

# 基于多目标人工旅鼠算法的工业园区 综合能源优化调度方法研究

付金兴<sup>1†</sup>, 隋永波<sup>1</sup>, 高辉<sup>1</sup>, 徐子尚<sup>2</sup>

(1. 南京邮电大学自动化学院, 江苏 南京 210023; 2. 中国电力科学研究院有限公司, 北京 100192)

**摘要:**针对综合能源系统低碳经济调度的优化问题,本文提出了一种基于多目标人工旅鼠算法的工业园区综合能源优化调度方法。首先,以系统综合运行成本与碳排放为优化目标,构建含有碳捕集电厂以及氢能利用结构的综合能源系统多目标优化调度模型;其次,针对复杂多能流综合能源系统难以准确计算系统碳排放的问题,提出一种改进动态碳排放因子计算系统碳排放,以提高系统碳排放的准确度;然后,针对现有多目标优化算法易陷入局部最优、收敛速度慢等问题,引入非支配排序与选择以及信息反馈机制,将人工旅鼠算法改进为多目标人工旅鼠算法,增强其全局搜索能力和收敛性;最后,通过不同场景及不同算法的对比结果表明,所提调度方法可使运行成本最多降低18.20%,碳排放量最多减少36.17%,从而证明了该方法能够有效解决综合能源多目标优化调度问题,具有较高的工程应用价值。

**关键词:**综合能源;人工旅鼠算法;优化调度;碳排放;碳捕集电厂

中图分类号:TM772

文献标识码:A

## Research on Optimal Scheduling of Integrated Energy Systems in Industrial Parks Based on Multi-objective Artificial Lemmings Algorithm

FU Jinxing<sup>1†</sup>, SUI Yongbo<sup>1</sup>, GAO Hui<sup>1</sup>, XU Zishang<sup>2</sup>

(1. College of Automation, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Jiangsu, Nanjing 210023, China;  
2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

**Abstract:** To address the low-carbon economic dispatch problem of integrated energy systems, a multi-objective artificial lemming algorithm-based optimization method for integrated energy scheduling in industrial parks is proposed in this paper. First, a multi-objective scheduling model is established with minimizing total operating cost and carbon emissions, which includes carbon capture power plants and hydrogen energy utilization. Second, to improve the carbon emission calculation accuracy in complex integrated energy systems, an improved dynamic carbon emission factor method is introduced. Then, to overcome some limitations, e.g., easily trapping in local optimization and slow convergence in traditional optimization algorithms, the artificial lemming algorithm is improved by introducing non-dominated sorting, selection, and feedback mechanisms. This enhancement strengthens its global search ability and convergence. Finally, simulation results under different scenarios and algorithms are given, which show the proposed method reduces operating costs by up to 18.20% and carbon emissions by up to 36.17%. Therefore, the proposed method effectively solves the multi-objective optimization scheduling problem of integrated energy systems and has high engineering application value.

**Key words:** integrated energy; artificial lemming algorithm; optimal scheduling; carbon emission; capture power plant

在“双碳”目标的引领下<sup>[1]</sup>,传统的单目标优化调度方式已难以满足绿色低碳发展的需求,调度优化亟须向多目标方向转变。在碳排放核算方面,目前国内外主要运用排放因子法、投入产出法、生态网络分析法以及生命周期评价法对工业园区综合能源系统的碳排放进行计算<sup>[2-3]</sup>。文献[4]~[6]利用生命周期法计算得出的碳排放结果可信度高,但其数据收集过程需要大量的成本和人力。文献[7]~[8]利用动态碳排放因子方法计算系统碳排放总量,但该方法只考虑了外网购电的动态碳排放因子,未涵盖系统内其他设备能源的动态因子。

针对综合能源系统的多目标调度问题,国内外学者多采用非支配排序遗传算法 II(Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II, NSGA-II)、多目标粒子群算法(Multi Objective Particle Swarm Optimization, MOPSO)等经典算法,但在处理电—热—冷—氢多能流耦合的复杂约束时仍存在易陷局部最优、参数依赖性强、计算复杂度等不足<sup>[9-10]</sup>。

