融合源荷不确定性与多级协同的矿山能源调度方法*

刘广超

(河南工业和信息化职业学院， 河南 焦作市 454000)

摘要:针对风电、光伏等新能源接入后,矿山综合能源系统面临风光出力波动、矿山生产负荷动态变化及伴生能源出力不稳定等多重源荷不确定性,导致调度复杂度大幅提升、能效水平难以保障等难题,提出一种融合不确定性分析与多级协同优化的调度方法。首先,构建包含源-网-荷-储的能量流模型,并建立多尺度源荷不确定区间模型以量化波动风险。其次,设计日前—日内慢层—日内快层多时间尺度协同调度框架,并采用时序分段策略改进NSGA-Ⅱ算法,以实现运行成本与能效的全局寻优。基于大同矿区综合能源系统的仿真结果表明,系统运行成本降低至17.05万元,可再生能源利用率提升至89.1%,碳排放量降至6.83 t,负荷跟踪误差缩减至18.9 kW,峰值削减率达17.2%。此外,基于时序分段NSGA-Ⅱ的调度方法的平均单时段求解时间仅为7.0 ms,显著优于传统方法。研究结果验证了融合源荷不确定性与多级协同的能源调度方法在提升矿山能源系统运行效率与节能减排水平方面的有效性,为矿山综合能源系统在复杂不确定性条件下的高效低碳运行提供了可行的调度策略与算法支撑。

关键词:矿山综合能源系统;源荷不确定性;多时间尺度优化;多级协同;能源调度

中图分类号:TD61;TD98　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1005-2763(2026)08-0278-10

Mine Energy Scheduling Method Integrating Source-Load Uncertainty and Multi-Level Collaboration

Liu Guangchao

(Henan College of Industry and Information Technology, Jiaozuo, Henan 454000, China)

Abstract: In view of the mining integrated energy system suffers from multiple source-load uncertainties including fluctuating wind and photovoltaic output, dynamic variation of mine production load and unstable associated energy output after the integration of new energy such as wind power and photovoltaic power, which greatly increases scheduling complexity and makes it difficult to guarantee energy efficiency, a scheduling method integrating uncertainty analysis and multi-level collaboration optimization was proposed. Firstly, an energy flow model covering source-grid-load-storage was constructed, and a multi-scale source-load uncertainty interval model was established to quantify fluctuation risks. Secondly, a multi-time scale collaborative scheduling framework of day-ahead, intra-day slow layer and intra-day fast layer was designed, and the NSGA-Ⅱ algorithm was improved by adopting a time series segmentation strategy to realize the global optimization of operational cost and energy efficiency. Simulation results based on the integrated energy system of Datong Mining Area show that the system operation cost is reduced to 170 500 yuan, the renewable energy utilization rate is increased to 89.1%, the carbon emission is decreased to 6.83 t, the load tracking error is cut down to 18.9 kW, and the peak shaving rate reaches 17.2%. In addition, the average single-time period solution time of the scheduling method based on series segmentation NSGA-Ⅱ is only 7.0 ms, which is significantly superior to that of traditional methods. The research results verify the effectiveness of the energy scheduling method integrating source-load uncertainty and multi-level collaboration in improving the operational efficiency, energy conservation and emission reduction level of mine energy systems. Feasible scheduling strategies and algorithm support are provided for the efficient and low-carbon operation of mining integrated energy systems under complex uncertain conditions.

Key words: Mining integrated energy system, Source-load uncertainty, Multi-time scale optimization, Multi-level collaboration, Energy scheduling

0 引言

随着“双碳”目标的推进和新能源技术的快速发展,风电、光伏等可再生能源逐渐在矿山能源系统中得到广泛应用[1]。矿山综合能源系统(Integrated Energy System, IES)通过多能互补与协同调度提

* **收稿日期**:2026-04-15
基金项目:河南省重点研发与推广专项(科技攻关)项目(252102321101,252102240046)
作者简介:刘广超(1981—),男,汉族,河南漯河人,硕士,副教授,主要从事采矿理论研究与教学工作。E-mail:liuguangchao1123@126.com

升能效,助力绿色矿山建设[2]。然而,矿山生产负荷具有周期性与波动性,加之新能源出力的随机性与不确定性,使矿山 IES 的运行调度面临较大挑战。近年来,学者们针对矿山 IES 调度优化问题开展了大量研究。例如,吕超贤等[3]提出矿山 IES 电-热-煤协同调度方法,构建多环节模型刻画运煤、排水环节的柔性特征,以成本与碳排放量最小为目标优化调度。仿真结果表明,该方法通过工序调整实现了矿山多环节的经济低碳运行。胡荷娟等[4]提出考虑源-荷不确定性的多时间尺度区间优化策略,建立"日前-日内-实时"三级模型,采用区间数处理不确定性,并结合负荷响应优化出力方案,通过算例验证了该方法的可行性。Dai 等[5]提出了一种融合领域知识的多形式进化框架,通过约束分解与分类策略引入精英迁移与双重变异机制,在煤矿 IES 案例中验证了该方法的可行性与收敛性优势。

源荷不确定性主要表现为可再生能源出力的随机波动与矿山生产负荷需求的动态变化,这使得系统供需平衡具有显著的不确定性[6]。孙文杰等[7]提出一种考虑源荷不确定性的主动配电网多时间尺度电压优化方法,基于不确定性区间及其电压影响分析,采用深度强化构建两阶段优化策略。仿真结果表明,该方法可改善电压分布、降低网络损耗、增强系统鲁棒性。江训谱等[8]采用盒式不确定集对源荷不确定性进行建模,通过调节参数降低规划保守性,在此基础上构建两阶段鲁棒优化模型,并利用嵌套列和约束生成算法求解含离散/连续变量问题。仿真结果显示,该模型以牺牲经济性来提升鲁棒性。Chen 等[9]针对时移负载与分布式可再生能源不确定性下的负载聚合器投标问题,提出能耗与投标两阶段模型,分别采用情景法和信息差距决策理论处理电价与可再生能源出力不确定性。

