

# 计及碳约束下的煤矿综合能源系统 多目标配置双层优化

黄宏旭<sup>1,2</sup>, 梁睿<sup>1,2</sup>, 张小彤<sup>1,2</sup>, 陆梦恬<sup>3</sup>, 王琛<sup>1,2</sup>, 张鸽<sup>1,2</sup>

- (1. 中国矿业大学 电气与动力工程学院, 江苏省 徐州市 221116;
2. 江苏省煤矿电气与自动化工程实验室(中国矿业大学), 江苏省 徐州市 221116;
3. 国网常州供电公司, 江苏省 常州市 213003)

## Two-stage Multi-objective Deployment Optimization of Coal Mine Integrated Energy System Considering Carbon Emission Constraints

HUANG Hongxu<sup>1,2</sup>, LIANG Rui<sup>1,2</sup>, ZHANG Xiaotong<sup>1,2</sup>, LU Mengtian<sup>3</sup>, WANG Chen<sup>1,2</sup>, ZHANG Ge<sup>1,2</sup>

- (1. School of Electrical and Power Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, Jiangsu Province, China; 2. Jiangsu Laboratory of Coal Mine Electrical and Automation Engineering (China University of Mining and Technology), Xuzhou 221116, Jiangsu Province, China;
3. State Grid Changzhou Power Supply Company, Changzhou 213003, Jiangsu Province, China)

**ABSTRACT:** With the urgent demand for the energy revolution and decarbonization of coal mine energy consumption under China's "2030-60 dual carbon targets", the multi-objective two-stage coal mine integrated energy system model is proposed for the deployment-operation optimization considering the coal mine production scenarios, equipment characteristics, and the utilization of the associated energy resources such as coal gangue, methane and VAM. In the intra-day operational stage, the factors like energy conversion, equipment start-shutdown are constrained to minimize the economic cost of system operation based on the day-ahead forecasted data; In the deployment stage, the carbon emission and economic benefits are optimized based on the daily operational cost and the capacity constraints of the resource and equipment. The multi-population collaboration NSGA-II algorithm is proposed for the two-stage rolling optimization under the double-level optimization framework to generate the Pareto solution set for the multi-objective configuration scheme of the integrated coal mine energy system. A real coal mine in the city of Taiyuan, Shanxi Province, China, is modeled as an example, and the on-site production data are used for arithmetic analysis to verify the effectiveness of the proposed model and method. The impact associated energy utilization on

the energy saving and emission reduction of the coal mine integrated energy system is analyzed.

**KEY WORDS:** carbon emission peak and carbon neutrality; coal mine integrated energy system; utilization of associated energy resources; two-stage optimization

**摘要:** 在我国“30·60”双碳目标下, 实现煤矿用能低碳化成为我国能源革命的迫切需求。根据煤矿生产场景, 利用煤矸石、瓦斯、乏风等衍生资源, 抽象出衍生资源利用设备特性, 建立煤矿综合能源系统配置-运行多目标双层优化模型。在日内运行阶段基于日前预测数据, 考虑能量转换、设备启停等物理约束, 最小化系统运行经济成本; 在配置规划阶段基于日运行成本, 考虑资源、设备容量约束, 进行碳排放与经济效益的多目标优化配置。提出多种群协作的NSGA-II算法, 在双层优化框架下进行两阶段滚动优化, 生成煤矿综合能源系统的多目标配置方案 Pareto 解集。以我国山西省太原市的某真实煤矿为例建模, 采用现场生产数据进行算例分析, 验证了所提模型和方法的有效性, 并分析了各类衍生能源利用对于煤矿综合能源系统节能减排的影响。

**关键词:** 碳达峰、碳中和; 煤矿综合能源; 衍生能源利用; 双层优化

**DOI:** 10.13335/j.1000-3673.pst.2021.1288

## 0 引言

2020年9月, 习近平总书记在第75届联合国大会上提出, 中国二氧化碳排放力争2030年前达到峰值, 2060年前实现碳中和<sup>[1]</sup>, 简称“30·60”双碳目标。十四五规划纲要中指出, 推进能源革

**基金项目:** 国家自然科学基金重点项目(62133015); 国家自然科学基金面上项目(52077215); 江苏省“六大人才高峰”项目(XNY-046); 江苏省科研与实践创新计划项目(KYCX21\_2230)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(NSFC) (62133015, 52077215); “Six Talent Peaks” of Jiangsu Province (XNY-046); Scientific Research and Practice Innovation Project of Jiangsu Province (KYCX21\_2230).

命,完善能源产供储销体系,建设智慧能源系统,提升新能源消纳和存储能力<sup>[2]</sup>,是践行“30·60”双碳目标的重要体现。煤炭作为我国重要的一次能源,2020年度其消费量在能源总消费量中占比56.8%<sup>[3]</sup>,仍是我国目前消费量最多的能源主体。而在煤矿的能源系统中,粗放的能源利用、管理方式导致大量冗余的二氧化碳排放至大气中,严重阻碍了“碳达峰、碳中和”目标的实现。因此,如何建设智慧化的煤矿能源系统,对能源设备进行合理的优化配置,推动新能源与传统化石能源的综合利用,是助力实现“30·60”双碳目标的有效途径。

在煤炭资源的开采过程中,往往伴随着乏风、矿井涌水、低浓度瓦斯等衍生的废弃资源产生。这些衍生能源蕴含着大量可以回收利用的能量,具有巨大的脱碳潜力。如果煤矿中的衍生能源没有得到有效利用,不仅造成资源浪费,也会对周围环境形成污染,需要进行额外的环境治理。

目前已有许多学者对煤矿衍生能源的回收利用进行研究。针对煤矿排出的乏风中存在大量低浓度瓦斯的情况,文献[4]研究的瓦斯富集涡流塔能够有效富集乏风中的低浓度瓦斯,逐级富集后可以达到工业利用的瓦斯体积分数。文献[5]指出,煤矿中的煤层气可用于使用包括燃气轮机、内燃机、锅炉或蒸汽轮机等设备进行发电或制热。文献[6]采用水源热泵,利用地下煤矿的涌水为周边地区的建筑物热负荷供给可再生的热能。文献[7]考虑矿区不确定性因素,利用多种衍生能源能量回收进行日内运行优化调度以降低煤矿综合能源系统运行成本。

煤矿衍生能源的利用涉及电/热/冷3种不同能源类型,且矿区的生产、生活需要多种大量能源。因此,建设煤矿综合能源系统(coal mine integrated energy system, CMIES)能够最大限度满足用户多类能源需求,在有效保护化石能源和自然环境的同时,提升综合能源利用效能<sup>[8]</sup>。然而,衍生能源设备配置需要在年度时间尺度下,根据矿区资源禀赋特征、日内调度策略、对系统的设备选型、容量配置、运行策略等进行优化计算,从而获得系统经济、环保等多个目标最优解集。目前国内外学者已对综合能源系统优化配置进行了一定研究。文献[9]针对含电、热、气并相互耦合的分布式多能流综合能源系统的设备容量匹配优化问题,建立了以系统各能量成本最低为目标,以能量平衡和设备工作特性为约束的优化模型,并采用一种区域收缩算法加速寻优收敛速度。文献[10]为了处理来自可再生能源、电负荷、室外温度和住宅热水负荷的不确定性,使

用多层随机优化方法,将非线性的设备配置模型转换为混合整数线性规划模型进行求解。文献[11]针对热网的延时和储热等动态特性,建立了一种热能运输准动态模型,并在此基础上提出一种考虑热能运输动态特性的电-热综合能源系统优化调度方法,实现了对热网虚拟储能的调度利用。

针对综合能源系统配置-运行的多层优化框架下的多目标优化配置,文献[12]针对含电能交互的多微网综合能源系统,考虑经济性和烟效率的多目标优化配置,实现了系统经济运行和能源高效利用。文献[13]针对区域综合能源系统在可靠性约束下获得经济性最优时,容易产生过度投资或可靠性不足的问题,提出规划与运行相结合的双层多目标优化配置模型,实现了多目标优化方案的可选择性。文献[14]针对热电联供型微网系统的容量配置问题,提出了一种基于改进雷达图模型的多目标优化配置方法,并通过优化执行过程求解得到综合性能最优的微网系统容量配置结果。文献[15]旨在建立一个冷、热、电、储联合系统的多目标规划运行模型,提出了多目标优化灰狼算法,从解集中选择最优 Pareto 的模型,获得了更优的结果,提升了计算速度。然而,上述方法在一般性综合能源系统的多目标优化配置-运行问题进行了分析与研究,但现有模型与方法无法直接应用与煤矿生产用能及含衍生能源利用的综合能源配置优化问题。

