矿区勘探与生产用能条件下的光热耦合综合能源调度模型*

刘志[1]，翟雨阳[2]

（1.江苏旅游职业学院， 江苏 扬州市 225000；
2.中联煤层气国家工程研究中心有限责任公司， 北京 100089）

摘要：矿山勘探生产过程中，钻机、通风等能耗负荷与建筑采暖、热水负荷交织，且矿区富含矿井水余热、伴生气体等资源，传统能源调度方法难以有效应对。为此，提出了一种融合光热电站与多源热泵的矿山综合能源系统（MIES）优化调度模型，以提升能效与低碳化水平。将光热熔盐储热与多源热泵群协同工作，构建适应矿山生产节奏的电-热协同供应网络，并引入多目标粒子群优化算法对系统的经济性与低碳性进行优化。结果表明，该矿山能源系统周运行成本降至33.17万元；碳排放总量为39.44 t；可再生能源消纳率达92.54%。该系统有效保障了矿区供热稳定，温度波动控制在±1.2 ℃；光热储热装置利用率达92.17%，热泵群平均性能系数提升至4.47。所述模型能充分整合利用矿区多源能源，有效提升矿山生产系统的经济与环保效益，为绿色矿山建设提供关键技术支撑。

关键词：矿山综合能源系统；光热耦合；低碳协同；多目标优化
中图分类号：TD98 **文献标识码**：A **文章编号**：1005-2763(2026)08-0288-10

Research on Integrated Energy Scheduling Model for Photothermal Coupling Under the Condition of Exploration and Production Energy in Mining Area

Liu Zhi[1], *Zhai Yuyang*[2]

(1.Jiangsu College of Tourism, Yangzhou, Jiangsu 225000, China;
2.China United Coalbed Methane National Engineering Research Center Co., Ltd., Beijing 100089, China)

Abstract: In the process of mine exploration and production, energy consumption loads such as drilling rigs and ventilation are intertwined with building heating and hot water loads, and the mining area is rich in resources such as mine water waste heat and associated gas. Traditional energy scheduling methods are difficult to effectively deal with them. Therefore, an optimal scheduling model of mine integrated energy system (MIES) integrating photothermal power station and multi-source heat pump was proposed to improve energy efficiency and low-carbon level. The photothermal molten salt heat storage and multi-source heat pump group work together to build an electric-thermal collaborative supply network that adapts to the rhythm of mine production, and the multi-objective particle swarm optimization algorithm was introduced to optimize the economy and low carbon of the system. The results show that the weekly operating cost of the mine energy system is reduced to 331 700 yuan, the total carbon emission is 39.44 t, and the renewable energy consumption rate reaches 92.54%. The system effectively ensures stable heating in the mining area, with temperature fluctuations controlled within ±1.2 ℃. The utilization rate of the photothermal heat storage device reaches 92.17%, and the average coefficient of performance of the heat pump group rises to 4.47. The proposed model can fully integrate and utilize multi-energy sources in mining areas, effectively improving the economic and environmental benefits of the mine production system, and providing crucial technical support for the construction of green mines.

Key words: Mine integrated energy system, Photothermal coupling, Low carbon coordination, Multi-objective optimization

0 引言

在我国“双碳”战略和矿山绿色发展背景下，矿区能源系统面临负荷特性复杂、伴生能源利用不均衡及高能耗排放等多重挑战。矿山勘探与开采过程中，钻机和提升系统持续运行功率大，对电力和热能需求高且具有刚性；通风排水设备需全年稳定运行以保障井下安全，能耗随风压、排水量及井下环境变

* **收稿日期**：2025-08-29
基金项目：2024年度江苏省职业技术教育科学研究中心教育研究课题（JSZJKY202402058）
作者简介：刘志（1977—），男，江苏镇江人，硕士，副教授，主要研究方向为地学研究。E-mail：hdoy452@126.com

化而波动;选矿流程中的破碎、研磨、浮选等工序用能呈现阶段性峰值,对供能系统的负荷响应敏感;矿区生活及办公设施则具有昼夜及季节性波动特征,热负荷受地表与井下冷热环境差异影响显著[1-3]。尽管矿区伴生能源(矿井水余热、煤层气及回风热等)储量丰富,但多能协同调度不足,利用效率偏低。因此,如何实现矿山能源系统的高效利用、低碳化发展,以及如何整合多源能源,已成为矿山绿色转型的重要课题,具有重要的现实意义[4]。

综合能源系统(Integrated Energy System,IES)因其在多源协调、梯级利用和调度弹性方面的显著优势,正逐渐成为矿山能源系统升级的核心架构。国内外学者已对矿山综合能源系统(Integrated Energy System for Mines,MIES)的优化调度展开探索。费孝天等[5]为提升 MIES 中可再生与衍生能源的消纳能力,提出了一种基于非精确狄利克雷模型的分布式鲁棒优化调度方法,通过构建模糊集刻画能源不确定性并引入电转气装置,实现了矿山能源的高效利用。Wu 等[6]提出了一种考虑能源供应不确定性的 MIES 低碳经济运行策略,通过建立基于信息缺口决策理论的鲁棒建模方法,实现了 MIES 运行成本与碳排放的双重优化。吕超贤等[7]提出了一种产-需全链条耦合的 MIES 优化调度方法,通过构建多环节耦合模型,实现了矿山生产全流程的协同优化与低碳高效运行。骆钊等[8]为了促进矿山风电光伏消纳及煤矿能源低碳转型,提出了一种考虑伴生能源利用与碳捕集、电转气耦合的煤矿 IES 调度模型,通过引入阶梯式碳交易机制,有效提升了矿山系统的低碳经济运行水平。张勇等[9]提出了一种融合电热柔性负荷和碳交易机制的 MIES 经济运行优化模型,通过综合考虑煤层气、乏风和矿井涌水等矿山伴生能源,建立电/热柔性负荷模型,实现了系统的低碳性和经济性,提高了矿山伴生能源的利用效率。