现有多目标算法在综合能源系统优化中的局限,催生了对新型算法的需求。人工旅鼠算法具备良好的跳出局部最优能力与解空间探索能力,但仅能求解单目标优化问题,无法求解多目标优化问题。因此,本文通过引入 NASGA-II 精英策略与信息反馈机制,构建了多目标人工旅鼠算法,并提出了改进的动态碳排放因子法,本文所建立的含碳捕集与氢能系统模型及方法的有效性均通过算例得到验证。

### 1 工业园区综合能源系统结构

本文所研究的工业园区为近海低碳工业园区,其特点在于构建以可再生能源为主导、多能互补的低碳能源体系。如图 1 所示为工业园区综合能源系统结构示意图。

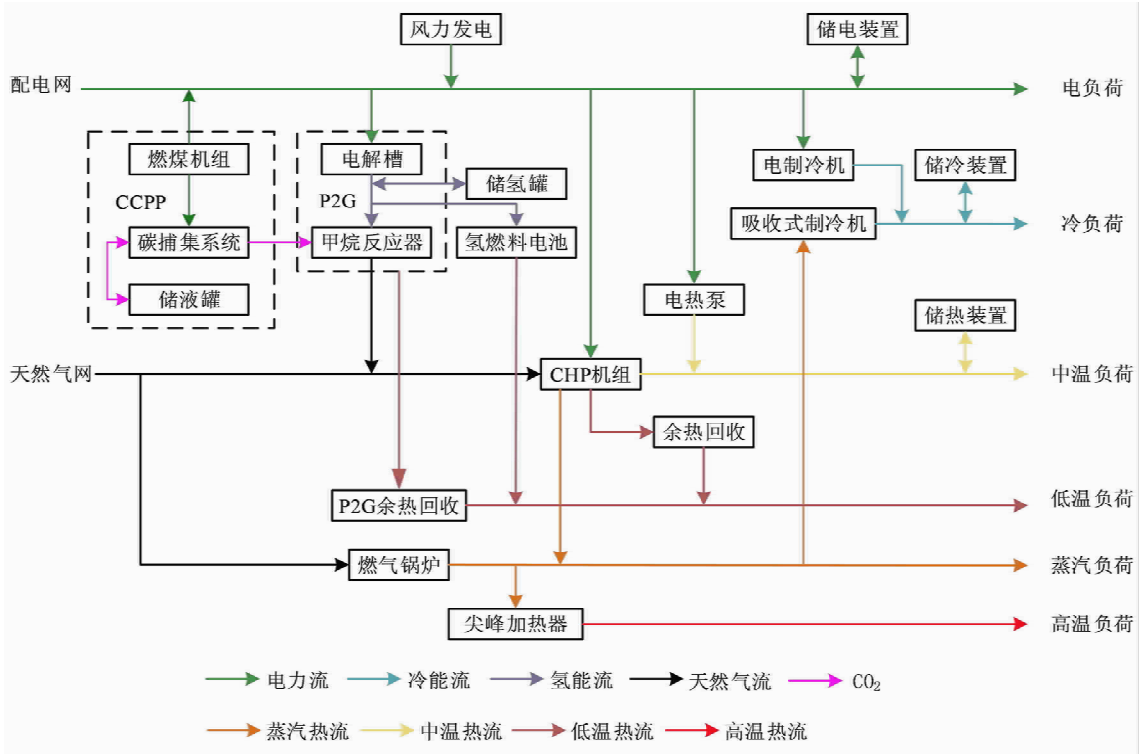


图 1 工业园区综合能源系统结构示意图

## 2 考虑改进动态碳排放因子的阶梯式碳交易机制模型

### 2.1 碳排放初始配额模型

碳配额是指每个排放设备在一定调度周期内所允许的 CO<sub>2</sub>排放量。具体的配额模型如下。

$$\begin{aligned}
 E_{\text{quota}} = & e_{\text{CCPP}} \sum_{t=1}^T E_{\text{CCPP}}(t) + \\
 & e_{\text{CHP}} \left[ \sum_{t=1}^T \varphi_c P_{\text{CHP}}(t) + \sum_{t=1}^T Q_{\text{CHP}}(t) \right] + \\
 & e_{\text{GB}} \sum_{t=1}^T Q_{\text{GB}}(t) + e_{\text{buy}} \sum_{t=1}^T P_{\text{buy},E}(t) \quad (1)
 \end{aligned}$$

式(1)中,  $E_{\text{quota}}$  为碳排放配额;  $E_{\text{CCPP}}(t)$  为  $t$  时刻 CCPP 产生的碳排放;  $e_{\text{CCPP}}$ 、 $e_{\text{CHP}}$ 、 $e_{\text{GB}}$ 、 $e_{\text{buy}}$  分别为

CCPP、CHP 机组、燃气锅炉以及外购电力的碳排放配额系数； $P_{\text{CHP}}(t)$ 、 $Q_{\text{CHP}}(t)$  分别为  $t$  时刻 CHP 机组产生的电功率和热功率； $\varphi_e$  为电热转换系数； $Q_{\text{GB}}(t)$  为  $t$  时刻燃气锅炉产生的热功率； $P_{\text{buy,E}}(t)$  为  $t$  时刻系统购电量； $T$  为总调度周期。