为了提出面向“30·60”双碳目标下的煤矿综合能源系统多目标配置优化方案,处理煤矿能源系统日内运行调度与年度设备配置在时间尺度上的耦合情况,本文提出煤矿综合能源系统配置-运行多目标双层优化模型及多种群协作的非支配排序遗传算法(non-dominated sorting genetic algorithm II, NSGA-II),在双层优化框架下进行规划-日内调度的两阶段滚动优化,生成煤矿综合能源系统的多目标配置方案 Pareto 解集。以某真实煤矿为例,验证所提模型和方法的有效性,并分析了各类衍生能源利用对于煤矿综合能源系统节能减排的影响。

## 1 利用衍生能源的煤矿综合能源系统框架

煤矿综合能源系统与传统区域能源系统相比,具有以下特点:1)我国中西部矿区风、光等新能源发电资源禀赋充足,直接供给矿区生产、生活负荷能够促进可再生能源的就地消纳。2)矿井生产过程中伴随产生大量低温涌水、乏风和井下瓦斯等衍生能源,经综合利用不仅减少能源浪费,也能够明显改善周边自然环境。3)矿山综合能源系统在

产生一次能源和衍生能源的同时，也需在保障煤矿生产安全的前提下满足不同类型负荷的刚性需求。

考虑衍生能源利用的矿区综合能源系统架构如图1所示。煤矿综合能源系统由外部供能系统、可再生能源系统、不同类型能源的负荷及衍生能源综合利用设备构成，其中包括水源热泵、煤矸石发电单元、

燃气轮机、乏风氧化发电单元、电制冷机、余热锅炉、储热罐、吸收式制冷机和燃气锅炉；多余的热量可以通过储热装置存储，进行灵活调度；煤矿负荷主要包括了煤矿生产负荷以及生活办公负荷；外部供能模块主要考虑需要向外部购买的能源，其中电能来源于电网，热能则通过购买天然气通过燃气锅炉供能。

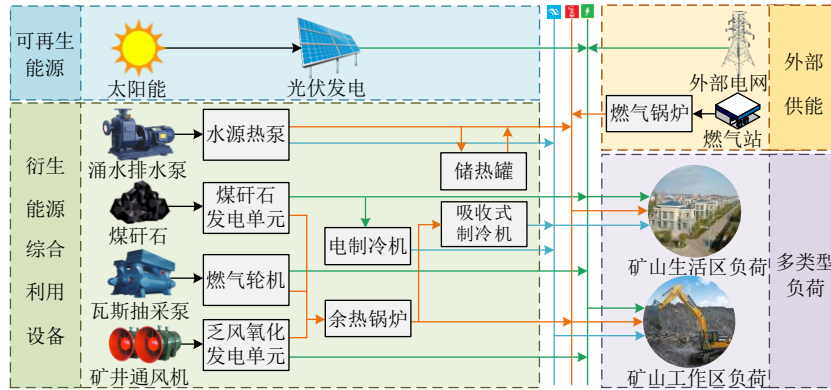


图1 考虑衍生能源利用的矿区综合能源系统架构

Fig. 1 System structure of coal mine integrated energy system with associated energy utilization

煤矿综合能源系统等效为一个多输入、多输出的能量转换系统，等价表示为

$$\begin{bmatrix} P_L \\ H_L \\ C_L \end{bmatrix} = CP \quad (1)$$

式中： $P_L$ 、 $H_L$ 、 $C_L$ 为煤矿的电力、热能、制冷负荷； $P$ 为可再生能源、外部供能以及衍生能源供给的一次能源向量； $C$ 为能量耦合矩阵，表征负荷与矿区一次能源向量的耦合关系，其元素 $c_{ij}$ 由不同设备效率与工作状态切换变量决定，表示为

$$c_{ij} = \sum_{j=1}^{N_j} (\mu_{i,j} \eta_{i,j}) \quad (2)$$

式中： $i$ 为煤矿负荷类型； $j$ 为一次能源类型； $\mu_{i,j}$ 为不同类型负荷的供能分配比例； $\eta_{i,j}$ 为一次能源设备能量转换效率； $N_j$ 为 $j$ 能源设备的机组数量。

## 2 煤矿综合能源系统多目标配置双层优化模型

煤矿综合能源系统的设备配置规划决定运行调度策略中的决策变量，而系统运行的碳排放与经济成本也会影响设备配置规划决策。二者互相耦合，需要建立双层优化模型求解<sup>[16]</sup>。本文在计及煤矿衍生能源利用的基础上，考虑系统碳排放与运行成本，将煤矿综合能源系统设备配置与运行调度构建为多目标双层优化模型。

### 2.1 系统运行优化模型

#### 1) 煤矸石发电单元。

煤矸石的产生量、堆存量和占地面积的数学模

型<sup>[17]</sup>分别为

$$M'_{Gan} = M'_{Coal}(1 - a_{Coal})\gamma_{Gan} + M'_{Coal}a_{Coal}\delta_{Gan} \quad (3)$$

$$M'_{Gan} = M'_{Gan} + M'_{Gan} - M'_{Gu} \quad (4)$$

$$S'_{Gan} = M'_{Gan}\tau_{Gan} \quad (5)$$

式中： $M'_{Gan}$ 为 $t$ 时刻煤矸石总产量； $M'_{Coal}$ 为 $t$ 时刻原煤产量； $a_{Coal}$ 为煤炭入选率； $\gamma_{Gan}$ 为采矸排矸率； $\delta_{Gan}$ 为洗矸排矸率； $M'_{Gan}$ 为 $t$ 时刻煤矸石堆存量； $M'_{Gu}$ 为 $t$ 时刻的煤矸石综合利用量； $S'_{Gan}$ 为 $t$ 时刻煤矸石占地面积； $\tau_{Gan}$ 为煤矸石占地系数。

煤矸石电厂采用循环流化床锅炉(circulating fluidized bed boiler, CFB)回收煤矸石中蕴含的热能，通过进一步配置烟气环保控制措施，促进矸石清洁利用<sup>[18]</sup>。CFB配合汽轮机组数学模型为

$$P'_{CFB} = \frac{M'_{Gu}\rho_{Gan}\eta_{CFB}(1 - \eta_{CFB}^{pc})}{\Delta T} \quad (6)$$

式中： $P'_{CFB}$ 为 $t$ 时刻煤矸石发电功率； $\rho_{Gan}$ 为煤矸石的热值； $\eta_{CFB}$ 为CFB发电效率； $\eta_{CFB}^{pc}$ 为煤矸石发电模块自耗电率； $\Delta T$ 为单位时长。

#### 2) 乏风氧化发电单元。

乏风作为一种衍生资源，如果不加以利用而直接排空不仅造成资源浪费，同时也会产生温室效应，污染环境<sup>[19]</sup>。在CMIES中，利用热流转反应器(thermal flow-reversal reactor, TFRR)配合汽轮机组构成乏风氧化发电模块，其发电功率为

$$P'_{TFRR} = v'_{vam}\rho_{CH_4}\delta'_{vam}\eta_{TFRR}(1 - \eta_V^{pc}) \quad (7)$$

式中： $P'_{TFRR}$ 为 $t$ 时刻乏风发电模块的输出功率； $\rho_{CH_4}$ 为甲烷热值； $v'_{vam}$ 为 $t$ 时刻的乏风流量； $\delta'_{vam}$

为  $t$  时刻乏风中甲烷浓度； $\eta_{\text{TFRR}}$  为乏风发电模块的效率； $\eta_{\text{V}}^{\text{pc}}$  是乏风发电模块自耗电率。