另外,光热电站凭借其电热双输出与高温热储能力,在提升能源系统调峰能力与推动低碳转型方面展现出显著应用潜力。苏志军等[10]提出了一种基于容量加权建模与扩展等面积法则的分析方法,通过构建光热电站等值模型并评估其低惯量特性,实现了对光热并网导致系统暂态功角稳定性变化机理的定量揭示与验证。郑连华等[11]提出了一种融合光热电站与氢储能的优化调度策略,通过构建多储能联供模型并引入碳交易与碳税机制,实现了能量高效转换与运行成本、碳排放的协同优化。吴中孚等[12]为了提升光热电站参与下 IES 的运行灵活性与低碳经济性,提出了一种计及多能灵活性约束的多目标优化调度策略,通过构建多能灵活性约束与多场景两阶段多目标分布鲁棒优化模型,实现了 IES 经济性与碳排放的协同优化。Wang 等[13]提出了一种基于机会约束规划的光热电站装机容量优化分配方法,通过聚类分析实际运行场景,实现了装机容量的精准分配。

尽管现有研究为 MIES 的优化调度提供了有益探索,但在面向矿区特有场景时仍存在以下局限性:其一,多源能源耦合深度不足,光热、矿井余热与伴生气体之间的协同仍有待优化;其二,对光热电站与矿区低品位余热的互补潜力关注不足;其三,缺乏集成光热与多源热泵群的系统性方案,难以有效应对井下复杂热环境并保障供热稳定性。

针对上述不足与研究空白,基于矿山特有的能源负荷特性、伴生能源禀赋及环境条件差异,本研究提出了一种考虑光热耦合与多源热泵协同的矿山综合能源系统优化调度模型。通过构建光热能量转化与储热机制、多源热泵供热机制,并结合多目标粒子群优化算法(Multi-Objective Particle Swarm Optimization Algorithm,MOPSO),以期实现矿山能源系统经济性与低碳性协同优化。

研究的创新之处在于将光热储能技术与多源热泵系统有效结合,实现矿区能源负荷的时空调度与优化。研究不仅针对钻机、提升系统、通风排水及选矿工序等典型负荷特性进行了调度设计,还充分考虑矿区地表与井下冷热环境差异,为矿山能源系统高效、绿色运行提供系统性建模框架与工程应用参考。

1 考虑光热耦合的 MIES 优化调度模型设计

1.1 考虑光热耦合的 MIES 构建

MIES 旨在满足矿区勘探、开采及生活区多类型负荷需求,同时提高能源利用效率、降低碳排放并保障矿山生产安全。与传统工业综合能源系统相比,MIES 需要重点考虑矿山负荷特征:钻机瞬时大功率、提升机连续负荷、通风排水波动负荷及井下采暖生活热负荷[14]。此外,矿区环境条件复杂,地表与井下温度差异显著,矿山可再生能源利用潜力与储能需求呈现时空变化。为此,设计了一种面向矿

区的融合光热电站与多源热泵的 MIES 架构,具体结构如图 1 所示。

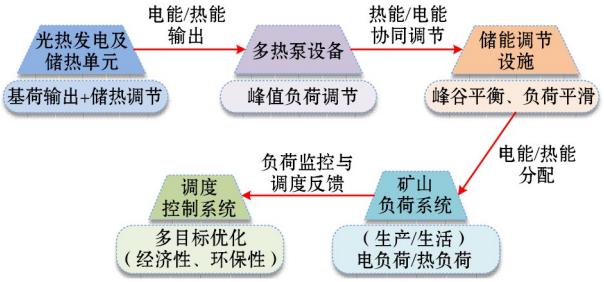


图 1 光热耦合 MIES 结构

Fig.1 Photoelectric coupling MIES structure

由图 1 可知,MIES 整体框架以光热发电及储热单元为核心,承担矿山基荷供能,同时通过储能装置实现峰谷平衡和负荷平滑。多热泵设备与储能系统协同运行,动态调节矿山生产的电、热负荷。调度控制平台实时监控各模块运行状态,依据多目标优化算法综合考虑经济性、碳排放与矿区安全,协调光热、热泵、储能与生产负荷的能源分配,实现矿山生产过程中的能源保障、低碳运行和运行成本最小化。其中负荷层涵盖了矿山勘探生产与生活保障的多类能源需求,其动态特性与时空分布如图 2 所示。

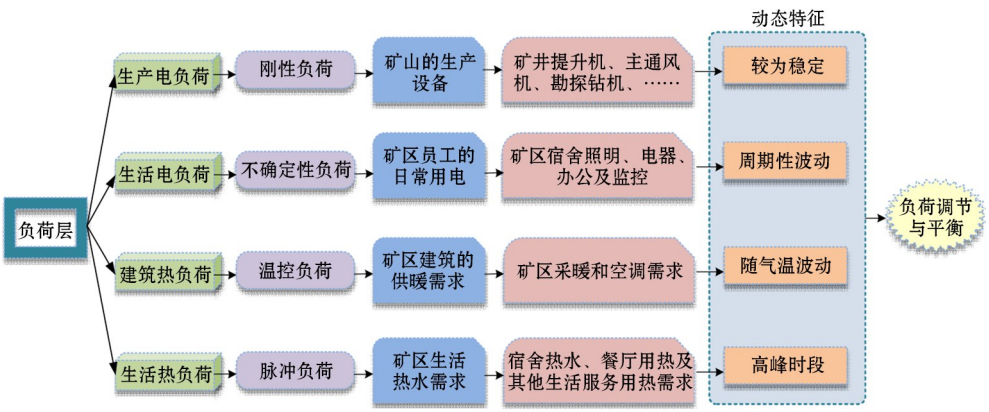


图 2 负荷系统结构

Fig.2 Load system structure

由图 2 可知,矿山负荷层主要包括生产电负荷、生活电负荷、建筑热负荷和生活热负荷四类需求。生产电负荷以钻机、通风设备等连续运行的高功率装置为主,具有全天不间断、高强度、刚性强的特征[15]。相比之下,矿山生活电负荷则表现出明显的时段波动性;建筑热负荷受室外气温变化影响较大,寒冷季节负荷增大,且需持续稳定供热以保障矿区工作环境和居住条件;生活热负荷通常呈现脉冲式峰值,对热源快速响应能力要求较高。整体来看,矿区负荷层呈现多类型、多时段、多温位的特性,这为 MIES 中光热储能释放调度、热泵多源切换策略及整体能量优化提供了重要依据。