综上所述,现有研究在矿山综合能源系统调度优化方面已取得一定进展,但仍存在以下不足:多采用单时间尺度建模,难以刻画负荷动态特性;处理源荷不确定性时多依赖单一模型,难以兼顾预测误差与实时调度需求;部分算法求解效率低,难以满足在线调度的时效性要求。鉴于此,本文提出一种融合源荷不确定性与多级协同优化的矿山能源调度方法。首先,建立矿山 IES 电-热-冷耦合能量流模型,并引入时序分段非支配排序遗传算法Ⅱ(Nondominated Sorting Genetic Algorithm Ⅱ,NSGA-Ⅱ)提高模型收敛效率;其次,构建多尺度源荷不确定区间模型,刻画光伏与负荷需求的不确定性特征;最后,建立"日前—日内慢层—日内快层"三级协同优化框架,实现多时间尺度下的动态调度。

1 矿山综合能源系统建模与运行优化方法

1.1 基于时序分段 NSGA-Ⅱ的矿山 IES 需求响应运行优化

1.1.1 矿山 IES 架构与能量流模型

矿山综合能源系统(IES)通过整合多种能源,实现电、热、冷等多能协同供给,是提高矿山能源利用效率和推动绿色矿山建设的重要技术手段。本文所构建的矿山 IES 主要由能源供给侧、能量转换单元、储能单元及负荷侧组成,具体架构如图 1 所示[10]。

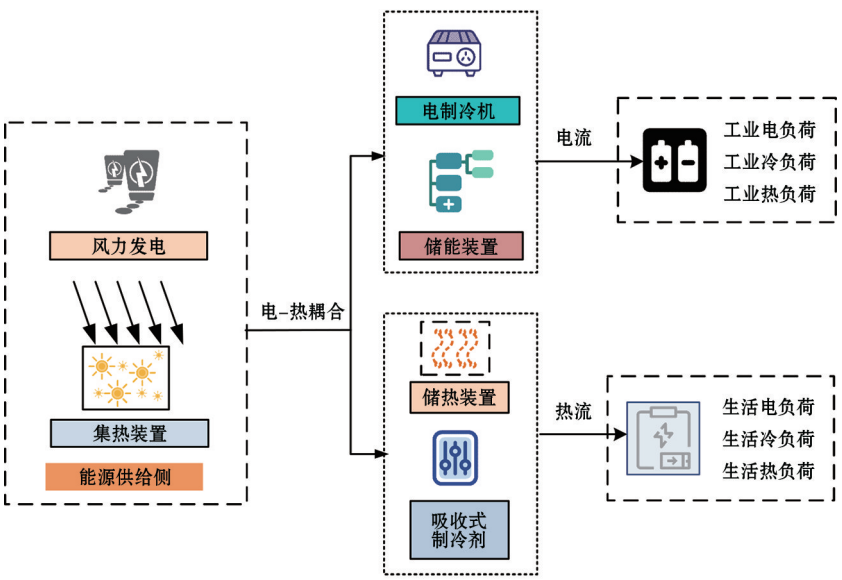


图 1 矿山 IES 结构

Fig.1 Mine IES structure

矿山 IES 在能源侧引入风电、光伏、电网及天然气等多种供能方式。电力由可再生能源与电网输入,经电制冷机与储能装置实现供需动态平衡;天然气通过燃气轮机参与能量转换。热能侧利用余热回收集各类热泵提升低品位能源,结合吸收式制冷实现冷热联供,并配置储热装置。在调度周期 T 内,电力系统需要满足电、热、冷三类能量的平衡关系,风电、光伏、电网以及燃气轮机发电提供电能,并通过电制冷机、储能装置以及电负荷进行消耗或调节,电功率平衡关系如式(1)所示[11]。

$$P_{w}(t)+P_{pv}(t)+P_{grid}(t)+P_{gt}(t)=P_{load}(t)+P_{ec}(t)+P_{ch}(t)-P_{dis}(t) \quad (1)$$

式中:$P_{w}(t)$为风电输出功率;$P_{pv}(t)$为光伏输出功率;$P_{grid}(t)$为电网购电功率;$P_{gt}(t)$为燃气轮机发电功率;$P_{load}(t)$为矿山电负荷;$P_{ec}(t)$为电制冷机功率;$P_{ch}(t)$与 $P_{dis}(t)$分别表示储能充电与放电功率。

在热能系统中,燃气轮机余热、热泵设备以及储热装置共同满足矿山热负荷需求,热量平衡关系如式(2)所示[12]。

$$Q_{gt}(t)+Q_{hp}(t)+Q^{h}_{dis}(t)=Q^{h}_{load}(t)+Q^{h}_{ch}(t) \quad (2)$$

式中:$Q_{gt}(t)$为燃气轮机产生的余热量;$Q_{hp}(t)$为热泵供热量;$Q^{h}_{dis}(t)$为系统热负荷需求;$Q^{h}_{load}(t)$与 $Q^{h}_{ch}(t)$分别表示储热装置的储热量和放热量。

冷能系统冷量主要由电制冷机和吸收式制冷机提供,冷量平衡关系如式(3)所示。

$$Q_{ec}(t)+Q_{ac}(t)=Q^{c}_{load}(t) \quad (3)$$

式中:$Q_{ec}(t)$为电制冷机产生的冷量;$Q_{ac}(t)$为吸收式制冷机产生的冷量;Q^{c}_{load}为系统冷负荷需求。

此外,各类能量转换设备需要满足相应的性能关系。电制冷机和吸收式制冷机的冷量输出与输入电功率之间的关系如式(4)所示。

$$\begin{cases}Q_{ec}(t)=C_{ec}\cdot P_{ec}(t)\\ Q_{ac}(t)=C_{ac}\cdot P_{ac}(t)\end{cases} \quad (4)$$