### 3) 瓦斯发电模块。

针对煤矿中的高浓度瓦斯，选用燃气轮机作为发电设备，其具有调节速度快、安装便捷、清洁低碳等优势。燃气轮机发电的数学模型为

$$P_{\text{GT}}^t = v_{\text{Gas}}^t \delta_{\text{Gas}}^t \rho_{\text{CH}_4} \eta_{\text{GT}} (1 - \eta_{\text{GT}}^{\text{pc}}) \quad (8)$$

式中： $P_{\text{GT}}^t$  为  $t$  时刻燃气轮机发电功率； $\eta_{\text{GT}}$  为燃气轮机发电效率； $v_{\text{Gas}}^t$  为  $t$  时刻燃气锅炉消耗的煤矿瓦斯流量； $\delta_{\text{Gas}}^t$  为  $t$  时刻煤矿瓦斯中的甲烷体积分数； $\eta_{\text{GT}}^{\text{pc}}$  为瓦斯发电模块自耗电率。

### 4) 矿井涌水供热/冷模块。

采煤过程中，大量的矿井涌水未经处理而直接向外排放，对周边的生态环境造成严重破坏<sup>[20]</sup>。矿井涌水温度常年稳定在  $15^\circ\text{C}$  左右，是水源热泵非常理想的冷热源，通过水源热泵供冷/热可以避免传统化石能源的消耗，达到减排效果。水源热泵的制热和制冷功率分别如式(9)和式(10)所示。

$$H_{\text{WSHP}}^t = C_{\text{OP}_{\text{WSHP}}^{\text{H}}} P_{\text{WSHP}}^t \quad (9)$$

$$C_{\text{WSHP}}^t = C_{\text{OP}_{\text{WSHP}}^{\text{C}}} P_{\text{WSHP}}^t \quad (10)$$

式中： $C_{\text{OP}_{\text{WSHP}}^{\text{H}}}$ 、 $C_{\text{OP}_{\text{WSHP}}^{\text{C}}}$  分别为水源热泵制热和制冷的能效系数； $H_{\text{WSHP}}^t$ 、 $C_{\text{WSHP}}^t$  分别为  $t$  时刻水源热泵制热和制冷功率； $P_{\text{WSHP}}^t$  为  $t$  时刻水源热泵耗电功率。

### 5) 余热锅炉。

余热锅炉可以利用煤矿瓦斯、煤矸石以及乏风发电产生大量的余热，把水加热到一定温度进行热能的供给从而实现余热利用<sup>[21]</sup>。无补燃型余热锅炉的数学模型如式(11)所示。

$$H_{\text{WHB}}^t = C_{\text{OP}_{\text{WHB}}^{\text{H}}} H_{\text{WHB}}^{t, \text{in}} \quad (11)$$

式中： $H_{\text{WHB}}^t$  为  $t$  时刻余热锅炉供热功率； $C_{\text{OP}_{\text{WHB}}^{\text{H}}}$  为无补燃型余热锅炉的制热能效系数； $H_{\text{WHB}}^{t, \text{in}}$  为输入余热锅炉的热功率。

### 6) 储热罐。

储热罐通常配置在热负荷附近，能够保证热功率平衡，减少管道传输损耗，其约束<sup>[22]</sup>为

$$\begin{cases} E_{\text{TST}}^t = (1 - \sigma_{\text{TST}}^{\text{loss}}) E_{\text{TST}}^{t-1} + (P_{\text{TST}}^t \eta_{\text{TST}}^{\text{ch}} - \frac{P_{\text{TST}}^t \text{dis}}{\eta_{\text{TST}}^{\text{dis}}}) \Delta T \\ 0 \leq P_{\text{TST}}^t \text{ch} \leq S_{\text{TST}}^t \text{ch} \times P_{\text{TST}}^{\text{max, ch}} \\ 0 \leq P_{\text{TST}}^t \text{dis} \leq S_{\text{TST}}^t \text{dis} \times P_{\text{TST}}^{\text{max, dis}} \\ S_{\text{TST}}^t \text{ch} + S_{\text{TST}}^t \text{dis} \leq 1 \\ E_{\text{TST}}^{\text{min}} \leq E_{\text{TST}}^t \leq E_{\text{TST}}^{\text{max}} \\ E_{\text{TST}}^0 = E_{\text{TST}}^{24} \end{cases} \quad (12)$$

式中： $E_{\text{TST}}^t$  为  $t$  时段储热罐的储热量； $\sigma_{\text{TST}}^{\text{loss}}$  为储热罐热损失率； $P_{\text{TST}}^t \text{ch}$ 、 $P_{\text{TST}}^t \text{dis}$  为  $t$  时刻储热罐储热和放热功率； $\eta_{\text{TST}}^{\text{ch}}$ 、 $\eta_{\text{TST}}^{\text{dis}}$  分别为储热罐储热和放热效率； $S_{\text{TST}}^t \text{ch}$ 、 $S_{\text{TST}}^t \text{dis}$  为储热罐充放热的状态变量； $P_{\text{TST}}^{\text{max, ch}}$ 、 $P_{\text{TST}}^{\text{max, dis}}$  分别为储热装置输入和输出的热功率的上限； $E_{\text{TST}}^{\text{max}}$ 、 $E_{\text{TST}}^{\text{min}}$  分别为储热装置的储热容量上下限。特别地，式(12)约束了每天 0:00 和 24:00 的储热量相同，保证日内调度中储热罐调度的可持续性。

### 7) 制冷机组。

制冷机组由吸收式制冷机和电制冷机组组成。吸收式制冷机通过回收燃气轮机及等设备产生的高温余热为冷负荷供能，其制冷功率为

$$C_{\text{AC}}^t = C_{\text{OP}_{\text{AC}}^{\text{C}}} H_{\text{AC}}^{t, \text{in}} \quad (13)$$

式中： $C_{\text{AC}}^t$  为  $t$  时刻吸收式制冷机输出的热功率； $C_{\text{OP}_{\text{AC}}^{\text{C}}}$  为吸收式制冷机的能效系数； $H_{\text{AC}}^{t, \text{in}}$  为  $t$  时刻输入吸收式制冷机的余热功率。

电制冷机的数学模型为

$$C_{\text{EC}}^t = C_{\text{OP}_{\text{EC}}^{\text{C}}} P_{\text{EC}}^t \quad (14)$$

式中： $P_{\text{EC}}^t$  为  $t$  时刻电制冷机的制冷功率； $C_{\text{OP}_{\text{EC}}^{\text{C}}}$  为电制冷机的能效系数； $P_{\text{EC}}^t$  为  $t$  时刻电制冷机的耗电功率。

### 8) 燃气锅炉。

燃气锅炉通过向外部购买的天然气，其中的数学公式为

$$H_{\text{GB}}^t = \eta_{\text{GB}} \rho_{\text{CH}_4} V_{\text{Gas}}^t \quad (15)$$

式中： $H_{\text{GB}}^t$  为  $t$  时刻燃气锅炉的热功率； $\eta_{\text{GB}}$  为燃气锅炉的热效率； $V_{\text{Gas}}^t$  为  $t$  时刻天然气的消耗量( $\text{m}^3/\text{t}$ )。

### 9) 功率平衡约束。

为了保证煤矿综合能源系统长期安全可靠地运行，需要时刻满足煤矿综合能源系统中电、热、冷各类负荷的需求以及系统运行约束，式(1)表示运行时功率平衡约束，除此之外也需满足机组运行时长约束，具体为

$$T_k^{\text{min}} \leq T_k \leq T_k^{\text{max}} \quad (16)$$

式中： $T_k$  为第  $k$  种设备日运行时长； $T_k^{\text{max}}$ 、 $T_k^{\text{min}}$  分别为第  $k$  种设备日运行时长上下限。

### 10) 设备运行上下限/爬坡约束。

煤矿综合能源系统中的设备需要满足运行上下限/爬坡约束<sup>[23]</sup>，即

$$\begin{cases} S_{\text{Eq}}^t \times P_{\text{Eq}}^{\text{min, m}} \leq P_{\text{Eq}}^{t, \text{m}} \leq S_{\text{Eq}}^t \times P_{\text{Eq}}^{\text{max, m}} \\ S_{\text{WSHP}}^t \text{H} + S_{\text{WSHP}}^t \text{C} \leq 1 \\ P_{\text{Eq}}^{\text{down, n}} \leq P_{\text{Eq}}^{t, \text{n}} - P_{\text{Eq}}^{t-1, \text{n}} \leq P_{\text{Eq}}^{\text{up, n}} \end{cases} \quad (17)$$

