面向“零碳矿山”目标的华晋焦煤沙曲矿区能源调度优化算法研究

付鹏程

（华晋焦煤有限责任公司沙曲一号煤矿，山西 吕梁 033000）

摘 要： 华晋焦煤沙曲矿区能源系统存在新能源输出波动较大、负荷峰谷差突出及能源利用效率不高等问题。为此，文章设计了一种面向“零碳矿山”建设目标的能源调度优化算法，并同步搭建覆盖光伏发电、储能系统、矿井生产负荷及外部电网的综合能源调度模型。以系统运行成本最低、碳排放最小及新能源消纳率最高为优化目标，构建多目标优化数学模型，采用改进粒子群（IPSO）算法求解。仿真数据显示，该算法可降低综合能耗、提升新能源利用率、减少碳排放，同时增强矿区供能稳定性，为“零碳矿山”能源管理提供技术参考。

关键词： 零碳矿山；能源调度；综合能源系统；IPSO；储能优化；智慧矿山

中图分类号： TD82 **文献标识码：** A

Research on energy dispatching optimization algorithm for Shaqu mining area of Huajin Coking Coal oriented to goal of “zero-carbon mine”

FU Pengcheng

（Shaqu No.1 Coal Mine, Huajin Coking Coal Co., Ltd., Lvliang, Shanxi 033000, China）

Abstract: The energy system of the Shaqu mining area of Huajin Coking Coal suffers from problems such as large fluctuations in renewable energy output, prominent peak-valley differences in load, and low energy utilization efficiency. To address these issues, this paper designs an energy dispatching optimization algorithm oriented to the construction goal of a “zero-carbon mine” and simultaneously builds a comprehensive energy dispatching model covering photovoltaic power generation, energy storage systems, mine production loads, and the external power grid. Taking minimum system operating cost, minimum carbon emissions, and maximum renewable energy accommodation rate as optimization objectives, a multi-objective optimization mathematical model is constructed and solved using an Improved Particle Swarm Optimization (IPSO) algorithm. Simulation data show that the algorithm can reduce comprehensive energy consumption, improve renewable energy utilization, reduce carbon emissions, and enhance the stability of energy supply in the mining area, providing a technical reference for “zero-carbon mine” energy management.

Key words: zero-carbon mine, energy dispatching, integrated energy system, IPSO, energy storage optimization, smart mine

1 引言

随着国家“双碳”战略持续推进，煤炭行业正加快向绿色低碳、安全高效方向转型，建设零碳矿山已成为智慧矿山发展的重要目标。华晋焦煤沙曲矿区生产负荷大、连续运行时间长、涉及能源种类多，用电波动也较为明显，光伏发电、储能系统等新能源设施逐步接入后，传统能源调度方式已难以满足新能源高效消纳与低碳运行的实际需求[1]。

智慧能源调度技术结合人工智能与智能优化算法，可实现矿区能源协同管理，但现有方法仍存在明显短板：调度模型适配性不强，多目标优化能力有限，算法易陷入局部最优。围绕上述问题，本文搭建矿区综合能源调度模型，构建同时考虑运行成本、碳排放与新能源消纳率的多目标优化函数，提出IPSO算法，并结合华晋焦煤沙曲矿区实际运行参数完成仿真验证，以提升能源利用效率和

调度智能化水平,为零碳矿山建设提供技术支撑。

2 沙曲矿区综合能源系统分析

华晋焦煤沙曲矿区已建成综合能源供应体系,该体系以电网供电为主体,光伏发电作为补充,储能电站承担协同调节功能,主要用能主体包含通风系统、主提升系统、排水系统、压风系统及选煤厂等生产类负荷。矿区能源流由外部电网与光伏电站两类主体共同输入,先经储能系统完成充放电调节,再按需输送至各类生产设备,最终形成“电网—光伏—储能—生产负荷”的能源流动路径,实现多能源协同供给。矿区全天负荷受生产班次影响较大:早班阶段,各生产系统陆续启动,负荷快速抬升;中班阶段,生产任务最为集中,通风、提升、运输及选煤等设备长期维持高负荷运行,负荷达到全天峰值;夜班阶段,部分生产设备转入低负荷运行状态,仅保留必要的通风、排水及安全保障系统,负荷明显下降。总体来看,矿区负荷呈现出清晰的峰谷特征[2]。

随着零碳矿山建设持续推进,矿区对新能源消纳能力、碳排放控制水平及能源利用效率提出了更高要求,需充分发挥储能系统削峰填谷和负荷调节的作用,提高光伏等新能源的消纳比例,降低高峰时段从电网购电的占比。此外,矿区可引入需求响应机制,优化高耗能设备的运行时序,实现能源供需的动态平衡,保障矿区绿色低碳、高效稳定运行。

