调度时段, case 2中建筑热负荷小于case 1中的建筑热负荷. 说明在case 2中考虑预测参数的区间不确定, 增加了热负荷DR效果.

③ case 2采用多时间尺度优化调度能够减少预测不确定性对经济成本的影响. 通过日前调度分析, 考虑预测功率的不确定性增加系统经济运行

成本. 由表1可知, case 2较case 1的经济运行成本高372.29元; 日内优化调度阶段, case 2较case 1的经济运行成本高151.47元. 说明在日内优化阶段, 随着不确定参数预测误差减小, 考虑预测不确定性引起的经济运行成本增加量减少.

### 3) 实时优化结果分析.

在实时优化调度阶段不确定参数的预测为确定值, 综合考虑日内的调度计划和电负荷DR, 对电力设备出力进行修正. 如图4所示, 考虑电负荷DR后, 在高电价时段和高负荷时段消减了部分负荷, 总电负荷减少, 因此经济运行成本较日前进一步降低. 实时优化调度方案优化结果如表3所示, 由于实时调度阶段只考虑了电功率的优化调度, case 1和case 2发电功率的经济运行成本分别为1825.86元和2048.97元. 两种场景的功率改变量成本仅为136.73元和91.39元, 说明采用多时间尺度优化调度策略, 可以抑制供需双侧的波动, 保证系统的稳定运行. 同时, 实时优化阶段源-荷预测误差减小, 优化结果的准确性增加.

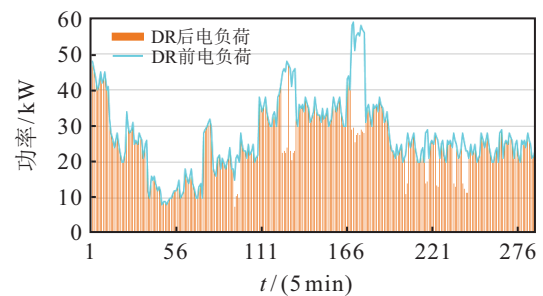


图4 case 2 DR前后电负荷

表3 实时优化调度方案优化结果

案例	经济运行成本/元	功率改变量惩罚成本/元
case 1	1825.86	136.73
case 2	2048.97	91.39

## 5 结论

为了减少不确定性对系统的影响, 同时提升系统的功率平抑能力, 本文提出了考虑源-荷预测不确定性的CMIES多时间尺度区间优化调度策略. 1) 本文综合考虑负荷DR和风、伴生能源、电负荷和热负荷预测的不确定性, 构建了CMIES优化模型, 并利用区间优化算法对伴生能源和可再生能源的实际消纳区间进行优化, 通过实验验证了调度结果的适应性, 但牺牲了系统一定的经济性. 2) 所提出的CMIES多时间尺度的区间优化调度策略, 在日内和实时调度阶段不确定参数预测误差减小, 系统运行的稳定性和调度结果的准确性增加, 有效抑制了各设备出力的波动. 3) 在日内和日前调度中分别加入热、电负荷DR,