式中： $S_{Eq}^{t,m}$ 、 $P_{Eq}^{\max,m}$ 、 $P_{Eq}^{\min,m}$ 分别为设备的启停状态与电、热、冷功率的上下限，这些设备包括CFB、TFRR、燃气轮机(gas turbine, GT)、水源热泵(water source heat pump, WSHP)、余热锅炉(waste heat boiler, WHB)、吸收式制冷机(absorption chiller, AC)、燃气锅炉(gas boiler, GB)；特别地，水源热泵必须工作在处于单一供热/冷模式中；而 $P_{Eq}^{t,n}$ 为设备在 $t$ 时刻的电、热、冷功率， $P_{Eq}^{\text{up},n}$ 、 $P_{Eq}^{\text{down},n}$ 为设备电、热、冷功率的爬坡上下限约束，这些设备包括CFB、TFRR和GT。

### 2.2 运行阶段目标函数

煤矿综合能源系统运行优化模型以经济性最优为目标，即

$$\begin{cases} \min C_r^d \\ C_r^d = C_{PP}^d + C_{GP}^d + C_E^d + C_M^d \end{cases} \quad (18)$$

式中 $C_r^d$ 、 $C_{PP}^d$ 、 $C_{GP}^d$ 、 $C_E^d$ 、 $C_M^d$ 分别为煤矿综合能源系统日总运行、购电、购气、环境、维护成本。

1) 系统购电成本。

$$C_{PP}^d = \sum_{t=1}^T P_{PP}^t p_e^t \Delta t \quad (19)$$

式中： $P_{PP}^t$ 为 $t$ 时刻需要购买的电功率； $p_e^t$ 为 $t$ 时刻的电价。

2) 系统购气成本。

$$C_{GP}^d = \sum_{t=1}^T \frac{P_{GB}^t \Delta t p_{CH_4}}{\eta_{GB} \rho_{CH_4}} \quad (20)$$

式中 $p_{CH_4}$ 为天然气的单位价格。

3) 系统环境治理成本。

环境治理成本主要来源2个部分：一部分来自各个机组生产的环境污染治理成本；另一部分为购电所产生等效碳排放当量的环境成本。具体计算公式为

$$C_E^d = \sum_{k=1}^{K_{type}} \sum_{t=1}^T \sum_{n=1}^N \mu_k^n P_k^t (\delta_{AC,k}^n + \delta_{AP,k}^n) + \sum_{t=1}^T P_{PP}^t c_{CO_2} (\delta_{AC}^{CO_2} + \delta_{AP}^{CO_2}) \quad (21)$$

式中： $\mu_k^n$ 为第 $k$ 种设备第 $n$ 种污染气体排放系数； $P_k^t$ 为第 $k$ 种设备的输出功率； $\delta_{AC,k}^n$ 、 $\delta_{AP,k}^n$ 分别为第 $k$ 种设备产生第 $n$ 种污染气体的环境损失成本和罚款成本系数； $c_{CO_2}$ 为电网 $CO_2$ 排放因子； $K_{type}$ 为设备种类； $\delta_{AC}^{CO_2}$ 、 $\delta_{AP}^{CO_2}$ 分别为 $CO_2$ 的环境损失成本和罚款成本系数。

4) 系统运行维护及启停成本。

$$C_M^d = \sum_{k=1}^{K_{type}} \sum_{t=1}^T P_k^t \alpha_k + \sum_{k=1}^{K_{type}} \sum_{t=1}^T \delta_k^t \rho_k \quad (22)$$

式中： $\alpha_k$ 为第 $k$ 种设备的单位可变运行成本系数； $\delta_k^t$ 为第 $k$ 种设备在 $t$ 时刻的启停状态； $\rho_k$ 为第 $k$ 种设备的启停成本。

### 2.3 系统配置优化模型

考虑到煤矿衍生能源资源禀赋和煤矿安全生产和用能需求，衍生能源利用设备容量应保持在一定范围之内；其次，由于煤矿周围可用于布置光伏发电装置的土地资源的限制，可再生能源发电装置的容量也应该在一定范围内。设备容量/数量约束为

$$S_{PV}^{\min} \leq S_{PV}^y \leq S_{PV}^{\max} \quad (23)$$

$$x_k^{\min} \leq x_k^y \leq x_k^{\max} \quad (24)$$

式中： $S_{PV}^y$ 为第 $y$ 年光伏发电的容量； $S_{PV}^{\max}$ 、 $S_{PV}^{\min}$ 分别为光伏容量的上下限； $x_k^y$ 为第 $y$ 年衍生能源利用设备 $k$ 的数量； $x_k^{\max}$ 、 $x_k^{\min}$ 分别代表设备 $k$ 可配置台数的上下限约束。

### 2.4 配置阶段目标函数

1) 经济性成本。

配置阶段的经济性成本为设备年度投资成本与年度运行成本之和，即

$$C_{total}^y = C_{inv}^y + C_r^y \quad (25)$$

式中： $C_{total}^y$ 为CMIES年度经济性成本； $C_{inv}^y$ 为CMIES投资成本； $C_r^y$ 为煤矿综合能源系统年运行成本，等于该年度由式(25)计算出的日运行成本之和。CMIES年度投资成本的数学模型如式(26)所示。

$$C_{inv}^y = \sum_{k=1}^{K_{type}} r_k C_k P_k N_k \quad (26)$$

式中： $k$ 代表煤矿综合能源系统中第 $k$ 种设备； $r_k$ 为CMIES中第 $k$ 种设备的投资回收系数； $C_k$ 为煤矿综合能源系统中第 $k$ 种设备单位功率的投资成本； $P_k$ 为第 $k$ 种设备的额定功率； $N_k$ 为第 $k$ 种设备配置的数量。

$$r_k = \frac{\sigma_k (1 + \sigma_k)^{n_k}}{(1 + \sigma_k)^{n_k} - 1} \quad (27)$$

式中： $\sigma_k$ 为CMIES中第 $k$ 种设备的折现率； $n_k$ 为第 $k$ 种设备寿命。

2) 碳排放当量。

CMIES中的碳排放当量包括两部分：一部分为直接排空瓦斯、乏风中的甲烷碳排放当量；另一部分为系统运行中产生的二氧化碳排放当量。总碳排放当量为

$$M_{total}^C = M_A^C + M_O^C \quad (28)$$

$$M_A^C = \sum_{t=1}^T [v_{Gas}^A \delta_{Gas}^t + v_{Vam}^A \delta_{Vam}^t] \rho_g \rho_{CH_4} \quad (29)$$

$$M_O^C = \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^{K_{type}} \left( \sum_{p=1}^P P_{k,t} \mu_k^p + P_{PP,t} c_{CO_2} \right) \quad (30)$$

式中： $M_{total}^C$  为 CMIES 年度碳排放当量； $M_A^C$  为瓦斯、乏风排空甲烷碳排放当量； $M_O^C$  为系统运行碳排放当量； $v_{Gas}^A$ 、 $v_{Vam}^A$  分别为  $t$  时刻排空的瓦斯和乏风流量； $\rho_g$  为甲烷密度； $\partial_{CH_4}$  为甲烷碳排系数； $\mu_k^p$  为第  $k$  种设备产生的第  $p$  种温室气体排放系数。

煤矿综合能源系统优化模型具有较多的等式约束及不等式约束。本文选取应用较广泛的约束转化法<sup>[24]</sup>将问题转化为无约束多目标优化问题。通过将等式约束条件的不满足程度转化为目标函数  $P(x)$ ，在得到 Pareto 前沿后以  $f(3)=0$  为准则，筛选出满足供能要求的最终解。进而将等式约束的优化问题转化为不等式约束的多目标优化问题。

$$\begin{cases} P_i(x) = \max\{0, |e_i(x)| - \varepsilon\} \\ P(x) = \sum_i P_i(x) \end{cases} \quad (31)$$