1.2 核心设备数学模型构建

基于上述 MIES 总体框架,为实现系统中各类能源形式的高效协调与优化运行,需对关键设备进行精细建模。作为 MIES 电-热双输出的核心,光热电站的能量转化与储热机制对矿区能源转化效率、生产连续供能及生活用能的灵活调配具有重要影响。光热电站能量流去向如图 3 所示。

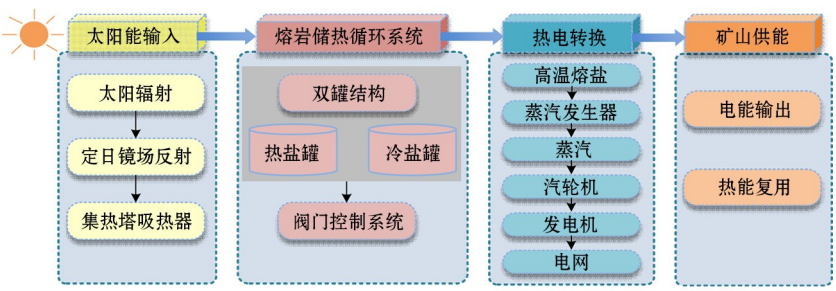


图 3 光热电站能量流去向

Fig.3 Energy flow in solar thermal power plant

由图 3 可知,光热电站作为 MIES 的核心枢纽,可实现太阳能向电、热双形态的高效转化。太阳辐射经定日镜场聚焦至集热塔,吸热器内熔盐温度升高,高温熔盐被注入热盐罐以实现集中储能。在释能环节,熔盐通过换热装置产生蒸汽驱动机组,为矿山生产系统和生活区提供所需电力与热能。熔盐储热系统通过双罐液位动态平衡实现能量时移,日间蓄热满足夜间矿区需求,有效保障矿山生产负荷的连续性和生活用能的稳定性。集热场功率模型见式(1)[16]。

$$P_{\mathrm{sol}}(t)=\eta_{\mathrm{opt}}\cdot DNI(t)\cdot A_{\mathrm{col}}\cdot I_{\mathrm{clean}} \tag{1}$$

式中:$P_{\mathrm{sol}}(t)$表示 t 时段矿山集热场输出热功率,MW,用于满足矿山综合负荷,包括生产电负荷和矿区热负荷;η_{opt}表示光学效率;$DNI(t)$表示法向直接辐射强度,W/sr;A_{col}表示矿山镜场采光面积,m^2;I_{clean}表示镜面清洁度系数。储热介质充放热模型见式(2)[17]。

$$E_t^{\mathrm{sto}}=E_{t-1}^{\mathrm{sto}}+\left(\eta_{\mathrm{ch}}P_t^{\mathrm{ch}}-\frac{P_t^{\mathrm{dis}}}{\eta_{\mathrm{dis}}}\right)\Delta t \tag{2}$$

式中:E_t^{sto} 表示 t 时刻矿区储热罐的储热量,MW·h;E_{t-1}^{sto}表示 $t-1$ 时刻矿区储热罐的储热量,MW·h;η_{ch}表示储充电效率;P_t^{ch} 表示 t 时刻光热场的输入热能,MW·h;P_t^{dis} 表示 t 时刻熔盐罐的输出热能,MW·h;Δt 表示调度时段长度;η_{dis}表示储热放电效率。同时,系统需进一步协调多类热源的高效提取与供热整合,以适应矿区多样化的热负荷需求。多源热泵协同供热模型结构如图 4 所示。

由图 4 可知,矿山热源分区明确划出三类矿山伴生能源:气源热泵、水源热泵与地源热泵。三者输入温度差异直接决定热泵性能系数(Coefficient of Performance,COP)的梯级分布。气源热泵利用环境空气热量作为热源,适用于常规供暖需求;水源热泵则通过回收矿井水中蕴含的中温余热提高热效率;而地源热泵依托深层地热资源可在严寒条件下稳定供热。中央控制器依据热源实时可用性与负荷需求动态切换热泵启停状态,形成高效响应的热源矩阵。为准确表达各类热泵的供热能力,模型引入热泵设备的数学模型,见式(3)[18]。

$$P_{\mathrm{heat},j}(t)=COP_j(t)\cdot P_{\mathrm{elec},j}(t) \tag{3}$$

式中:$P_{\mathrm{heat},j}(t)$为第 j 类热泵在 t 时刻的输出热功率,MW;$COP_j(t)$表示第 j 类热泵在 t 时刻的性能系数;$P_{\mathrm{elec},j}(t)$表示热泵 t 时刻的耗电量,W·h。

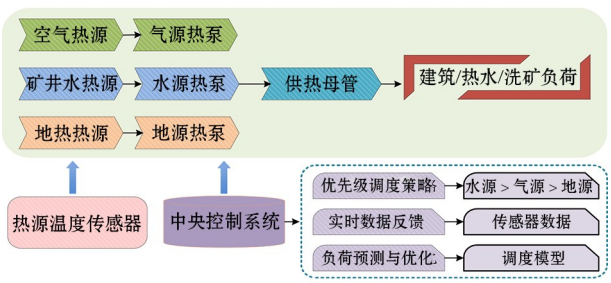


图 4 多源热泵协同供热模型结构

Fig.4 Multi source heat pump collaborative heating model structure

1.3 多目标调度优化模型构建及求解

在构建考虑光热耦合的 MIES 总体框架及关键设备物理模型后,为实现矿山生产与生活用能的高效保障,需要建立统一的调度优化模型。为此,提出了涵盖多源输入与多目标输出的 MIES 调度优化模型结构,如图 5 所示。