实现了对负荷的灵活调度,提高了CMIES的经济性;同时考虑预测参数的区间不确定,能够增加热负荷DR的效果。

本文日内和实时优化调度阶段的调度时间间隔是固定的,怎么制定合理的决策指标实现系统动态时间间隔的优化调度,是接下来重点研究的内容。

### 参考文献(References)

- [1] Wang D, Liu L, Jia H J, et al. Review of key problems related to integrated energy distribution systems[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2018, 4(2): 130-145.
- [2] Abbasi K R, Shahbaz M, Zhang J J, et al. Analyze the environmental sustainability factors of China: The role of fossil fuel energy and renewable energy[J]. Renewable Energy, 2022, 187: 390-402.
- [3] 中国工程院. 中国能源中长期(2030、2050)发展战略研究报告[M]. 北京: 科学出版社, 2011.  
(Chinese Academy of Engineering. Research Report on China's Energy Medium and Long-term (2030, 2050) Development Strategy[M]. Beijing: Science Press, 2011.)
- [4] Zheng Y N, Li Q Z, Zhang G Y, et al. Study on the coupling evolution of air and temperature field in coal mine goafs based on the similarity simulation experiments[J]. Fuel, 2021, 283: 118905.
- [5] Wang Q Q, Li W P, Li T, et al. Goaf water storage and utilization in arid regions of northwest China: A case study of Shennan coal mine district[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 202: 33-44.
- [6] Bao T, Meldrum J, Green C, et al. Geothermal energy recovery from deep flooded copper mines for heating[J]. Energy Conversion and Management, 2019, 183: 604-616.
- [7] 曹泉雄. 井工煤矿区建筑能耗特性及能源综合利用研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2018.  
(Cao X X. Study on energy consumption characteristics of buildings and comprehensive utilization of energy in Jinggong coal mine area[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2018.)
- [8] Hu H J, Sun X Y, Zeng B, et al. Enhanced evolutionary multi-objective optimization-based dispatch of coal mine integrated energy system with flexible load[J]. Applied Energy, 2021, 307(5): 118130.
- [9] 汤翔鹰, 胡炎, 耿琪, 等. 考虑多能灵活性的综合能源系统多时间尺度优化调度[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(4): 81-90.  
(Tang X Y, Hu Y, Geng Q, et al. Multi-time-scale optimal scheduling of integrated energy system considering multi-energy flexibility[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(4): 81-90.)
- [10] Li L, Qin B T, Liu J S, et al. Influence of airflow movement on methane migration in coal mine goafs with spontaneous coal combustion[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2021, 156: 405-416.
- [11] Menéndez J, Ordóñez A, Fernández-Oro J M, et al. Feasibility analysis of using mine water from abandoned coal mines in Spain for heating and cooling of buildings[J]. Renewable Energy, 2020, 146: 1166-1176.
- [12] 谢友泉, 高辉, 苏志国, 等. 废弃矿井地热资源的开发利用[J]. 太阳能, 2020(10): 13-18.  
(Xie Y Q, Gao H, Su Z G, et al. Development and utilization of geothermal resources in abandoned mines[J]. Solar Energy, 2020(10): 13-18.)
- [13] Wang J W, Zhang C, You S, et al. Multi-timescale coordinated operation of a CHP plant-wind farm portfolio considering multiple uncertainties[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2021, 125: 106428.
- [14] Yang X H, Chen Z X, Huang X, et al. Robust capacity optimization methods for integrated energy systems considering demand response and thermal comfort[J]. Energy, 2021, 221: 119727.
- [15] Bai L Q, Li F X, Cui H T, et al. Interval optimization based operating strategy for gas-electricity integrated energy systems considering demand response and wind uncertainty[J]. Applied Energy, 2016, 167: 270-279.
- [16] 蔡紫婷, 彭敏放, 沈美娥. 考虑需求侧资源的智能小区综合能源日前优化调度[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(3): 18-24.  
(Cai Z T, Peng M F, Shen M E. Day-ahead optimal scheduling of smart integrated energy communities considering demand-side resources[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(3): 18-24.)
- [17] 邹岳阳, 杨莉, 冯丽, 等. 考虑热负荷二维可控性的微网热电协调调度[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(6): 13-19.  
(Zou Y Y, Yang L, Feng L, et al. Coordinated heat and power dispatch of microgrid considering two-dimensional controllability of heat loads[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(6): 13-19.)
- [18] Wang J Y, Shi J Y, Wen F S, et al. Optimal operation of CHP microgrid with concentrating solar power plants considering demand response[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(1): 176-185.

### 作者简介

胡荷娟(1989—),女,博士生,从事综合能源建模与优化等研究, E-mail: 1101481742@qq.com;

孙晓燕(1978—),女,教授,博士生导师,从事负荷预测、区域综合能源优化等研究, E-mail: xysun78@126.com;

曾博(1987—),男,副教授,博士,从事数字配电网规划与运行、综合能源系统优化分析等研究, E-mail: alosecity@126.com;

巩敦卫(1970—),男,教授,博士生导师,从事进化计算、智能优化和基于搜索的软件工程等研究, E-mail: dwgong@vip.163.com;

张勇(1979—),男,教授,博士生导师,从事智能优化、数据驱动等研究, E-mail: yongzh401@126.com.