式中  $\varepsilon$  是一个允许范围内的正容差值，将等式约束转化为目标函数  $P(x)$ 。约束处理后的煤矿综合能源多目标配置优化模型为

$$\begin{cases} \min f(x) = (f_1(x), f_2(x), f_3(x)) \\ \text{s.t.} \begin{cases} f_1(x) = C_{total}^y \\ f_2(x) = M_{total}^C \\ f_3(x) = P(x) \\ p_i(x) \leq 0 \end{cases} \end{cases} \quad (32)$$

式中： $f_1(x)$ 、 $f_2(x)$  为配置阶段的经济成本与碳排放当量目标函数；原模型中的等式约束通过式(31)转化为目标函数  $f_3(x)$ ； $p_i(x) \leq 0$  表示原模型中的每个不等式约束。处理后的煤矿综合能源多目标配置优化问题转化为不等式约束的多目标优化问题。

### 3 多目标配置双层优化框架

由于设备配置和系统运行优化的时间周期不同，需要在不同时间尺度上解决年度配置参数与日内运行成本耦合带来的影响<sup>[25]</sup>，本文基于 CMIES 多目标配置优化模型，建立如图 2 所示的多目标配置优化框架。

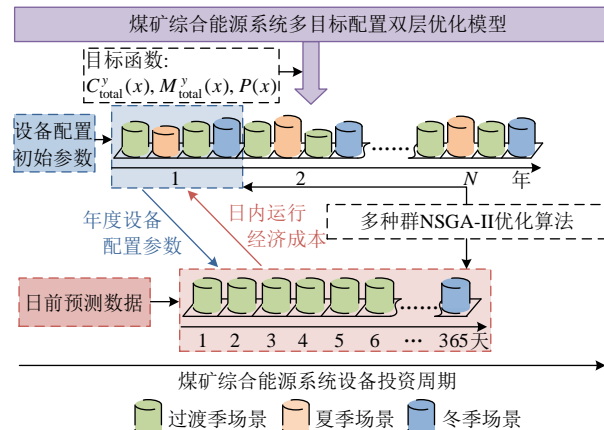


图 2 多目标配置双层优化框架  
Fig. 2 Framework of two-stage multi-objective configuration optimization

置双层优化框架。

第一阶段为年度设备配置决策阶段，在年时间尺度下以碳排放当量、经济成本最优为目标，求解 CMIES 的多目标设备配置优化问题；第二阶段为日内运行决策阶段，在日时间尺度下以运行经济性最优为目标，生成日内优化运行策略。配置阶段决策结果中的设施配置结果作为日内阶段决策输入参数，而日内阶段结果累计的年度经济成本则作为配置阶段输入参数，2 个阶段的决策循环迭代，在上层配置优化的中实现下层运行优化，上层的配置方案根据下层运行优化的结果重新优化，二者以设备投资周期为整体时间尺度循环往复，进行多目标配置双层优化，直至最优。

### 4 多目标配置双层优化算法

本文提出一种改进的多种群协作 NSGA-II 算法，用以改善单一种群 NSGA-II 算法易于陷入局部最优的问题<sup>[26]</sup>。根据迭代次数、种群规模、种群变异遗传因子产生多个种群，在每一个种群的迭代过程中共享群体最优解集，最后当满足迭代条件时输出群体最优解集。算法流程图见图 3。

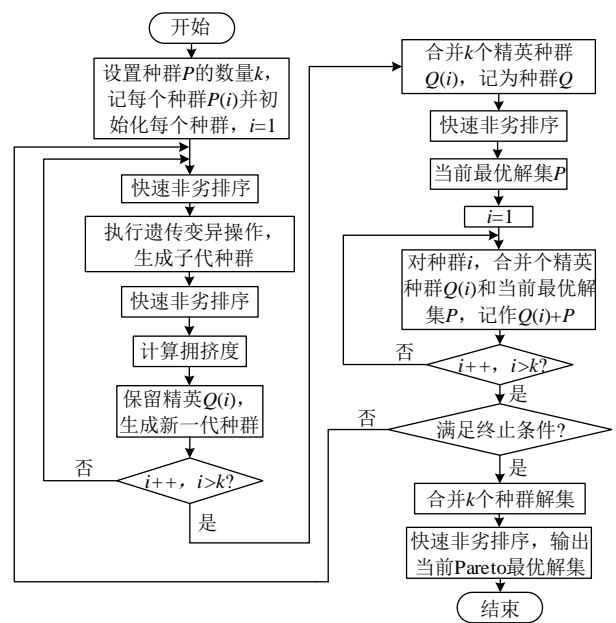


图 3 改进的多种群协作 NSGA-II 算法流程图  
Fig. 3 Algorithm flow chart of NSGA-II with multi-population collaboration

多种群协作的 NSGA-II 算法具体步骤为：

- 1) 产生  $k$  个种群，并初始化每个种群，记每个种群为  $P_i$ ，并令  $i=1$ 。
- 2) 对种群  $P_i$  进行非劣排序。
- 3) 对种群  $P_i$  进行遗传变异操作，产生新的子代种群。
- 4) 保留精英种群记  $Q_i$ ，生成新一代种群。

- 5)  $i+1$ , 并判断  $i$  是否大于  $k$ , 若不满足条件, 则跳转步骤 2), 若满足条件, 则跳转步骤 6)。
- 6) 合并  $k$  个精英种群, 记为种群  $Q$ 。
- 7) 对种群  $Q$  进行非劣排序, 得到当前最优解集  $Q$ 。
- 8) 令  $i=1$ 。
- 9) 对第  $i$  个种群, 合并精英种群  $Q_i$  和当前最优解集  $P$ , 记为  $Q_i+P$ 。
- 10)  $i+1$ , 并判断  $i$  是否大于  $k$ , 若不满足跳转步骤 9), 若满足条件跳转步骤 11)。
- 11) 判断是否满足终止条件, 若不满足, 跳转到步骤 2), 若满足终止条件, 跳转到步骤 12)。
- 12) 合并  $k$  个种群, 记为  $P^*$ 。
- 13) 对种群  $P^*$  进行非劣排序, 输出当前 Pareto 最优解集。

### 5 算例分析

本文以山西省太原市某真实煤矿为案例, 对所提模型与方法在 MATLAB\_R2018a 软件中进行算例仿真, 仿真平台处理器为 Intel Core i7-9700, 操作系统为 64 位 Windows 10。

1) 煤矿综合能源系统运行配置双层优化。

根据矿区气象数据以及用能需求, 将全年划分为冬季典型日、夏季典型日和过度季典型日。表 1 和表 2 分别为各典型日和分时电价情况。

表 1 典型日分类结果			
Table 1 Classification of typical days			
典型日	分布月份	持续时间/天	分布月份
冬季	1—3、10—12	140	1—3、10—12
夏季	5—8	120	5—8
过渡季	4、9	45	4、9

表 2 分时电价		
Table 2 Time of use tariff		
类型	电价/(元/(kW·h))	时段划分
峰时	0.7695	08:00—11:00 18:00—23:00
平时	0.5295	07:00—08:00 11:00—18:00
谷时	0.3058	23:00—07:00

基于 3 种典型日场景进行 CMIES 运行优化分析, 光伏发电出力如图 4 所示, 3 种场景下各类能

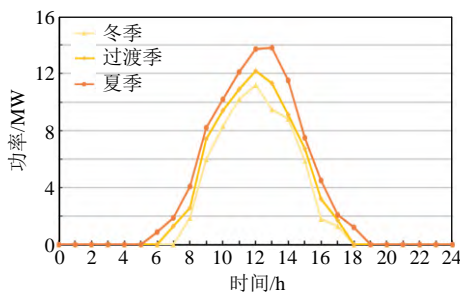


图 4 3 种典型场景下光伏出力日前预测值  
Fig. 4 Day ahead prediction of photovoltaic output under three typical scenarios

源需求量如图 5—7 所示。

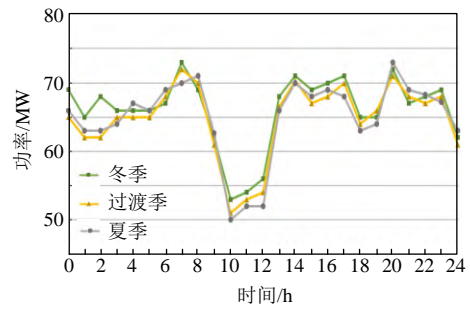


图 5 3 种典型场景下电负荷日前预测  
Fig. 5 Day ahead prediction of electrical loads under three typical scenarios