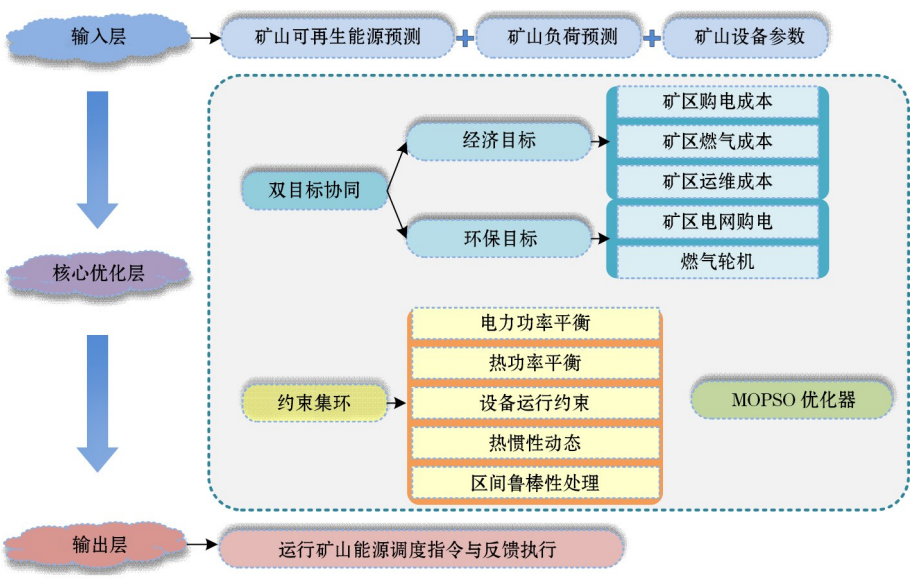


图 5 矿山能源多目标调度优化模型结构

Fig.5 Structure of multi-objective scheduling optimization model

由图 5 可知,该模型由输入层、核心优化层及输出层组成。输入层包括矿山生产与生活场景特征,包括生产电负荷、生活电负荷及建筑供暖、生活热水等热负荷。核心优化层以经济和环保双目标为核心:经济目标函数旨在最小化矿区购电、燃气及运维成本;环保目标函数约束电网购电及燃气轮机产生的碳排放总量,二者通过加权系数实现多目标折中优化。约束条件包括保证矿区生产与生活用能供需匹配的电力和热功率平衡方程、保障储热及电储设备安全运行的储能荷电状态限值约束、刻画井下及建筑室温滞后效应的热惯性动态约束,以及用于处理负荷预测偏差基于置信水平的区间鲁棒性处理。输出层生成热泵启停策略、储能充放电计划及辅助能源设备运行指令,并利用建筑室温反馈修正热负荷,实现"预测-优化-执行-校正"的闭环控制。经济目标函数见式(4)。

$$\min C_{\text{total}} = \sum_{T}^{t=1} (c_{\text{grid}}(t) \cdot P_{\text{grid}}(t) + c_{\text{gas}} \cdot V_{\text{gas}}(t) + c_{\text{gas}} \cdot V_{\text{gas}}(t) + c_{\text{om}} \cdot P_{\text{total}}(t) + c_{\text{open}} \cdot \Delta T(t)) \tag{4}$$

式中:$\min C_{\text{total}}$ 表示 MIES 最小系统总运行成本,元;T 表示调度周期总时段数;$c_{\text{grid}}(t)$ 表示 t 时刻的矿区购电电价,元/(kW·h);c_{gas} 表示天然气价格,元/m^3;c_{om} 表示综合运维系数;c_{open} 表示热舒适度偏差惩罚系数,元/(℃·h);$P_{\text{grid}}(t)$ 表示 t 时刻的矿山电负荷,kW·h;$V_{\text{gas}}(t)$ 表示 t 时刻的燃气轮机耗气量,m^3;$P_{\text{total}}(t)$ 表示 t 时刻的燃气系统总发电量,MW·h;$\Delta T(t)$ 表示 t 时刻的矿区建筑室温偏离舒适区累计值。环保目标函数见式(5)。

$$\min E_{\text{carbon}} = \sum_{T}^{t=1} (\mu_{\text{grid}} \cdot P_{\text{grid}}(t) + \varepsilon_{\text{gas}} \cdot V_{\text{gas}}(t)) \tag{5}$$

式中:$\min E_{\text{carbon}}$ 表示矿区最小碳排放总量;μ_{grid} 表示矿区电网碳排放因子,$kgCO_2$/(kW·h);ε_{gas} 表示矿区天然气碳排放系数。考虑到矿山负荷波动大、源荷不确定性高,传统单目标或确定性优化方法难以满足实际调度需求,本研究引入 MOPSO 算法,结合区间约束处理与多属性决策机制,提升矿区能源调度方案的鲁棒性与工程适应性。MOPSO 算法流程如图 6 所示。

由图 6 可知,MOPSO 算法首先初始化粒子群位置与参数,随后将矿山系统的源荷不确定性通过区间约束转化为确定性条件,并计算每个粒子对应调度方案的经济与环保双目标适应度值。在此基础上,算法更新粒子的个体历史最优解与种群的全局最优解,进而驱动粒子群进行速度与位置的迭代更新。在迭代过程中,非支配解被筛选并存入动态更新的 Pareto 档案集。此循环持续进行,直至满足预设的终止条件。最终,算法利用熵权法与优劣解距离法从 Pareto 前沿中选取综合性能最优的折中解,输出为矿区能源系统的最优调度方案。