式中:C_{ec}为电制冷机性能系数;C_{ec}为吸收式制冷机性能系数;$P_{ac}(t)$为吸收式制冷机的功率。

基于上述电、热、冷能量平衡关系及设备性能模型,构建矿山 IES 能量流数学模型,为后续基于时序分段 NSGA-Ⅱ的需求响应优化提供模型基础。

1.1.2 基于时序分段 NSGA-Ⅱ的系统运行优化

在建立矿山 IES 能量流模型的基础上,为实现系统运行成本、能源利用效率及负荷响应能力的综合优化,本文引入时序分段策略与 NSGA-Ⅱ算法,构建矿山 IES 多目标运行优化模型。鉴于矿山生产负荷时序波动性较强,传统单时段优化难以有效刻画其动态变化规律,因此将调度周期划分为若干时段进行分段优化,并以各时段结果递进作为下一时段的初始条件,实现分时运行优化[13]。具体策略如图 2 所示。

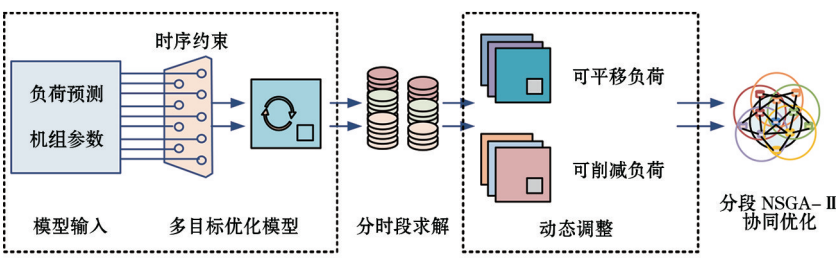


图 2 基于时序分段 NSGA-Ⅱ的系统运行优化框架

Fig.2 System operation optimization framework based on time series segmentation NSGA-Ⅱ

如图 2 所示,首先输入负荷预测与机组参数,构建多目标优化模型;分析储能、机组及柔性负荷的时序约束,明确其调节能力;基于分段原则,分时段求解并筛选最优出力方案,作为下一时段初值;同时动态调整可平移与可削减负荷,确定转移与削减范围,最终形成完整的调度方案。在调度周期 T 内,设系统划分为 N 个时间段,每个时间段长度为 Δt,系统优化目标主要包括运行成本最小化与能源利用效率最大化[14]。系统运行成本目标函数如式(5)所示。

$$F_{1}=\sum_{t=1}^{T}(C_{grid}\cdot P_{grid}(t)+C_{gas}\cdot P_{gt}(t)) \quad (5)$$

式中:F_{1} 为系统运行成本目标函数;C_{grid} 为电网购电单价;C_{gas} 为天然气价格;$P_{grid}(t)$ 为电网购电功率;$P_{gt}(t)$ 为燃气轮机发电功率。

为提高系统能源利用效率,引入综合能效优化目标函数,如式(6) 所示。

$$F_{2}=\max\frac{E_{load}}{E_{input}} \quad (6)$$

式中:F_{2} 为综合能效优化目标函数;E_{load} 为系统向

负荷侧提供的有效能源总量;E_{input} 为系统输入的总能源量。

为保证系统运行的稳定性,各类设备需满足运行约束。燃气轮机输出功率、电储能装置充放电功率的约束条件如式(7)所示,储能状态变化关系如式(8)所示。

$$\begin{cases} P_{gt}^{min} \leqslant P_{gt}(t) \leqslant P_{gt}^{max} \\ P_{ch}^{min} \leqslant P_{ch}(t) \leqslant P_{ch}^{max} \\ P_{dis}^{min} \leqslant P_{dis}(t) \leqslant P_{dis}^{max} \end{cases} \tag{7}$$

$$S_{t+1} = S_t + \frac{\eta_{ch} P_{ch}(t) - P_{dis}(t)/\eta_{dis}}{E_{max}} \tag{8}$$

式中:S_t 为当前时段的储能荷电状态;S_{t+1} 为更新后的储能荷电状态;η_{ch}、η_{dis} 分别为充电、放电效率;E_{max} 为储能容量。

在此基础上,采用 NSGA-Ⅱ算法进行多目标求解。随机生成初始种群,经非支配排序与拥挤度计算,通过选择、交叉、变异迭代寻优;结合时序分段,在各时段内搜索 Pareto 最优解集,并依据负荷与设备状态动态更新调度,最终选出综合最优方案,实现矿山 IES 高效协同运行。

1.2 基于多尺度源荷不确定区间转化的矿山 IES 运行优化

1.2.1 多尺度源荷不确定性建模

在矿山 IES 架构中,引入光热电站替代燃气轮机,作为系统的电热联合供能单元。光热电站通过发电机组和储热装置实现太阳能向电能和热能的转换与存储,构建电-热耦合的能源供应模式[15]。含光热电站的矿山 IES 框架如图 3 所示。

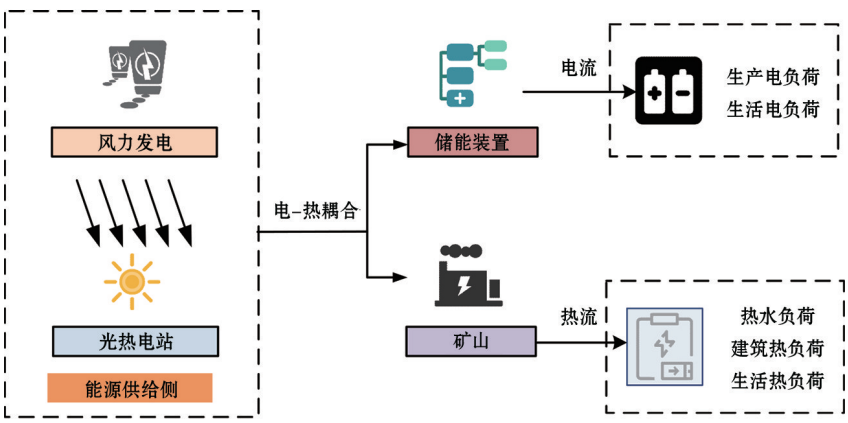


图 3 含光热电站的矿山 IES 框架

Fig.3 Framework of mine IES with a solar thermal power station

由图 3 可知,含光热电站的矿山 IES 在能源供给侧引入风电、电网及光热电站,后者通过发电机与储热装置将太阳能转换为电能/热能并存储,形成电-热耦合。电能经输电网供给生产与生活负荷,剩余由储能装置调节。热能侧协同余热、地热等多元热源,经蓄热氧化、热泵等装置进行转换与品位提升,满足热水供应、建筑供热及生活热负荷。由于矿山 IES 的源侧(光伏)与荷侧(生产/生活用电)均具有随机性,需对二者进行不确定性建模以提升调度方案的鲁棒性[16]。为描述预测误差带来的不确定性,将光伏出力表示为区间形式,如式(9)所示。