3 综合能源多目标优化调度模型

为使华晋焦煤沙曲矿区能源系统达到经济、高效、低碳的运行状态,本文构建了同时覆盖运行成本、碳排放与新能源利用率3类指标的多目标优化模型。该模型的目标函数包含3个部分:(1)最小化系统运行成本,计算时需纳入电网购电成本、储能充放电运行成本及设备运行维护成本,即 $F_1=\sum(C_{\text{grid}}+C_{\text{battery}}+C_{\text{operation}})$;(2)最小化系统碳排放,其数值由各类能源消耗量和对应碳排放因子的乘积之和计算得出,即 $F_2=\sum E_i\times EF_i$;(3)最大化新能源利用率,相关指标通过光伏发电的消纳水平判定,即 $F_3=P_{\text{PV}}/P_{\text{Load}}$。选用加权法整合3个目标,形成综合优化目标,即 $\min F=\omega_1F_1+\omega_2F_2-\omega_3F_3$,并合理设置对应权重,以实现经济性与低碳性的协调优化[3]。

为使调度方案符合实际运行要求,需为模型设置多项约束条件 $P_{\text{grid}}+P_{\text{PV}}+P_{\text{battery}}=P_{\text{load}}$。其中,电力平衡约束用于保障各时段供需平衡;储能系统SOC上下限和充放电功率约束避免电池过充过放;光伏出力约束根据天气及光照条件限定实际发电功率;电网购电容量约束保证购电功率不超过供电能力;设置提升机、排水泵、压风机等关键设备的连续运行时间与启停约束,以保障矿区生产安全稳定及能源调度方案的可实施性[4]。

4 IPSO能源调度算法

4.1 基本粒子群优化算法

粒子群优化(PSO)属于群智能优化算法,其核心思想源于鸟群觅食行为,具有参数设置简单、收敛速度快、实现门槛低等优点,已在电力调度、路径规划、综合能源优化等场景中得到广泛应用。将该算法应用于矿区能源调度场景时,单个粒子对应一套完整的能源分配方案,粒子的位置参数分别对应不同时段的电网购电功率、光伏利用功率、储能充放电功率等决策变量,粒子的适应度值由综合目标函数计算得出。该算法启动后,首先随机生成初始粒子群,并同步记录单个粒子的历史最优位置与整个群体的最优位置,持续调整搜索方向,使粒子逐步向全局最优解靠拢。粒子的速度和位置参数均依据经典PSO算法的更新规则进行迭代计算:

$$v_i^{t+1}=wv_i^t+c_1r_1(p_i-x_i^t)+c_2r_2(g-x_i^t) \tag{1}$$

其中,w 代表惯性权重;c_1 与 c_2 分别对应个体学习因子和群体学习因子;r_1 与 r_2 是取值在0~1区间内的随机数;p_i 和 g 分别对应个体最优位置与全局最优位置。完成速度参数更新后,以新的速度值调整粒子的当前位置,重新计算适应度值,持续迭代直至满足终止条件,最终得到综合能源系统的最优调度方案。

4.2 IPSO算法设计

在处理复杂约束优化问题时,传统PSO算法普遍存在收敛速度放缓、后期搜索能力不足、易陷入局部最优等缺陷。为此,本文设计了一种IPSO算法。算法运行初期,引入混沌初始化策略,优化粒子在解空间内的分布均匀性,增强全局搜索能力;迭代过程中,将动态惯性权重和自适应学习因子结合使用,使算法在前期维持足够的全局搜索能力,在后期提升局部寻优精度;引入精英保留策略,每轮迭代产生的优质粒子可直接进入下一代种群,防止最优解受随机扰动影响而丢失。动态惯性权重的调整公式如下:

$$w=w_{\max}-\frac{k}{k_{\max}}(w_{\max}-w_{\min}) \tag{2}$$

其中,k 为当前迭代次数;$k_{\max}$ 为最大迭代次数;$w_{\max}$ 和 $w_{\min}$ 分别表示惯性权重上下限。

4.3 能源调度算法流程

本文算法整体求解遵循“初始化—优化搜索—结果输出”的固定流程。运算启动后,首先结合矿区实际运行数据搭建综合能源调度模型,录入光伏发电预测数据、储能系统参数、生产负荷曲线及电价等基础信息,并同步完成粒子编码与相关参数的初始化设置。其次,逐个计算所有粒子的适应度值,结合个体最优和全局最优两类信息调整粒子的速度与位置,并同步核验运行状态是否符合各项约束条件。每完成一轮迭代,即对所有粒子的适应度进行排序,留存精英粒子后继续推进种群更新,直至达到最大迭代次数或目标函数的变化幅度满足

收敛要求。粒子位置更新可表示为：

$$x_i^{t+1}=x_i^t+v_i^{t+1} \tag{3}$$

其中，x_i^t代表第t次迭代过程中粒子的位置；v_i^{t+1}代表粒子更新后的运行速度。运算过程中将重复执行模型建立、适应度计算、速度更新、位置更新和收敛判断等环节，迭代结束后输出的最优能源调度方案可满足运行成本最低、碳排放最少与新能源利用率最高的要求，为矿区生产提供实时高效的能源配置决策依据。