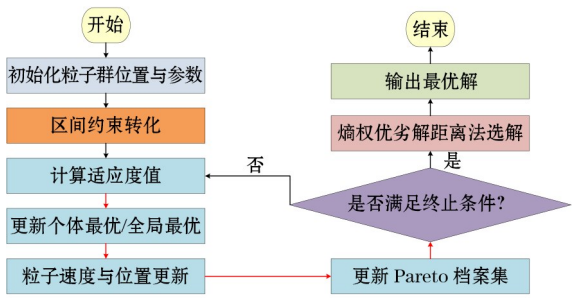


图 6 MOPSO 算法流程

Fig.6 MOPSO algorithm flowchart

2 考虑光热耦合的 MIES 优化调度模型验证

2.1 试验环境及 MOPSO 算法性能验证

研究在 Windows 10 操作系统下,基于 Python 语言与 Gurobi 求解器搭建仿真平台,采用 MOPSO 算法进行模型优化求解。试验负荷数据依据典型矿区场景构建,涵盖勘探钻机、提升系统、通风排水、选矿工艺及生活区用能的全年电热负荷曲线,并融合了矿区冬季室外温度、作业时段及生活热水需求特点构建,以保证模拟结果贴合实际矿山生产和生活条件。MIES 优化调度模型的基本运行参数见表 1。

表 1 MIES 优化调度模型参数设置

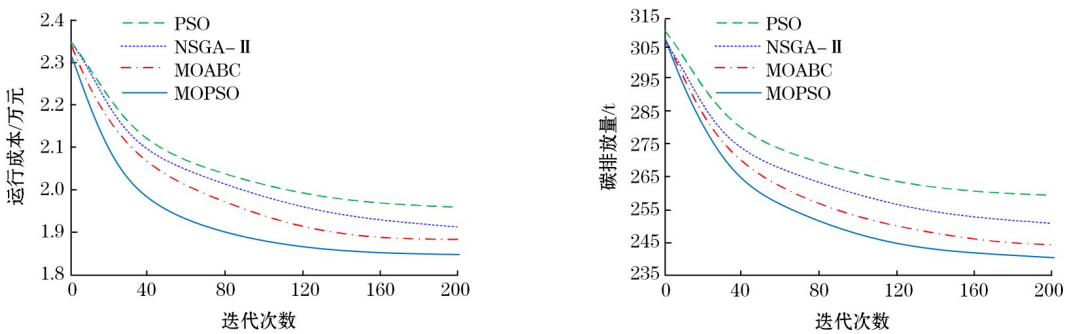
Table 1 MIES optimization scheduling model parameter settings

参数类别	参数名称	参数值
光热电站	装机容量/MW	50.00
	集热面积/m^2	320 000.00
	熔盐储热容量/(MW·h)	400.00
	热电转换效率	0.38
储能装置	电池额定容量/(kW·h)	2 000.00
	电池充电/放电效率	0.92/0.90
	储热罐热损失系数/(%/h)	0.15
经济参数	分时电价(峰/谷/平)/(元/(kW·h))	1.20/0.30/0.75
	天然气价格/(元/m^3)	3.20
	热舒适惩罚系数/(元/(℃·h))	100.00
环保参数	电网碳排放因子/($kgCO_2$/(kW·h))	0.65
	燃气碳排放因子/($kgCO_2$/(kW·h))	1.96

根据表 1 中的模型参数,首先对 MOPSO 算法在矿山能源调度中的性能进行了验证。引入未改进的粒子群优化算法(Particle Swarm Optimization, PSO)、非支配排序遗传算法Ⅱ(Non-dominated Sorting Genetic Algorithm Ⅱ,NSGA-Ⅱ)算法与多目标人工蜂群优化算法(Multi-Objective Artificial Bee Colony, MOABC)进行对比。

图 7 为 PSO、NSGA-Ⅱ、MOABC 与 MOPSO 四种算法在矿山能源调度问题中的收敛性能对比曲线,以运行成本与碳排放量为关键评价指标。如图 7(a)所示,在运行成本优化方面,MOPSO 算法展现出最快的收敛速度和最佳的寻优能力,其曲线始终处于最低位置,在第 200 次迭代时将系统周运行成本降至 1.85 万元,明显低于 PSO 算法与 NSGA-Ⅱ算法,表明其在矿山经济运行优化方面具有明显优势。结合图 7(b)碳排放量对比曲线,MOPSO 同样表现卓越,其碳排放曲线始终处于最低水平,迭代至 200 次时成功将碳排放量降至 239.81 t。总体而言,MOPSO 在矿区能源系统的经济与环保双目标调度中均优于其他算法,验证了其在矿山光热耦合能源系统多目标优化调度中的有效性。

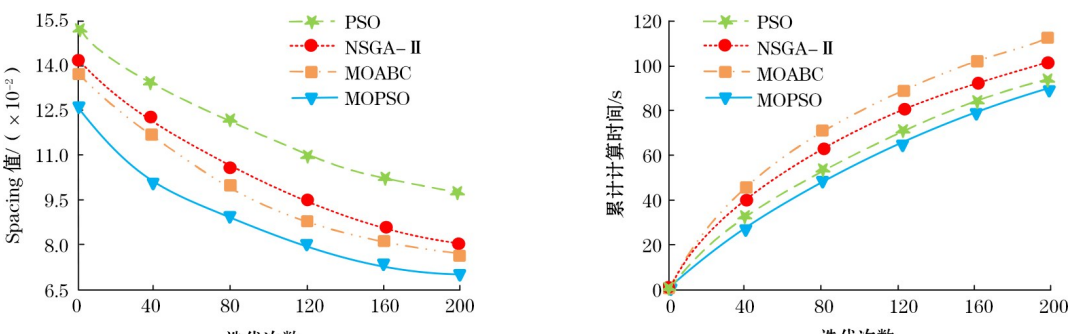
为进一步验证算法综合性能,对比了四种算法的解集分布均匀性指标(Spacing 值)与计算开销,结果如图 8 所示。