$$P_{pv}(t) \in [P'_{pv}(t), P''_{pv}(t)] \tag{9}$$

式中:$P_{pv}(t)$ 为光伏发电功率;$P'_{pv}(t)$ 为光伏预测功率的最小可能值;$P''_{pv}(t)$ 为光伏预测功率的最大可能值。多尺度源荷不确定性运行优化模型如图 4 所示。

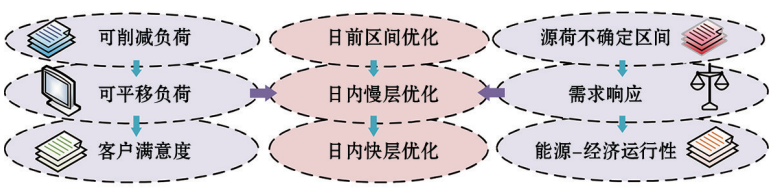


图 4 多尺度源荷不确定性运行优化模型

Fig.4 Uncertainty operation optimization model of multi-scale source-load

由图 4 可知,该模型在需求响应侧引入可削减负荷与可平移负荷,并综合考虑客户满意度、经济性

和环保性等运行目标。通过构建日前区间优化与日内优化两个层级,实现不同时间尺度下的协同调度,其中日前阶段基于源荷预测及其不确定区间进行优化决策,日内阶段在实时运行条件下对调度方案进行动态修正。同时,模型结合建筑热负荷特性以及可再生能源消纳成本等因素进行综合约束,从而实现矿山综合能源系统的优化平衡。

1.2.2 基于多级协同的不确定区间变量的运行优化模型

在源荷不确定区间模型基础上,构建矿山 IES 多时间尺度运行优化模型。系统运行优化采用日前—日内慢层—日内快层三层优化结构,以实现不同时间尺度下的协同调度[17]。三者之间的关系如图 5 所示。

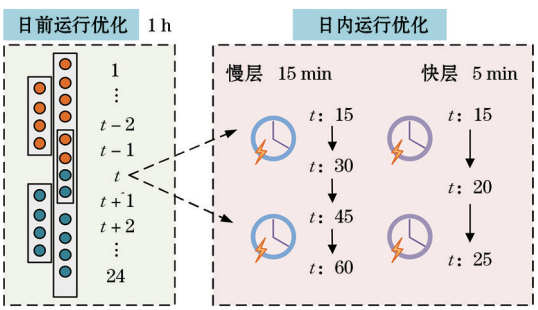


图 5 日前—日内慢层—日内快层优化关系

Fig.5 Optimization relationship of day ahead, intra-day slow layer and intra-day fast layer

系统运行优化分为日前和日内两个阶段:日前优化制定 24 h 整体调度计划;日内进一步分为慢层与快层,分别对日前计划进行滚动更新与实时精细调节。通过“日前—日内慢层—日内快层”逐层细化,可有效提升系统调度灵活性与运行稳定性。日前优化以 1 h 为时间尺度,根据预测的源荷区间信息制定系统初始运行计划,其优化目标为系统运行成本最小化,同时考虑可再生能源消纳目标,如式(10)所示。

$$\begin{cases} \min F_1 = \sum_{t=1}^{T} \left(C_{\text{grid}} P_{\text{grid}}(t) + C_{\text{gas}} P_{\text{gt}}(t) \right) \\ \max F_2 = \sum_{t=1}^{T} P_{\text{pv}}(t) \end{cases} \tag{10}$$

式中:$\min F_1$ 为最小系统运行成本目标函数;$\max F_2$ 为最大可再生能源利用目标函数。

为应对源荷预测误差,系统在日内阶段进行滚动优化。慢层优化以 15 min 为时间尺度,对日前调度结果进行修正,其优化模型如式(11)所示[18]。

$$\min F_{\text{slow}} = \sum_{t=1}^{T} \left| P_{\text{plan}}(t) - P_{\text{real}}(t) \right| \tag{11}$$

式中:$\min F_{\text{slow}}$ 为日内慢层优化的目标函数值;$P_{\text{plan}}(t)$ 为日前计划功率;$P_{\text{real}}(t)$ 为实时预测功率。

快层优化以 5 min 为时间尺度,通过实时负荷响应调整电设备运行计划,如式(12)所示。

$$P_{\text{plan}}(t+1) = P_{\text{plan}}(t) + \Delta P(t) \tag{12}$$

式中:$P_{\text{plan}}(t+1)$ 为经快层优化调整后的下一时刻计划功率;$\Delta P(t)$ 为实时功率调节量。

在多时间尺度运行优化模型的基础上,研究进一步构建日前—日内慢层—日内快层的三级协同优化策略,通过分层调度与滚动更新相结合,实现矿山 IES 在不同时间尺度下的动态优化。整体优化流程如图 6 所示。

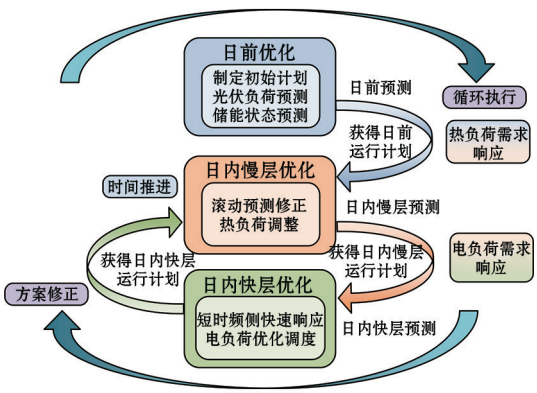


图 6 日前—日内慢层—日内快层优化策略

Fig.6 Optimization strategy of day ahead, intra-day slow layer and intra-day fast layer