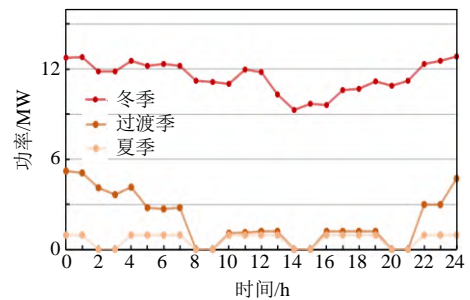


图 6 3 种典型场景下热负荷日前预测  
Fig. 6 Day ahead prediction of heat loads under three typical scenarios

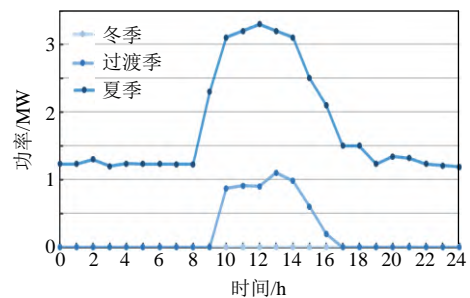


图 7 3 种典型场景下冷负荷日前预测  
Fig. 7 Day ahead prediction of cooling loads under three typical scenarios

①CMIES 运行调度优化。

以典型冬季场景为例, CMIES 电力、热能的调度结果分别如图 8、9 所示。

如图 8 所示, 由于受峰谷电价的影响, 在 08:00—12:00 时段煤矿电能需求相对降低, 此阶段

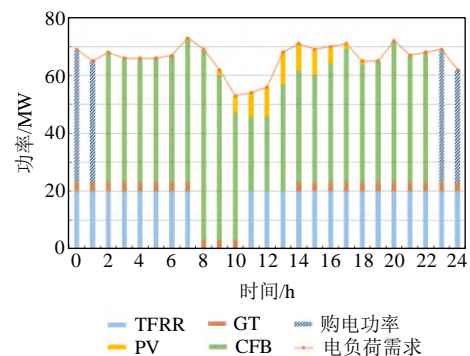


图 8 冬季典型场景下电负荷日前调度结果  
Fig. 8 Daily electricity dispatching result in winter

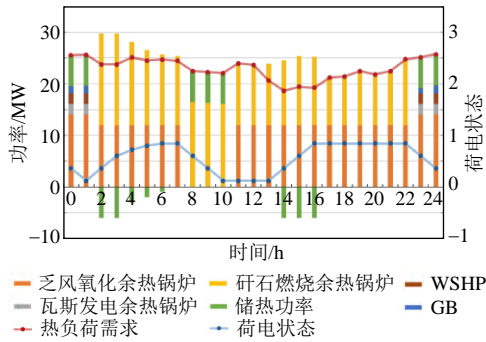


图9 冬季典型场景下热负荷日前调度结果

Fig. 9 Daily thermal energy dispatching result in winter

光伏发电模块开始输出电能并得到了百分百的消纳，CMIES 衍生能源利用单元中，由于瓦斯发电单元运行和环境成本最低，乏风氧化发电次之，煤矽石发电单元相对最高，因此除了各机组受运行时长约束导致的停运，其他时段优先消纳瓦斯发电出力以及乏风氧化发电出力，电能供应缺额处由煤矽石发电单元以及向电网购电补足，受到购电价格影响，煤矽石发电机组在 23:00—07:00 停运。

由图 9 可知，由于模型考虑机组运行成本因素，冬季煤矿综合能源系统的热能需求主要由煤矽石发电单元产生的余热以及乏风氧化发电单元产生的余热来满足，不仅降低制热成本，也提高了系统的能源利用率，当煤矽石发电单元或乏风氧化发电单元因运行时长限制处于停运阶段产生的热功率缺额则由燃气锅炉、储热罐、水源热泵以及瓦斯发电单元产生的余热进行补足。

3 个典型日运行成本如表 3 所示，可以看到冬季的运行成本最高，过渡季和夏季的运行成本较为接近，冬季高于过渡季和夏季的成本主要来自于购气费用。过渡季和夏季均未产生购气成本。可以看出，这是由于这 2 个场景的热负荷较少，系统衍生能源利用能够满足系统的热需求，有效降低碳排放与系统运行经济成本。

表 3 3 个典型日系统运行成本  
Table 3 System operating costs of three typical days

典型日	购电成本/元	购气成本/元	环境成本/元	维护成本/元	总成本/元
冬季	52903.4	1119.73	43797.7	270156.3	367977.1
过渡季	50151.2	0	42686.1	240519.4	333356.1
夏季	52414.1	0	42419.4	241148.5	335982.1

②CMIES 多目标配置优化。

本文考虑 4 种衍生能源与可再生能源参与配置的场景，将不考虑衍生能源和可再生能源利用的煤矿用能场景设为对照场景。具体为：场景 1：只考虑煤矽石的综合利用。场景 2：考虑煤矽石与瓦斯的综合利用。场景 3：考虑煤矽石、瓦斯、

乏风的综合利用。场景 4：考虑光伏、煤矽石、瓦斯与乏风的综合利用。

每个场景的设备配置设置见表 4，其中，√、× 分别表示该场景下该种能源设备是否投入使用。

表 4 场景设置  
Table 4 Scenario settings

设备	对照场景	场景 1	场景 2	场景 3	场景 4
GT	×	×	√	√	√
PV	×	×	×	×	√
GB	√	√	√	√	√
WHSP	×	√	√	√	√
EC	√	√	√	√	√
AC	×	√	√	√	√
CFB	×	√	√	√	√
TFRR	×	×	×	√	√
WHB	×	√	√	√	√
TS	×	√	√	√	√

CMIES 中各类设备的单位功率投资成本、设备使用寿命、以及各设备机组台数限制或容量限制如表 5 所示。

表 5 能源设备参数  
Table 5 Energy equipment parameters

设备	寿命/元	投资成本/(元/kW)	额定功率/kW	数量限制/台	容量限制/(kW·h)
GT	15	7700	500	6	—
PV	25	8700	—	—	30000
GB	20	420	150	200	—
WHSP	20	2200	75	400	—
EC	15	810	50	100	—
AC	15	670	200	25	—
CFB	20	4548	18750	4	—
TFRR	15	15000	670	5	—
WHB	15	200	100	300	—
TS	20	102	—	—	100000

煤矿综合能源系统配置优化采用所提出的多种群协作 NSGA-II 算法进行求解，为了验证构建算法的有效性，设定 NSGA-II 算法作为对照算法，具体参数如表 6 所示。

表 6 多目标优化算法参数  
Table 6 Parameters of multi objective optimization algorithm

算法	种群数量	种群规模	迭代次数	交叉算子	变异算子
改进的 NSGA-II	5	2000	500	[10, 30]	[10, 30]
NSGA-II	1	2000	500	20	20

4 种场景仿真求解分别得到的 Pareto 前沿如图 10—13 所示。

图 10—13 中，红、蓝色离散点分别代表改进的 NSGA-II 和 NSGA-II 得到的帕累托解集，目标  $f(1)$ 、目标  $f(2)$  分别代表了系统运行年总成本最低和年总碳排放量最低，第 3 个目标  $f(3)$  为  $P(x)$ ，由冷、热能供需平衡的等式约束条件转化而来。目标