(a) 运行成本　　(b) 碳排放量

图 7　四种算法的迭代收敛效果对比

Fig.7　Comparison of iterative convergence effects of four algorithms



(a) Spacing 值　　(b) 累计计算时间

图 8　四种算法求解的分布均衡性与计算开销对比

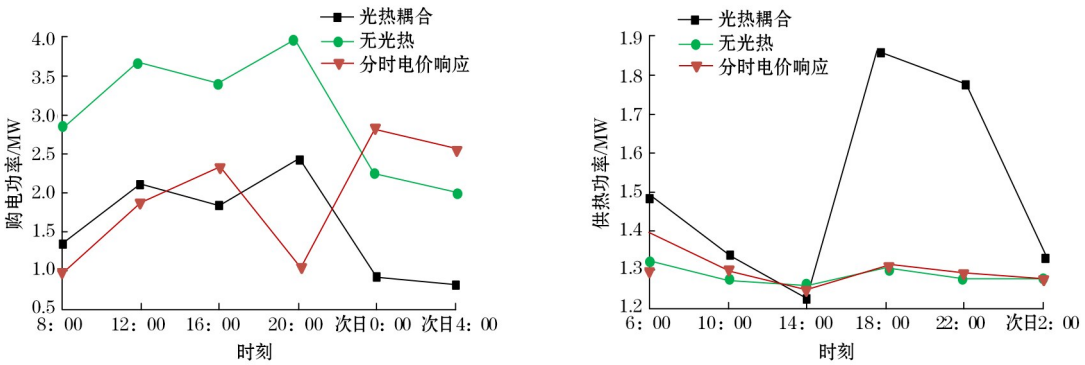
Fig.8　Comparison of distribution balance and computational cost solved by four algorithms

图 8(a)展示了 Spacing 值的变化趋势,该指标用于衡量 Pareto 最优解在目标空间中分布的均匀性,其值越小代表解集分布越均衡。由图 8(a)可知,随着迭代次数的增加,MOPSO 的 Spacing 值快速下降,200 次迭代时达到最低值 0.069 7,明显优于 NSGA-Ⅱ和 MOABC。这表明 MOPSO 在矿山调度中兼具良好的收敛性与解集分布均匀性,增强了解集的代表性和稳定性。结合图 8(b),MOPSO 在求解过程中展现出优异的计算效率,其累计计算时间曲线低于 MOABC 与 NSGA-Ⅱ,在 200 次迭代时总耗时仅为 95.23 s。MOPSO 在保证最优解质量与分布性的前提下,有效控制了计算资源消耗,得益于其粒子群中引入局部最优引导与快速收敛策略,提升了整体算法执行

效率。

2.2 MIES 优化调度模型应用效果模型验证

为进一步验证 MIES 优化调度模型的有效性，引入无光热电站的矿山调度策略和分时电价响应矿山调度策略，与提出的光热耦合方案进行对比，结果如图 9 所示。



(a) 矿区购电功率时序对比　　(b) 矿区供热功率时序对比

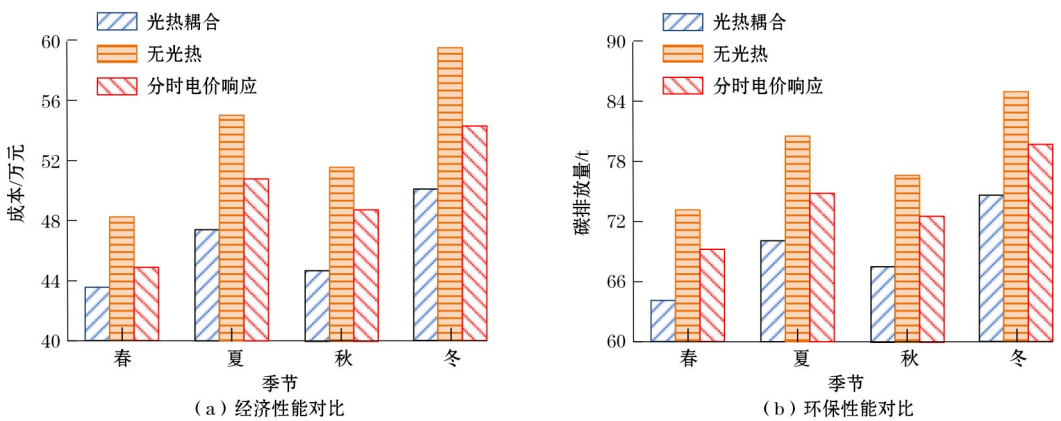
图 9　不同时段下矿区购电功率和供热功率对比

Fig.9　Comparison of purchasing power and heating power of the power grid at different time periods

图 9(a)反映了矿区从外部电网的购电需求。可以看出，在 8:00～20:00 的矿山高峰勘探与生产时段，光热耦合方案大幅降低了购电功率。12:00 时，矿山负荷对应的外部购电需求仅为 2.10 MW，相较于无光热方案削减 44.0%。这显著降低了因电网限电或价格波动导致生产中断的风险，从根本上保障了提升、排水、通风等关键生产设备的连续稳定运行；但在 20:00 时，其购电功率为 2.46 MW，高于分时电价响应方案的同期值，主要是因为分时电价响应方案依赖谷时充电而忽视了热力调峰。

图 9(b)揭示了系统的供热能力。在 18:00 时，采用光热耦合 MIES 优化调度模型的系统供热功率达到 1.85 MW，比无光热方案提升了 41.2%，保证了井下采暖和生活区热水供应的连续性与舒适性；至 22:00 时，系统仍维持着 1.79 MW 的高供热功率，而对比方案因缺乏跨时段热转移能力，其供热功率已降至 1.30 MW 以下。根本原因在于光热耦合通过熔盐储热实现了“太阳能-热能”时空迁移，打破了传统矿山能源调度中电热刚性耦合的瓶颈。

同时，研究对不同季节下三种矿山能源调度策略的经济性和环保性进行了对比，以成本和碳排放量为评价指标，结果如图 10 所示。



(a) 经济性能对比　　(b) 环保性能对比

图 10　不同季节下三种矿山能源调度策略的经济性和环保性能对比

Fig.10　Comparison of economic and environmental performance of three scheduling strategies in different seasons