首先,在日前阶段,基于光伏与负荷需求预测制定初始运行计划及储能状态;日内慢层以滚动方式修正光伏与热负荷预测,结合热需求响应调整热功率计划;日内快层则通过短时预测响应电负荷波动,细化电设备调度。三阶段通过时间递进与循环滚动执行,逐步修正运行方案,实现不确定条件下的动态优化与稳定运行。

2 矿山 IES 运行优化方法的实例验证

2.1 工程概况

为验证所提方法的有效性,选取山西省大同矿区某典型矿井作为研究对象。大同矿区位于山西省北部,距大同市中心约 12.5 km,面积 90 km^2,属温带大陆性季风气候。该矿区为全国八大煤炭生产基地之一,煤炭资源丰富,地下矿藏主要有煤炭、石灰岩、高岭岩等。矿区涵盖大同市平城区、新荣区、云

冈区、左云县,以及朔州市的怀仁市、山阴县、右玉县部分区域,境内河道属海河流域。截至 1996 年末,大同矿区的保有探明储量为 386.43 亿 t。矿区煤田类型属大同煤田,为轴向北东的向斜构造盆地,含煤 7 组 14 层,主要可采煤层包括侏罗系大同组(含 14～21 层可采煤)、石炭-二叠系太原组(10 层)和山西组(1 层)。2025 年前后,大同矿区核定原煤生产能力超 4 000 万 t/a,其中塔山煤矿为骨干矿井,设计产能为 2 500 万 t/a。开采方式以综采放顶煤和一次采全高为主,采用平硐-立井混合开拓。本研究基于该矿区的实际运行数据,开展矿山 IES 运行优化结果分析。

2.2 基于时序分段 NSGA-Ⅱ的矿山 IES 运行优化结果分析

为验证所提出的时序分段 NSGA-Ⅱ算法在矿山综合能源系统运行调度中的有效性,研究构建了包含光伏、电网、储能装置及多类型负荷的矿山 IES 仿真系统,并对系统在 24 h 调度周期内的运行情况进行分析。将基于时序分段 NSGA-Ⅱ的矿山 IES 运行优化方法与基于非精确狄利克雷模型(Imprecise Dirichlet Model, IDM)的矿山 IES 分布式鲁棒优化调度方法[19],以及基于约束自适应多任务差分进化算法(Constraint Adaptive Multi-Tasking Differential Evolution, CA-MTDE)的调度方法[20]进行对比分析。

仿真软件环境为 MATLAB R2022b,硬件配置为 Intel Core i7-10700 CPU @ 2.90 GHz,16 GB RAM,操作系统为 Windows 10。系统调度时间间隔设为 1 h,仿真所用的负荷、光伏出力及电价等数据来源于山西省大同矿区某矿井 2024 年夏季典型日的历史运行实测数据与预测数据(采样间隔为 1 h)。对比方法的参数设置及模型参考其原始文献。不同调度方法运行性能对比见表 1。

表 1 不同调度方法运行性能对比

Table 1 Performance comparison of different scheduling methods

调度方法	系统运行成本/万元	可再生能源利用率/%	负荷跟踪误差/kW	峰值削减率/%
基于 IDM 的分布式鲁棒优化调度方法	18.74	81.6	26.3	11.4
基于 CA-MTDE 的调度方法	17.92	84.7	22.5	14.1
时序分段 NSGA-Ⅱ调度方法	16.85	89.3	18.7	17.6

从表 1 可以看出,与基于 IDM 的分布式鲁棒优化调度方法相比,基于 CA-MTDE 的调度方法的系统运行成本由 18.74 万元降低至 17.92 万元,可再生能源利用率由 81.6%提高至 84.7%,表明该方法在矿山 IES 调度优化中具有一定优势。同时,负荷跟踪误差由 26.3 kW 降低至 22.5 kW,峰值削减率提高至 14.1%,表明系统对负荷波动的调节能力增强。相比之下,本文提出的时序分段 NSGA-Ⅱ方法在各项性能指标上均表现出更优。系统运行成本进一步降低至 16.85 万元,较基于 IDM 的分布式鲁棒优化调度方法降低约 10.1%,较基于 CA-MTDE 的调度方法降低约 6.0%;可再生能源利用率提高至 89.3%,表明系统能够更充分地利用风电和光伏等清洁能源。同时,负荷跟踪误差降低至 18.7 kW,峰值削减率提升至 17.6%,表明本文所提出的方法在负荷调节与系统稳定运行方面具有更好的控制效果。不同调度方法的总运行时间以及平均单时段求解时间结果如图 7 所示。