## 2.2 基于改进动态碳排放因子的实际碳排放模型

传统碳排放因子法计算简单,但在应用于综合能源系统等高度动态系统时,计算结果往往与实际碳排放存在较大偏差。为提高核算精度,本文提出了一种改进动态碳排放因子法,用于工业园区综合能源系统的碳排放计算。

动态碳排放因子法基于设备实时数据与时间变化,能动态反映系统瞬时碳排放特性。其数学模型如下。

$$E_{\text{actual}} = \sum_{t=1}^T [E_{\text{CCPP}}(t) + E_{\text{CHP}}(t) + E_{\text{GB}}(t) + E_{\text{buy,E}}(t) - E_{\text{CCPP,cap}}(t)] \quad (2)$$

式(2)中,  $E_{\text{actual}}$  为系统实际碳排放量； $E_{\text{CHP}}(t)$ 、 $E_{\text{GB}}(t)$  分别为  $t$  时刻 CHP 机组、燃气锅炉产生的碳排放； $E_{\text{buy,E}}(t)$  为  $t$  时刻外购电力产生的碳排放； $E_{\text{CCPP,cap}}(t)$  为  $t$  时刻 CCPP 吸收的碳排放。

$$\begin{cases} EF_{\text{CHP}}(t) = \frac{EF_{\text{CHP}} P_{\text{CHP}}(t)}{P_{\text{CHP}}(t) + Q_{\text{CHP}}(t) + Q_{\text{CB}}(t) + P_{\text{gen}}(t)} \\ EF_{\text{GB}}(t) = \frac{EF_{\text{GB}} Q_{\text{GB}}(t)}{P_{\text{CHP}}(t) + Q_{\text{CHP}}(t) + Q_{\text{GB}}(t) + P_{\text{gen}}(t)} \\ EF_{\text{buy,E}}(t) = \frac{EF_{\text{E}} [P_{\text{CHP}}(t) + P_{\text{gen}}(t)] + EF_{\text{buy,E}} P_{\text{buy,E}}(t)}{P_{\text{CHP}}(t) + P_{\text{WT}}(t) + P_{\text{buy,E}}(t) + P_{\text{gen}}(t)} \\ E_{\text{CHP}}(t) + EF_{\text{CHP}}(t) AD_{\text{CHP,gas}}(t) \\ E_{\text{GB}}(t) = EF_{\text{GB}}(t) AD_{\text{GB,gas}}(t) \\ E_{\text{buy,E}} = EF_{\text{buy,E}}(t) P_{\text{buy,E}}(t) \end{cases} \quad (3)$$