5　实验设计与参数设置

依托MATLAB平台开展仿真实验，以检验本文算法在华晋焦煤沙曲矿区综合能源系统中的优化效果。实验选用搭载Intel i7处理器的计算机作为硬件支撑，软件版本为MATLAB R2024a，整套算法均采用MATLAB语言编写。为使优化过程保持稳定，实验设置粒子群规模为80，最大迭代次数为300次，并重复开展多组实验，以分析算法的收敛性能、验证调度效果。

实验所用数据来自沙曲矿区典型日的运行记录，采样间隔设为15 min，最终整理得到96个时段的有效数据，涵盖矿区全天生产负荷曲线、光伏发电出力、储能系统运行状态、电网分时电价和能源碳排放因子等参数。这批经过筛选的有效数据可直观还原矿区不同生产班次对应的能源供需变动规律，为能源调度优化奠定数据基础。设置算法相关参数时，需同时参考矿区实际运行需求与算法自身特性：惯性权重采用动态调整逻辑，数值由0.9逐步降至0.4；学习因子设为2，以平衡粒子的个体经验和群体搜索能力；储能系统的SOC运行范围设为20%~90%，以防止过充过放缩短设备使用寿命；储能容量设定为5 MW·h。

6　实验结果分析

6.1　收敛性能分析

本文选取传统PSO算法与IPSO算法进行对比实验。随着迭代次数持续增加，三者的优化目标值均逐步下降，但不同算法的收敛速度和稳定性表现存在较大差异。传统PSO算法初期下降快，但后期易局部收敛；IPSO算法引入动态惯性权重、混沌初始化与精英保留策略，前期搜索和后期局部优化能力均增强，目标函数下降更快。综上，IPSO算法收敛更快、稳定性更好。

6.2　能源调度结果分析

为验证改进PSO算法生成的能源调度方案的合理性，本文分析了矿区典型日内光伏发电、储能系统、电网供电与生产负荷的协同运行关系。结果显示，经过优化的能源系统可结合不同时段的能源供需变动情况，自动切换各能源单元的运行模式。白天光照充足时，光伏优先满足生产负荷，余电存入储能；夜间或光伏不足时，储能放电补充电能，降低电网依赖；生产高峰阶段，算法统筹电网购电、储能放电和新能源利用，保障供能平稳。

6.3　能耗优化效果对比

为进一步验证IPSO算法的实际效果，本文选取传统调度方法、传统PSO算法与IPSO开展对比测试。传统调度方式运行成本最高，为52.8万元；应用IPSO算法后，运行成本降至44.2万元，减少约16.3%。IPSO算法的新能源利用率达88.6%，高于传统调度方式的61.4%；碳排放量降至318 t，较传统方案减少约27.4%；计算时长为11.8 s，短于传统PSO算法。结果表明，IPSO算法在降低运行成本、提升新能源消纳和减少碳排放方面均更优。

6.4　削峰填谷效果分析

矿区生产过程中，系统负荷随生产周期波动较大。为验证优化调度对负荷曲线的改善效果，本文针对两类场景的负荷变动情况进行多维度横向对比，结果表明经IPSO算法优化后，矿区全天负荷曲线走势更加平稳，高峰峰值下降，低谷负荷抬升，削峰填谷效果明显。在生产负荷偏高时段，系统优先调配储能放电和新能源入网供能，降低电网瞬时供电压力；在夜间低负荷阶段，系统利用富余电能为储能设备补电，提升整体能源利用效率。优化后的负荷曲线波动区间收窄，峰谷差有所降低，可提升矿区供配电系统的运行稳定性，并减少负荷突变给设备带来的额外运行压力。

7　结束语

本文构建了涵盖电网、光伏、储能及生产负荷的综合能源调度模型，实现了运行成本、碳排放水平与新能源利用率3类指标的协同优化。结合前期模型构建成果，本文提出IPSO算法，引入动态惯性权重、自适应学习因子及精英保留机制、提升算法的搜索能力和收敛效率，从而更快、更精准地输出能源调度优化方案。实验数据表明，该算法可降低矿区能源运行成本，提升光伏等新能源的消纳水平，借助储能调节实现削峰填谷，并降低碳排放水平，为零碳矿山能源管理提供了可行路径。

参考文献：

[1] 任浩栋.基于伴生能源利用的矿区综合能源系统建模与运行优化[D].徐州：中国矿业大学，2021.

[2] 梁凯泽.考虑不确定性的煤矿多能源站协同优化运行研究[D].徐州：中国矿业大学，2024.

[3] 王龙飞，张涛.矿井运输中无轨胶轮车调度优化的智能化方案研究[J].山东煤炭科技，2025，43(5)：97-101+107.

[4] 徐睿.考虑充换电选择的煤炭物流园区电动卡车车队规模与调度优化研究[D].济南：山东大学，2025.

作者简介：

付鹏程(1987—)，本科，助理工程师，研究方向：井工煤矿绿色低碳发展。