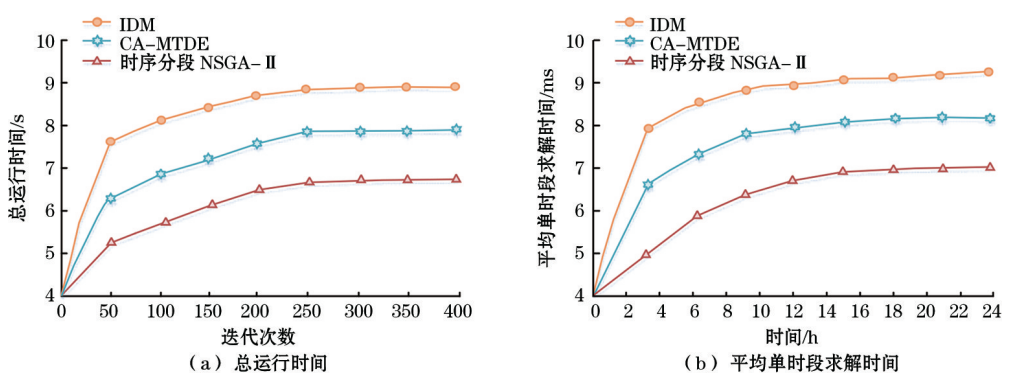


图 7 运行时间及求解时间对比结果

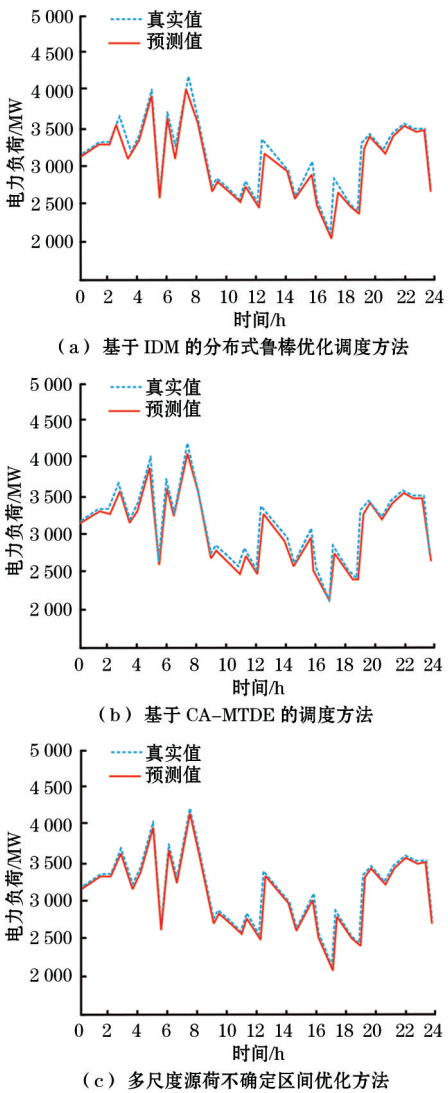
Fig.7 Comparison results of running time and solution time

由图 7(a)可知,当迭代次数达到约 250 次时,各方法运行时间基本趋于稳定,其中基于 IDM 的分布式鲁棒优化调度方法的运行时间约为 8.9 s,基于 CA-MTDE 的调度方法的运行时间约为 7.9 s,而基

于时序分段 NSGA-Ⅱ的调度方法的运行时间约为 6.7 s,表明本文所提出的方法在求解效率方面具有明显优势。由图 7(b)可知,基于 IDM、CA-MTDE 及时序分段 NSGA-Ⅱ的调度方法平均单时段求解时间分别约为 9.0 ms、8.2 ms 和 7.0 ms,表明时序分段策略能有效降低计算复杂度,提升求解效率。综合上述结果可以看出,时序分段 NSGA-Ⅱ调度方法在整体与单时段求解效率上均优于对比方法,更能满足矿山 IES 在线调度的实时优化需求。

2.3 多尺度源荷不确定区间优化结果分析

考虑到矿山 IES 运行过程中源荷预测存在误差,本文采用区间模型描述光伏出力及负荷需求的不确定性。不同调度方法下的电力负荷预测结果如图 8 所示。



(a) 基于 IDM 的分布式鲁棒优化调度方法

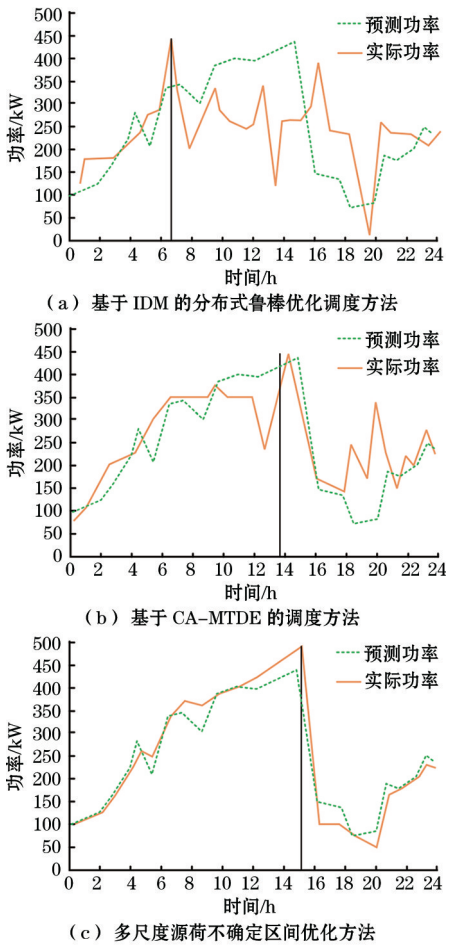
(b) 基于 CA-MTDE 的调度方法

(c) 多尺度源荷不确定区间优化方法

图 8 电力负荷预测结果对比

Fig.8 Comparison of power load forecasting results

由图 8 可以看出,不同调度方法在电力负荷预测方面表现出明显差异。基于 IDM 的分布式鲁棒优化调度方法虽能跟踪负荷变化趋势,但在波动时段偏差较为明显;基于 CA-MTDE 的调度方法整体更接近真实值,峰值拟合有所提升,但部分时段仍存在局部偏差;多尺度源荷不确定区间优化方法在负荷峰值、谷值及波动时段均与真实曲线高度重合,表现出最优的预测精度与稳定性。不同调度方法下光伏预测功率结果如图 9 所示。



(a) 基于 IDM 的分布式鲁棒优化调度方法

(b) 基于 CA-MTDE 的调度方法

(c) 多尺度源荷不确定区间优化方法

图 9 光伏功率预测结果对比

Fig.9 Comparison of photovoltaic power prediction results

由图 9 可以看出,不同调度方法在光伏功率预测方面表现出明显差异。基于 IDM 的分布式鲁棒优化调度方法能大致跟踪光伏功率变化趋势,但在功率快速波动时段偏差较大,适应能力有限;基于 CA-MTDE 的调度方法预测曲线更接近实际值,整体拟合度有所提升,但个别峰值或突变时段仍存在一定偏差;多尺度源荷不确定区间的优化方法的预测曲线与实际功率高度重合,在上升和下降阶段均能准确跟踪,波动特征一致,表现出最优的预测精度与稳