式(3)中,  $EF_{\text{CHP}}(t)$ 、 $EF_{\text{GB}}(t)$  分别为 CHP 机组和燃气锅炉的动态碳排放因子； $EF_{\text{buy,E}}(t)$  为外购电力的动态碳排放因子； $EF_{\text{CHP}}$ 、 $EF_{\text{GB}}$  分别为 CHP 机组、燃气锅炉的静态碳排放因子； $EF_{\text{buy,E}}$  为外购电力的静态碳排放因子； $EF_{\text{E}}$  为 CCPP、CHP 机组产电碳排放因子； $P_{\text{WT}}(t)$  为  $t$  时刻风电机组实际输出功率； $AD_{\text{CHP,gas}}(t)$ 、 $AD_{\text{GB,gas}}(t)$  分别为  $t$  时刻 CHP 机组、燃气锅炉所消耗的天然气的活动水平； $P_{\text{gen}}(t)$  为  $t$  时刻 CCPP 产生的电功率。

## 2.3 阶梯碳交易机制模型

本文采用阶梯式碳交易机制计算碳交易成本  $f_{\text{CO}_2}^{\text{trade}}$ 。其数学模型如下。

$$f_{\text{CO}_2}^{\text{trade}} = \begin{cases} \lambda \Delta E & \Delta E \leq l \\ \lambda(1+\alpha)(\Delta E - l) + \lambda l & l < \Delta E \leq 2l \\ \lambda(1+2\alpha)(\Delta E - 2l) + \lambda(2+\alpha)l & 2l < \Delta E \leq 3l \\ \lambda(1+3\alpha)(\Delta E - 3l) + \lambda(3+3\alpha)l & 3l < \Delta E \leq 4l \\ \lambda(1+4\alpha)(\Delta E - 4l) + \lambda(4+6\alpha)l & 4l < \Delta E \end{cases} \quad (4)$$

$$\Delta E = E_{\text{actual}} - E_{\text{quota}} \quad (5)$$

式(4)–(5)中,  $\Delta E$  为实际碳交易量； $\lambda$  为碳交易单价； $\alpha$  为碳交易价格增长率； $l$  为区间长度。

## 3 考虑改进动态碳排放因子的工业园区综合能源优化调度模型

### 3.1 目标函数

(1)经济性目标

本文以系统的综合运行成本最低为经济性优化目标,目标函数  $F_1$  表达式如下。

$$F_1 = \min(F_{\text{buy,E}} + f_{\text{buy,gas}} + f_{\text{coal}} + f_{\text{mt}} + f_{\text{WT,C}} + f_{\text{CO}_2}^{\text{trade}} + f_{\text{CO}_2}^{\text{stor}}) \quad (6)$$

式(6)中,  $f_{\text{buy,E}}$  为系统向外部购电成本； $f_{\text{buy,gas}}$  为购入天然气成本； $f_{\text{coal}}$  为燃煤成本； $f_{\text{mt}}$  为设备运维成本； $f_{\text{WT,C}}$  为弃风惩罚成本； $f_{\text{CO}_2}^{\text{trade}}$  为碳交易成本； $f_{\text{CO}_2}^{\text{stor}}$  为碳封存成本。

(2)碳排放目标

第二个优化目标为系统实际碳排放总量最小,其目标函数  $F_2$  表达式为:

$$F_2 = \min(E_{\text{actual}}) \quad (7)$$

### 3.2 基于多目标人工旅鼠算法的求解方法

人工旅鼠算法(Artificial Lemming Algorithm, ALA)是一种仿生元启发式算法,通过模拟旅鼠四种行为进行空间搜索,并利用能量递减机制动态平衡探索与开发<sup>[11]</sup>。能量递减机制的数学表达式如式(8)所示。

$$E_t = 4 \times \arctan\left(1 - \frac{t}{T_{\text{max}}}\right) \times \ln\left(\frac{1}{\text{rand}}\right) \quad (8)$$