由图 10(a)可以看出，光热耦合多热源优化调度模型在四个季节的总运行成本均显著低于其他两种策略。其中，春季为 43.56 万元，冬季为 50.56 万元。该方案通过光热电站的储热能力与多热源协同优化，实现了矿山勘探生产、建筑供暖及生活热水负荷的高效供能，有效降低了能源浪费和系统运行成本。

由图 10(b)可以看出，“光热耦合”策略在碳排

放量指标上同样表现最优,其碳排放量始终保持最低,春季为64.23 t,冬季为 74.52 t。这主要归功于光热电站的高效能量转化与储热机制,在保障矿山生产与生活能源需求的同时,大幅减少了化石能源消耗。相比之下,无光热电站的传统调度策略的碳排放最高,这是由于缺乏跨时段热能调配和伴生能源利用,其矿区能源效率较低。

总体来看,光热耦合多热源优化调度模型不仅在矿山系统运行成本上有明显优势,在减排方面也表现突出,充分体现了光热耦合在 MIES 中的重要性。最后,引入左明成等[19]提出的基于深度嵌入适应度评估分配策略的 MIES 多目标优化模型与曾贤强等[20]提出的计及多重不确定性及光热电站参与的区域综合能源调度模型进行对比,结果见表 2。

表 2 不同 MIES 优化调度模型综合性能对比

Table 2 Comparison of comprehensive performance of different mies optimization scheduling models

评价指标	总运行成本/万元	碳排放总量/t	可再生能源消纳率/%	供热温度波动范围/℃	热泵平均 *COP*	储热装置利用率/%	单位能耗成本/(元/(kW·h))	热舒适惩罚成本/万元	电网峰谷差率/%	生产负荷保障率/%	生活供热舒适度/%	矿山勘探生产连续性/%
光热耦合	33.17	39.44	92.54	±1.2	4.47	92.17	0.48	0.85	24.35	99.92	96.54	99.90
左明成等(2024)	41.95	56.21	79.18	±2.8	3.81	—	0.61	2.14	38.72	89.92	85.20	99.51
曾贤强等(2023)	37.84	48.93	85.23	±2.1	4.07	68.35	0.57	1.68	32.15	93.24	90.11	99.63

从表 2 可以看出,光热耦合矿山能源优化调度模型总运行成本最低,仅为 33.17 万元,说明光热与多热源协同机制极大地提升了矿山能源系统经济性。在碳排放控制方面,光热耦合模型碳排放总量为 39.44 t,较左明成等提出的 MIES 调度模型减少 16.77 t。同时,该系统的可再生能源消纳率达 92.54%,为三者最高,这得益于光热储热装置与多热泵联合运行策略的良性调节。在供热稳定性方面,矿区供热温度波动范围控制在±1.2 ℃,较其他模型更稳定,有效保障了矿区生产的用热需求及生活热区的舒适性。热泵系统的平均 *COP* 为 4.47,明显优于其他模型,反映了地源热泵等高性能热源设备在矿区负荷调度中的合理分配。系统的单位能耗成本为 0.48 元/(kW·h),处于三者最低水平,热舒适惩罚成本仅 0.85 万元,优于其他方案,表明该模型兼顾了经济性与矿区生活体验。负荷平抑能力由电网峰谷差率为 24.35%,表明因光热电站将日间过剩太阳能转移至夜间供热、供电,实现源荷时空匹配,整体展示出优异的矿山能源调度协调性与能源利用效率。此外,MIES 调度模型的生产负荷保障率和生活供热舒适度高达 99.90%和 96.54%,说明光热耦合方案不仅在经济性与环保性上具有优势,同时显著保障了矿山生产连续性和矿工生活舒适性。

3 结语

针对矿山能源系统中存在的能源结构刚性、热电解耦与可再生资源消纳困难等问题,构建了考虑光热耦合的矿山综合能源系统(MIES)调度模型。通过对光热电站、储热装置及多热源热泵群的协同运行进行多目标优化,提供了矿山生产连续性和生活供热舒适度的双重保障。同时引入 MOPSO 算法,实现矿区能源供应、碳排放与运行成本的联合优化。

试验显示,光热耦合方案总运行成本为 33.17 万元,碳排放为 39.44 t;对比其他 MIES 调度模型,单位能耗成本最低,为 0.48 元/(kW·h),热泵系统平均 *COP* 达 4.47,储热装置利用率高达 92.17%,在矿山生产连续性、生活供热舒适性及能源利用率等多项指标上表现优异。结果表明,所提出的模型可为矿山勘探与生产环节提供稳定可靠的能源保障,光热与热泵联合调度策略有效降低矿井通风、提升与采暖能耗,为矿区低碳转型及绿色矿山建设提供了可行路径。

然而,研究仍存在一些不足之处,例如在工程落地过程中尚未考虑设备故障率、数据实时更新机制与碳交易机制的动态影响。未来可结合数字孪生平台与实时监控系统,构建具有“感知-响应-优化”闭环能力的智能 MIES 管理系统,以进一步提升矿区调度的智能化水平与实际应用价值。

参考文献(References):

[1] 冯俊,党帅珂,任高峰,等.非煤矿山地下开采碳排放核算系统研究[J].矿业研究与开发,2025,45(2):226-234.
Feng Jun, Dang Shuaike, Ren Gaofeng, et al. Pesearch on carbon emission accounting system of non-coal mine underground mining[J]. Mining Research and Development, 2025,45(2):226-234.

[2] 王箫航,赵连荣,劳昕.资源型城市矿产-经济-矿山环境耦合协调发展研究[J].矿业研究与开发,2025,45(5):277-288.
Wang Xiaohang, Zhao Lianrong, Lao Xin. Coupling coordination development of mineral-economy-mine environment in resource-based cities[J]. Mining Research and Development,2025,45(5):277-288.