定性,有助于提高系统调度可靠性。

2.4 矿山 IES 运行优化的案例仿真分析

为验证所提出的时序分段 NSGA-Ⅱ+多尺度源荷不确定区间优化方法在矿山综合能源系统中的实际应用效果,选取山西省大同矿区综合能源系统作为研究对象进行仿真分析。该矿区能源系统主要由风电、光伏、电网及储能装置等组成,同时承担矿井生产设备用电、通风排水及生活区能源供应等多类型负荷,具有典型的矿山能源系统运行特征。仿真试验基于 MATLAB R2022b 平台,优化算法采用 NSGA-Ⅱ框架。高波动工况以及常规工况运行下的储能荷电状态(SOC)变化曲线如图 10 所示。

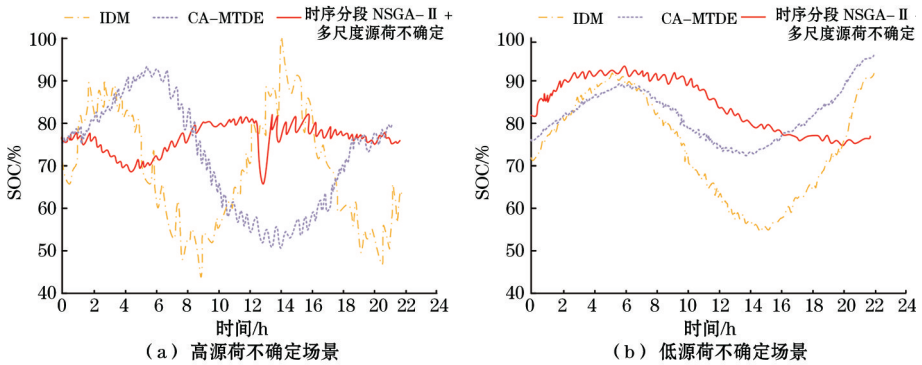


图 10 储能 SOC 变化曲线

Fig.10 Energy storage SOC variation curves

由图 10(a)可以看出,在新能源出力与负荷需求剧烈波动下,基于 IDM 与 CA-MTDE 的调度方法的 SOC 波动幅度较大,而本文所提方法的 SOC 变化相对平稳,能更合理地调度储能装置,提升系统鲁棒性。由图 10(b)可知,在平稳运行场景下,三种方法的 SOC 均较为平滑,但本文所提方法能将 SOC 维持在更合理的区间,实现削峰填谷,能量调节效果更优。不同调度方法的矿山 IES 运行效果对比见表 2。

表 2 不同调度方法的矿山 IES 运行效果对比

Table 2 Comparison of operation effects of mining IES with different scheduling methods

调度方法	系统运行成本/万元	可再生能源利用率/%	负荷跟踪误差/kW	峰值削减率/%	碳排放量/t
基于 IDM 的分布式鲁棒优化调度方法	19.12	80.4	27.6	10.8	8.74
基于 CA-MTDE 的调度方法	18.36	84.2	23.1	13.7	7.96
时序分段 NSGA-Ⅱ+多尺度源荷不确定区间优化方法	17.05	89.1	18.9	17.2	6.83

由表 2 可以看出,与基于 IDM 的分布式鲁棒优化调度方法和基于 CA-MTDE 的调度方法相比,本文提出的时序分段 NSGA-Ⅱ+多尺度源荷不确定区间优化方法在系统运行成本、可再生能源利用率及负荷跟踪误差等方面均表现出更优性能。具体而言,系统运行成本降低至 17.05 万元,较基于 IDM 的分布式鲁棒优化调度方法降低约 10.8%;可再生能源利用率提升至 89.1%,显著增强了清洁能源消纳能力。同时,该方法在负荷调节方面具有更好的控制效果,负荷跟踪误差降低至 18.9 kW,峰值削减率达到 17.2%。综合以上结果,本文所提出的时序分段 NSGA-Ⅱ+多尺度源荷不确定区间优化方法能够有效提升矿山综合能源系统的运行经济性与稳定性。

3 结论

(1) 针对矿山综合能源系统在新能源接入与负荷波动条件下调度复杂度高、运行稳定性不足的问题,提出了一种融合源荷不确定性与多级协同的能源调度方法。通过构建矿山 IES 电-热-冷耦合模型,并引入时序分段策略改进 NSGA-Ⅱ算法,实现了运行成本与能效的多目标协同优化;同时建立光伏与负荷不确定区间模型,构建日前—日内慢层—日内快层多时间尺度协同调度框架,有效提升了不确定条件下的调度灵活性与运行稳定性。

(2) 山西大同矿区某典型矿山 IES 的仿真结果表明,本文所提方法在系统运行经济性与能源利用

效率方面具有明显优势。系统运行成本降低至17.05万元,可再生能源利用率提升至89.1%,显著提高了风电与光伏的消纳能力;负荷跟踪误差降低至18.9 kW,峰值削减率达到17.2%,系统碳排放量降低至6.83 t,充分验证了该方法在提升矿山IES运行效率与节能减排水平方面的有效性。

(3)算法性能分析表明,基于时序分段NSGA-Ⅱ的调度方法在保证优化效果的同时,具有较高的求解效率,其运行时间稳定在6.7 s左右,平均单时段求解时间约为7.0 ms,优于其他对比算法,能够满足矿山IES实时调度的需求。该方法在矿山能源调度优化中具有一定的应用潜力与工程价值,但仍存在局限性,如本文研究主要基于仿真验证,未充分考虑设备故障与极端气候等实际运行因素。未来可结合实际运行数据构建精细化预测模型,引入深度强化学习实现智能调度,并通过多矿区协同优化进一步提升系统运行效率与低碳水平。

参考文献(References):

[1] 崔娜.矿产资源开发效率与经济高质量发展耦合协调关系研究[J].矿业研究与开发,2023,43(10):217-224.
Cui Na. Research on coupling coordination of relationship between mineral resources exploitation efficiency and high-quality economic development[J]. Mining Research and Development,2023,43(10):217-224.