式(8)中,  $E_t$  为能量因子； $t$  为当前迭代次数； $T_{\text{max}}$  为最大迭代次数； $\text{rand}$  为 0–1 之间的随机数。

本文引入 NSGA-II 的精英选择机制与多目标指数分布优化器(Multi Objective Exponential Distribution Optimizer, MOEDO)的信息反馈策略,对 ALA 进行改进,提出多目标人工旅鼠算法(MOALA)。其核心改进包括以下两个方面:

(1)引入 MOEDO 的信息反馈机制以生成子代旅鼠种群位置集合<sup>[12]</sup>。

本文引入 MOEDO 机制并结合加权融合策略,其具体表达式如下。

$$\begin{cases} x_{i,t+1} = \partial_1 P_{i,t+1} + \partial_2 x_{k,t} \\ \partial_1 = \frac{f_{k,t}}{f_{i,t+1} + f_{k,t}} \\ \partial_2 = \frac{f_{i,t+1}}{f_{i,t+1} + f_{k,t}} \\ \partial_1 + \partial_2 = 1 \end{cases} \quad (9)$$

式(9)中,  $x_{i,t+1}$  为  $t+1$  次迭代的子代旅鼠种群个体位置,  $Q_t$  就是由其组成的集合;  $P_{i,t+1}$  为 ALA 和父代种群位置  $P_t$  生成的  $t+1$  次迭代的第  $i$  个个体位置;  $x_{k,t}$  为  $t$  次迭代的子代旅鼠种群个体位置  $x_{i,t}$  ( $x_{i,t} \neq P_{i,t}$ ) 中挑选的第  $k$  只旅鼠的位置;  $\partial_1$  和  $\partial_2$  为权重系数;  $f_{k,t}$  和  $f_{i,t+1}$  分别为  $x_{k,t}$  和  $P_{i,t+1}$  的适应度值,均由目标函数作为的适应度函数计算得到。

(2)融合 NSGA-II 的精英策略进行非支配排序与选择。

首先通过组合种群构建,得到旅鼠组合群体位置集合,然后进行非支配解分层筛选,将旅鼠组合群体位置集合中的解按帕累托等级分层,最后执行精英保留与拥挤距离选择。

本文利用改进后得到的 MOALA 对所提出的工业园区综合能源调度优化模型求解。该算法求解流程如图 2 所示。

时段,对典型日各设备出力情况进行分析。工业园区所在地区采用分时电价,具体如表 1 所示。

表 1 分时电价

时段	时间/h	价格/ [元·(kW·h) <sup>-1</sup> ]
峰时	10:00—12:00	1.00
	19:00—23:00	
平时	8:00—9:00	0.70
	13:00—18:00	
谷时	00:00—7:00	0.40
	23:00—24:00	

#### 4.1 不同场景结果对比分析

为了验证本文所提出的模型在降低系统综合运行成本和碳排放量方面的效果,本文设置了 4 种场景进行对比分析:

1)场景 1:不考虑 CCPP、P2G 设备以及氢能利用,即以传统的综合能源系统运行;

2)场景 2:不考虑 CCPP,考虑 P2G 设备以及氢能利用;

3)场景 3:考虑 CCPP,不考虑 P2G 设备以及氢能利用;

4)场景 4:考虑 CCPP、P2G 设备以及氢能利用,即本文所提出的模型。

以上 4 种场景所对应的调度结果如表 2 所示。

运行结果表明运行成本最多降低 18.20%,碳排放最多减少 36.17%。充分证明本文建立的综合能源系统调度模型具有显著的低碳经济效益。

对比场景 1 与场景 3,证明了在氢能利用的综合能源系统的基础上,引入 CCPP 可以提高综合能源系统的经济性和低碳性。对比场景 1 与场景 2,充分证明了在含有 CCPP 的综合能源系统的基础上,引入氢能利用技术不仅能够配合碳捕集电厂深度消纳弃风,而且能抑制燃煤机组强制出力,改善供能结构。