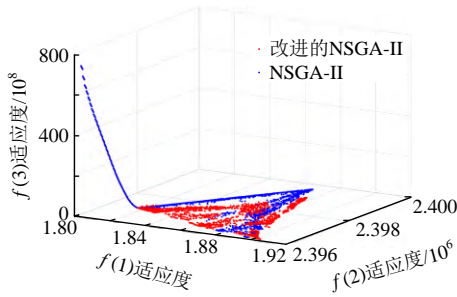


图 10 场景 1 下的 Pareto 前沿  
Fig. 10 Pareto frontier under scenario 1

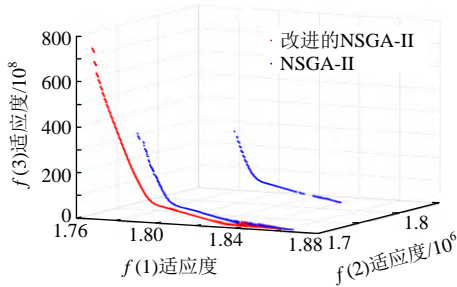


图 11 场景 2 下的 Pareto 前沿  
Fig. 11 Pareto frontier under scenario 2

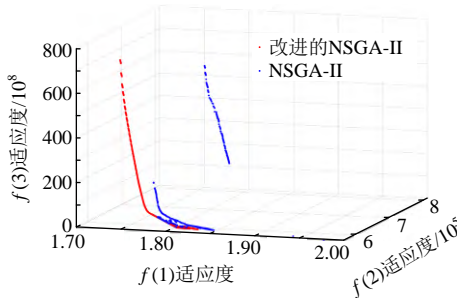


图 12 场景 3 下的 Pareto 前沿  
Fig. 12 Pareto frontier under scenario 3

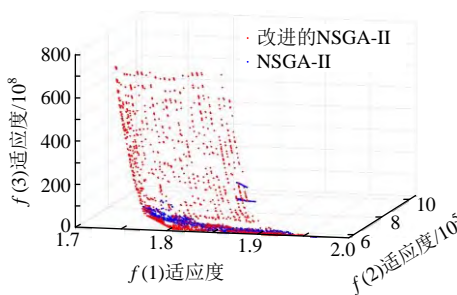


图 13 场景 4 下的 Pareto 前沿  
Fig. 13 Pareto frontier under scenario 4

$f(3)$  的值越小代表系统年供能缺额越小，考虑到煤矿供能的强约束性，以目标  $f(3)$  为筛选指标，筛选  $f(3)$  为 0 的可行解进行后续分析对比。

基于该筛选指标，NSGA-II 算法在 4 个场景下得到的可行解的个数分别为 63、82、21 和 71 个，改进 NSGA-II 算法在 4 个场景下得到的可行解的个数分别为 12、171、56 和 120 个，后者可行解的多样性较于前者平均提升了 110.2%；不同场景下，算

法改进后的可行解对于 NSGA-II 算法的解的支配个数分别为 63、81、20 和 69 个，即算法改进后得到的 Pareto 解集平均支配了 98.3% 基于 NSGA-II 算法得到的 Pareto 解集。

2) 多目标配置方案场景分析。

图 14 给出了对照场景以及 4 种配置场景下 20 个配置方案在 2 个目标函数上的表现情况，其中 C0 代表未考虑衍生能源利用的场景，S1—S5 分别为 Pareto 前沿中的 5 种配置方案。

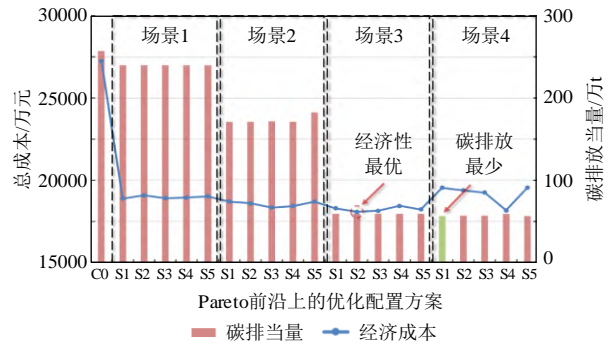


图 14 4 种场景下配置方案对照  
Fig. 14 Comparison of configuration schemes in four scenarios

对比 C0 场景，场景 1 的优化方案增加了煤矸石综合利用模块，5 种配置方案经济成本较对照场景平均下降了 30.4%，碳排当量较对照场景，平均下降了 17.3 万 t。由于煤矸石产量较大，用能经济成本较低，能够配置更多容量的发电机组，系统运行经济成本大幅下降，但煤矸石的利用仍会排放大量二氧化碳，导致碳排放当量的降低有限。

场景 2 进一步增加了煤矿瓦斯综合利用模块，5 种配置方案经济成本较对照场景，平均下降了 31.9%，碳排当量较对照场景平均下降了 32.5%。这是因为煤矿瓦斯的综合利用能向部分矿区负荷供给热能，提供制冷能力，这种配置方式在一定程度上降低天然气消耗，同时也避免了瓦斯直接排空带来的碳排放，进而减少了系统整体碳排放当量。

场景 3 进一步增加了乏风氧化综合利用模块，5 种配置方案经济成本较对照场景，平均下降了 33.1%，碳排当量较对照场景平均下降了 77.0%；由于煤矿生产安全的需要，矿井需要随时通风，直接排空的大量乏风会带来的较大的碳排放当量，配置乏风利用设备，对于碳排放当量的降低效果显著要优于煤矸石和瓦斯利用设备；

场景 4 增加考虑了光伏发电模块，5 种配置方案经济成本较对照场景，平均下降了 29.6%，碳排当量较对照场景平均下降了 77.8%；对比场景 3，场景 4 增加了光伏发电模块的配置，进一步降低了

CMIES 的碳排当量,但由于光伏发电设备初期投资成本高,经济性有所降低。随着系统进一步运行、未来光伏发电设备成本降低、碳排放权参与市场化交易,光伏发电模块的经济性收益也能够得到进一步提升。

## 6 结论

本文考虑煤矿场景下特殊的衍生能源利用设备特性,建立了煤矿综合能源系统配置-运行多目标双层优化模型,并通过一种改进的多种群协作 NSGA-II 多目标优化算法,求解计及碳约束下的煤矿综合能源系统多目标配置双层优化问题。以山西省太原市某真实煤矿为案例进行了仿真。算例表明:

1) 煤矿衍生能源的综合利用能很大程度地提升矿区用能的经济性和环境效益。随着煤矿衍生能源利用程度的不断提升,优化配置后的煤矿综合能源系统的碳排放当量显著降低,经济成本有较大幅度的下降。

2) 多种群协作 NSGA-II 算法能够更好地获取煤矿综合能源系统多目标优化 Pareto 前沿。可行解的多样性较改进前平均提升 110.2%;不同场景下,算法改进后的 Pareto 解集平均支配了原有解 98.3%。对于解决复杂约束的煤矿综合能源系统的优化提供一定的理论参考价值。

在后续研究中,将考虑煤矿综合能源系统中乏风、涌水热能在矿井中的动态传递与时滞特性与 5~10 年时间尺度下衍生能源禀赋的不确定性,对全生命周期的煤矿综合能源配置优化进行研究。