[2] Hu Hejuan, Sun Xiaoyan, Zeng Bo, et al. Dispatch of a coal mine-integrated energy system: optimization model with interval variables and lower carbon emission[J]. Tsinghua Science and Technology,2024,29(5):1441-1462.

[3] 吕超贤,罗刚,孙文,等.产-需全链条耦合的矿山综合能源电-热-煤协同低碳调度[J].电力自动化设备,2025,45(2):61-68.
Lyu Chaoxian, Luo Gang, Sun Wen, et al. Electricity-heat-coal collaborative low-carbon scheduling of coal mine integrated energy system considering full chain coupling of production and demand[J]. Electric Power Automation Equipment,2025,45(2):61-68.

[4] 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.
Hu Hejuan, Sun Xiaoyan, Zeng Bo, et al. Multi-time-scale interval optimal dispatch of coal mine integrated energy system considering source-load uncertainty[J]. Control and Decision,2024,39(3):827-835.

[5] Dai Canyun, Sun Xiaoyan, Hu Hejuan, et al. Multiform differential evolution with elite-guided knowledge transfer for coal mine integrated energy systems constrained dispatch[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2024,29(6):2552-2566.

[6] 赵鸿,郝武帮,李琰.考虑源荷不确定性的微电网四阶段随机鲁棒优化[J].重庆理工大学学报(自然科学),2025,39(11):214-222.
Zhao Hong, Hao Wubang, Li Yan. Four-stage stochastic robust optimization of microgrid considering source-load uncertainty[J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science),2025,39(11):214-222.

[7] 孙文杰,郑诗珉,李金灵,等.考虑源荷不确定性的主动配电网多时间尺度电压优化方法[J].武汉大学学报(工学版),2025,58(12):1970-1982+1996.
Sun Wenjie, Zheng Shimin, Li Jinling, et al. A multi-time-scale voltage optimization method for active distribution networks considering source-load uncertainty[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2025, 58(12): 1970-1982+1996.

[8] 江训谱,包哲静,于森,等.考虑源荷不确定性的园区综合能源系统鲁棒多阶段规划[J].电力建设,2025,46(4):99-112.
Jiang Xunpu, Bao Zhejing, Yu Miao, et al. Robust multi-stage planning of park-level integrated energy system considering source-load uncertainties[J]. Electric Power Construction,2025,46(4):99-112.

[9] Chen Lingyu, Xu Jian, Sun Yuanzhang, et al. Bidding strategies of load aggregators for day-ahead market with multiple uncertainties[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2023,39(2):2786-2800.

[10] Luo Zhengyi, Peng Jinqing, Hu Maomao, et al. Multi-objective optimal dispatch of household flexible loads based on their real-life operating characteristics and energy-related occupant behavior[J]. Building Simulation,2023,16(11):2005-2025.

[11] 宋宜凯,申炜杰,曾博,等.计及㶲分析的矿山综合能源系统多目标运行方法[J].太阳能学报,2025,46(9):650-660.
Song Yikai, Shen Weijie, Zeng Bo, et al. Multi-objective operation method for coal mine integrated energy systems considering exergy analysis[J]. Energiae Solaris Sinica, 2025,46(9):650-660.

[12] Pei Shuwei, Yang Jue, Gong Zeyu. Learning-based dispatching system with trajectory optimisation for autonomous mining transportation[J]. International Journal of Mining, Reclamation and Environment, 2026, 40(2): 89-106.

[13] 王龙飞,王帅,李庆,等."双碳"目标下西部地区煤矿多能互补供能研究[J].中国煤炭,2023,49(10):36-42.
Wang Longfei, Wang Shuai, Li Qing, et al. Research on multi-energy complementary energy supply in coal mines in western China under the goals of carbon peak and carbon neutrality[J].China Coal,2023,49(10):36-42.

[14] 王雨晴,闫朝臣,王昭贞,等.基于OCC-IEGC模型的矿山综合能源系统运行效益评价[J].电力系统保护与控制,2025,53(13):11-22.

Wang Yuqing, Yan Chaochen, Wang Zhaozhen, et al. Operation benefit evaluation of mine integrated energy systems based on OCC-IEGC model[J]. Power System Protection and Control,2025,53(13):11-22.

[15] Han Bing, Zhang Yongyong, Shao Quanxi, et al. Estimating multi-source input uncertainties and their propagation for integrated water quantity and quality simulations[J]. Hydrological Sciences Journal,2025,70(16):2976-2992.

[16] 程志平,穆玉皓,李忠文,等.综合能源系统全生命周期零碳规划及多时间尺度能量优化[J].电力系统保护与控制,2026,54(2):162-173.
Cheng Zhiping, Mu Yuhao, Li Zhongwen, et al. Whole life-cycle zero-carbon planning and multi-time-scale energy optimization for integrated energy systems[J]. Power System Protection and Control,2026,54(2):162-173.

[17] Wang Ying, Wang Xiaojun, Zhang Yizhi, et al. Over-limit risk assessment method of integrated energy system considering source-load correlation[J]. Global Energy Interconnection,2023,6(6):661-674.

[18] 陈权,段宇辰,徐斌,等.计及用户需求响应贡献度的综合能源系统多时间尺度优化[J].电气工程学报,2025,20(6):351-364.
Chen Quan, Duan Yuchen, Xu Bin, et al. Multi-time-scale optimization of integrated energy system considering the contribution of user demand response[J]. Journal of Electrical Engineering,2025,20(6):351-364.

[19] 费孝天,张勇,胡荷娟,等.计及P2G的矿山综合能源系统两阶段分布式鲁棒优化调度方法[J].太阳能学报,2025,46(5):149-157.
Fei Xiaotian, Zhang Yong, Hu Hejuan, et al. Two-stage distributed robust optimal scheduling method for coal mine integrated energy system considering P2G[J]. Acta Energiae Solaris Sinica,2025,46(5):149-157.

[20] Dai Canyun, Sun Xiaoyan, Hu Hejuan, et al. A constraint adaptive multi-tasking differential evolution algorithm: designed for dispatch of integrated energy system in coal mine[J]. Tsinghua Science and Technology,2023,29(2):368-385.