[3] 吕超,吕文玉,孙强,等."双碳"目标下煤矿地下空间响应式增强型储热充填系统理论与技术探索[J].煤炭科学技术,2025,53(4):104-113.
Lyu Chao, Lyu Wenyu, Sun Qiang, et al. Theoretical and technical concept of cemented backfill material for flexible enhanced thermal energy storage in coal underground space [J]. Coal Science and Technology,2025,53(4):104-113.

[4] 裴明松,刘林,代光俊,等."双碳"目标下考虑碳绩效的采矿方案优选[J].矿业研究与开发,2025,45(5):42-48.
Pei Mingsong, Liu Lin, Dai Guangjun, et al. Mining scheme optimization considering carbon performance under the "dual carbon" goals[J]. Mining Research and Development,2025,45(5):42-48.

[5] 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.

[6] Wu Xiaokang, Zhang Yong, Fei Xiaotian, et al. Low-carbon economic operation optimization of mine integrated energy system considering energy supply uncertainty[J]. Complex System Modeling and Simulation,2024,4(3):258-273.

[7] 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.

[8] 骆钊,罗蒙顺,沈鑫,等.基于碳捕集-电转气的矿区综合能源系统协同优化调度[J].电力系统自动化,2024,48(3):22-30.
Luo Zhao, Luo Mengshun, Shen Xin, et al. Collaborative optimal scheduling of coal mine integrated energy system based on carbon capture and power to gas[J]. Automation of Electric Power Systems,2024,48(3):22-30.

[9] 张勇,范斯达,高海荣,等.融合柔性负荷和碳交易机制的矿山综合能源系统运行优化[J].电力系统及其自动化学报,2023,35(4):148-158.
Zhang Yong, Fan Sida, Gao Hairong, et al. Operation optimization of coal mine integrated energy system integrating flexible load and carbon trading mechanism[J]. Proceedings of the CSU-EPSA,2023,35(4):148-158.

[10] 苏志军,夏世威,李庚银,等.考虑光热电站接入的电力系统暂态功角稳定性分析[J].高压电器,2025,61(5):228-236.
Su Zhijun, Xia Shiwei, Li Gengyin, et al. Transient power angle stability analysis of power system considering the access of concentrated solar power plant[J]. High Voltage Apparatus,2025,61(5):228-236.

[11] 郑连华,文中,邱智武,等.计及光热电站和氢储能的综合能源系统低碳优化运行[J].电测与仪表,2025,62(2):9-15+34.
Zheng Lianhua, Wen Zhong, Qiu Zhiwu, et al. Low-carbon optimized operation of integrated energy system considering solar thermal power plants and hydrogen storage [J]. Electrical Measurement & Instrumentation,2025,62(2):9-15+34.

[12] 吴中孚,邓丽君,覃智君.计及多能灵活性的含光热电站综合能源系统多目标分布鲁棒优化调度[J].电力建设,2024,45(12):39-53.
Wu Zhongfu, Deng Lijun, Qin Zhijun. Multi-objective distributionally robust optimal scheduling of integrated energy system with concentrated solar power plant considering multi-energy flexibility [J]. Electric Power Construction,2024,45(12):39-53.

[13] Wang Yan, Ma Zhicheng, Zhang Jinping, et al. Optimal configuration method for the installed capacity of the solar-thermal power stations[J]. Energy Engineering,2023,120(4):949-963.

[14] 杨莹,曹美萱,赵为光,等.煤层气和压缩空气储能复合的矿区综合能源系统优化运行模型[J].中国电机工程学报,2024,44(6):2257-2270.
Yang Ying, Cao Meixuan, Zhao Weiguang, et al. Optimal operation model of complex integrated energy system for mining areas with coalbed methane and compressed air energy storage[J]. Proceedings of the CSEE,2024,44(6):2257-2269.

[15] 付波,杨勇康,方文俊,等.考虑综合需求响应的含碳捕集与光热电站综合能源系统低碳经济调度[J].科学技术与工程,2024,24(33):14260-14269.
Fu Bo, Yang Yongkang, Fang Wenjun, et al. Low-carbon economic dispatch of integrated energy system with carbon capture and solar power station considering integrated demand response[J]. Science Technology and Engineering,2024,24(33):14260-14269.

[16] 曹娜,韩志鹏,于群.基于废弃矿井的综合能源系统容量优化配置[J].科学技术与工程,2024,24(32):13844-13854.

Cao Na, Han Zhipeng, Yu Qun. Optimal capacity allocation of integrated energy systems based on abandoned mines[J]. Science Technology and Engineering, 2024, 24(32): 13844-13854.

[17] Lu Ying, Fang Sidun, Niu Tao, et al. Optimal energy-logistics dispatch for seaport green vehicles: leveraging reversible solid oxide cell energy system for sustainable energy[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2025,61(3):4768-4780.

[18] 彭雄,鲍刚,李振华,等.考虑碳捕集与光热电站的综合能源系统优化调度[J].电力系统及其自动化学报,2024,36(8):79-91.
Peng Xiong, Bao Gang, Li Zhenhua, et al. Optimal scheduling of integrated energy system considering carbon capture and concentrating solar power station [J]. Proceedings of the CSU-EPSA,2024,36(8):79-91.

[19] 左明成,巩敦卫.深度嵌入适应度评估分配策略的约束多目标进化优化方法[J].中国科学:信息科学,2024,54(12):2811-2827.
Zuo Mingcheng, Gong Dunwei. Constrained multi-objective evolutionary optimization method with a deep-embedded fitness evaluation allocation strategy[J]. Scientia Sinica (Informationis),2024,54(12):2811-2827.

[20] 曾贤强,张警卫,王晓兰.计及多重不确定性及光热电站参与的区域综合能源系统配置与运行联合优化[J].高电压技术,2023,49(1):353-363.
Zeng Xianqiang, Zhang Jingwei, Wang Xiaolan. Optimal configuration of regional integrated energy system after taking into account multiple uncertainties and the participation of concentrating solar power stations[J]. High Voltage Engineering,2023,49(1):353-363.