附录见本刊网络版 (<http://www.dwjs.com.cn/CN/1000-3673/current.shtml>)。

## 参考文献

- [1] 习近平. 决胜全面建成小康社会夺取新时代中国特色社会主义伟大胜利——在中国共产党第十九次全国代表大会上的报告[M]. 北京: 人民出版社, 2017.
- [2] 中国共产党第十九届中央委员会. 中共中央关于制定国民经济和社会发展第十四个五年规划和二〇三五年远景目标的建议[M]. 北京: 人民出版社, 2020.
- [3] 国家统计局. 中华人民共和国 2020 年国民经济和社会发展统计公报[EB/OL]. [2021-02-28]. [http://www.stats.gov.cn/zjtj/zthd/lhfw/2021/lh\\_hgjj/202103/t20210301\\_1814216.html](http://www.stats.gov.cn/zjtj/zthd/lhfw/2021/lh_hgjj/202103/t20210301_1814216.html).
- [4] 王文, 王恒, 李东印, 等. 低浓度弱涡流场瓦斯富集新方法及试验研究[J]. 煤炭学报, 2018, 43(3): 751-758.  
WANG Wen, WANG Heng, LI Dongyin, et al. New method and experiment of methane enrichment under low concentration and weak vortex field[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(3): 751-758(in Chinese).
- [5] MAHDEVARI S. Coal mine methane: control, utilization, and abatement[C]//HIRSCHI J. Advances in Productive, Safe, and Responsible Coal Mining. Duxford: Woodhead Publishing, 2019: 179-198.
- [6] 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.
- [7] HUANG Hongxu, LIANG Rui, LV Chaoxian, et al. Two-stage robust stochastic scheduling for energy recovery in coal mine integrated energy system[J]. Applied Energy, 2021(290): 116759.
- [8] 郭创新, 王惠如, 张伊宁, 等. 面向区域能源互联网的“源-网-荷”协同规划综述[J]. 电网技术, 2019, 43(9): 3071-3080.  
GUO Chuangxin, WANG Huiru, ZHANG Yining, et al. Review of “source-grid-load” co-planning orienting to regional energy internet[J]. Power System Technology, 2019, 43(9): 3071-3080(in Chinese).
- [9] 任娜, 王雅倩, 徐宗磊, 等. 多能流分布式综合能源系统容量匹配优化与调度研究[J]. 电网技术, 2018, 42(11): 3504-3512.  
REN Na, WANG Yaqian, XU Zonglei, et al. Component sizing and optimal scheduling for distributed multi-energy system[J]. Power System Technology, 2018, 42(11): 3504-3512(in Chinese).
- [10] LI Zhengmao, XU Yan, FENG Xue, et al. Optimal stochastic deployment of heterogeneous energy storage in a residential multi-energy microgrid with demand-side management[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2020, 17(2): 991-1004.
- [11] 王明军, 穆云飞, 孟宪君, 等. 考虑热能传输动态特性的电-热综合能源系统优化调度方法[J]. 电网技术, 2020, 44(1): 132-140.  
WANG Mingjun, MU Yunfei, MENG Xianjun, et al. Optimal scheduling method for integrated electro-thermal energy system considering heat transmission dynamic characteristics[J]. Power System Technology, 2020, 44(1): 132-140(in Chinese).
- [12] 李鹏, 吴迪凡, 李雨薇, 等. 基于谈判博弈的多微网综合能源系统多目标联合优化配置[J]. 电网技术, 2020, 44(10): 3680-3688.  
LI Peng, WU Difan, LI Yuwei, et al. Multi-objective union optimal configuration strategy for multi-microgrid integrated energy system considering bargaining games[J]. Power System Technology, 2020, 44(10): 3680-3688(in Chinese).
- [13] 边晓燕, 史越奇, 裴传逊, 等. 计及经济性和可靠性因素的区域综合能源系统双层协同优化配置[J]. 电工技术学报, 2021, 36(21): 4529-4543.  
BIAN Xiaoyan, SHI Yueqi, PEI Chuanxun, et al. Bi-level collaborative configuration optimization of integrated community energy system considering economy and reliability[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(21): 4529-4543(in Chinese).
- [14] 赵建勇, 年珩, 马润生, 等. 基于改进雷达图模型的热电联供型微网系统多目标优化配置[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(12): 31-41.  
ZHAO Jianyong, NIAN Heng, MA Runsheng, et al. Multi-objective optimization configuration for combined heat and power microgrid system based on improved radar chart model[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(12): 31-41(in Chinese).
- [15] CHEN Jie, HUANG Shoujun, SHAHABI L. Economic and environmental operation of power systems including combined cooling, heating, power and energy storage resources using developed multi-objective grey wolf algorithm[J]. Applied Energy, 2021(298): 117257.
- [16] 杨丽君, 王晨, 赵优, 等. 基于双层优化模型的电-气耦合综合能源故障恢复策略[J]. 电网技术, 2020, 44(11): 4264-4273.  
YANG Lijun, WANG Chen, ZHAO You, et al. Electric-gas coupled integrated energy fault recovery strategy based on bi-level optimization model[J]. Power System Technology, 2020, 44(11):

- 4264-4273(in Chinese).
- [17] LI Ang, CHEN Changkun, CHEN Jie, et al. Experimental investigation of temperature distribution and spontaneous combustion tendency of coal gangue stockpiles in storage[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2021, 28(26): 34489-34500.
- [18] 周楠, 姚依南, 宋卫剑, 等. 煤矿矸石处理技术现状与展望[J]. 采矿与安全工程学报, 2020, 37(1): 136-146.  
ZHOU Nan, YAO Yi'nan, SONG Weijian, et al. Present situation and prospect of coal gangue treatment technology[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2020, 37(1): 136-146(in Chinese).
- [19] SU Shi, CHEN Hongwei, TEAKLEP, et al. Characteristics of coal mine ventilation air flows[J]. Journal of Environmental Management, 2008, 86(1): 44-62.
- [20] 朱秀梅. 浅议矿井水污染对环境的危害及资源化[J]. 化工时刊, 2012, 26(6): 56-58.  
ZHU Xiumei. Pollution and hazard of mine sewage on eco-environment and resources utilization[J]. Chemical Industry Times, 2012, 26(6): 56-58(in Chinese).
- [21] 邓杰, 姜飞, 王文辉, 等. 考虑动态能效模型的园区综合能源系统梯级优化运行[J]. 电网技术, 2022, 46(3): 1027-1038.  
DENG Jie, JIANG Fei, WANG Wenye, et al. Study on cascade optimization operation of park-level integrated energy system considering dynamic energy efficiency model[J]. Power System Technology, 2022, 46(3): 1027-1038 (in Chinese).
- [22] LI Zhengmao, XU Yan, FANG Sidun, et al. Robust coordination of a hybrid AC/DC multi-energy ship microgrid with flexible voyage and thermal loads[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(4): 2782-2793.
- [23] ZHAO Shifei, GE Zhihua, HE Jie, et al. A novel mechanism for exhaust steam waste heat recovery in combined heat and power unit[J]. Applied Energy, 2017(204): 596-606.
- [24] 吴素农, 于金镒, 杨为群, 等. 配电网分布式电源最大并网容量的机会约束评估模型及其转化方法[J]. 电网技术, 2018, 42(11): 3691-3697.  
WU Su'nong, YU Jinyi, YANG Weiqun, et al. Chance constrained DG capacity assessment model and transforming method for distribution networks[J]. Power System Technology, 2018, 42(11): 3691-3697(in Chinese).
- [25] 林顺富, 刘持涛, 李东东, 等. 考虑电能交互的冷热电区域多微网系统双层多场景协同优化配置[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(5): 1409-1420.  
LIN Shunfu, LIU Chitao, LI Dongdong, et al. Bi-level multiple scenarios collaborative optimization configuration of CCHP regional multi-microgrid system considering power interaction among microgrids[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(5): 1409-1420(in Chinese).
- [26] 张涛, 王成, 王凌云, 等. 考虑虚拟电厂参与的售电公司双层优化调度模型[J]. 电网技术, 2019, 43(3): 952-960.  
ZHANG Tao, WANG Cheng, WANG Lingyun, et al. A bi-level optimal dispatching model of electricity retailers integrated with VPPs[J]. Power System Technology, 2019, 43(3): 952-960(in Chinese).



黄宏旭

在线出版日期: 2021-09-16。

收稿日期: 2021-07-01。

作者简介:

黄宏旭(1997), 男, 博士研究生, 研究方向为  
矿山综合能源系统运行优化、新型电力市场等,

E-mail: hongxuhuang@outlook.com;

梁睿(1981), 通信作者, 男, 教授, 博士生导师,  
研究方向为电网暂态保护与定位、设备状态感知、  
能源互联网等, E-mail: liangrui@cumt.edu.cn。

(责任编辑 徐梅)

附录 A

表 A1 各机组污染物排放  
Table A1 Pollutant emission of each unit

污染物种类	单位	设备类型			
		GT	GB	TFRR	CFB
CO <sub>2</sub>	g/(kW·h)	184	210	1329	230
NO <sub>x</sub>	g/(kW·h)	0.6188	0.5215	-	1.4517
CO	g/(kW·h)	0.1702	0.1052	-	-
SO <sub>2</sub>	g/(kW·h)	0.0928	0.0828	-	1.4733

表 A2 环境损失成本以及环境罚款成本  
Table A2 Environmental loss cost and environmental penalty cost

环境系数	单位	CO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	CO	SO <sub>2</sub>
环境损失成本	元/kg	0.01871	6.5081	0.8135	4.8810
环境罚款成本	元/kg	0.00814	1.6270	0.1302	0.8135

表 A3 各机组环境治理成本  
Table A3 Environmental treatment cost of each unit

设备类型	GT	GB	TFRR	CFB
环境成本(元/(MW·h))	10.663	10.452	35.684	26.375