在运行场景 4 下,图 3~图 5 分别为系统电、热和冷负荷出力情况。由图 3 可以看出,在 0:00—7:00,电价谷时段恰逢风电高发期,CCPP 基本不对外出力,CO<sub>2</sub> 存储于储液罐中,电解槽、电热泵与电制冷机以满足热冷负荷。峰平阶段风电减弱,此时 CCPP 产生的 CO<sub>2</sub> 和富液罐中的 CO<sub>2</sub> 进入再生塔,CCPP 除供应基础能耗外,其余电能供应系统协同 CHP 机组一起保证系统电功率平衡。在 14:00—22:00,负荷处于高峰期,电网与氢燃料电池联合供电,以提升系统调节能力。

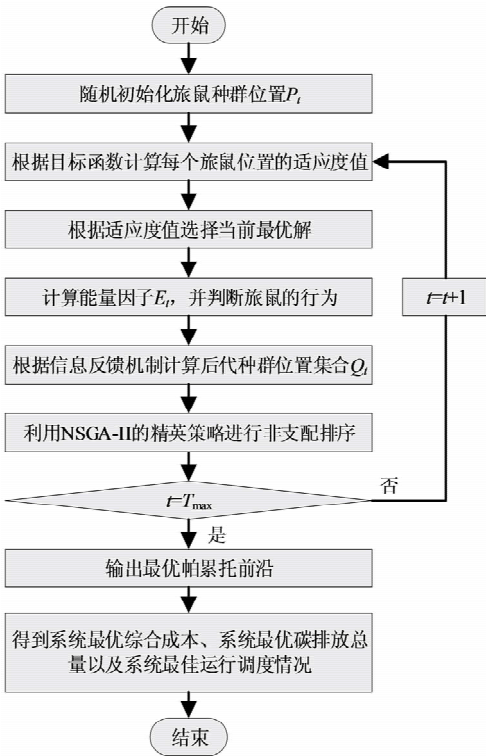


图 2 基于多目标人工旅鼠算法求解流程

## 4 算例分析

选取某近海工业园区综合能源系统为研究对象,以一天 24 h 为调度周期,以 1 h 为间隔划分子

表2 四种场景的优化运行结果

参数	场景1	场景2	场景3	场景4
购气成本/元	18306.24	16809.13	11383.39	11129.12
购电成本/元	13170.74	11958.58	8361.14	7237.18
燃煤成本/元	0	0	13538.76	12520.15
运维成本/元	13980.35	16572.13	15990.52	16953.43
弃风成本/元	4741.02	2150.48	1201.32	92.04
碳封存成本/元	0	0	1628.23	1455.15
碳交易成本/元	3335.21	1088.12	-4282.50	-5591.47
综合成本/元	53533.56	48578.44	47820.86	43795.60
碳排放量/kg	43113.59	40492.38	30934.39	27520.15

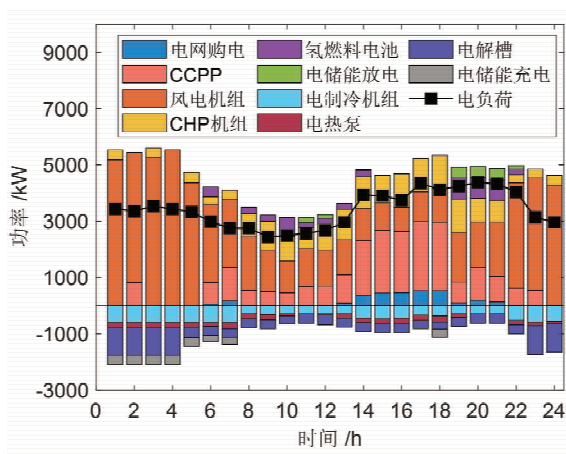
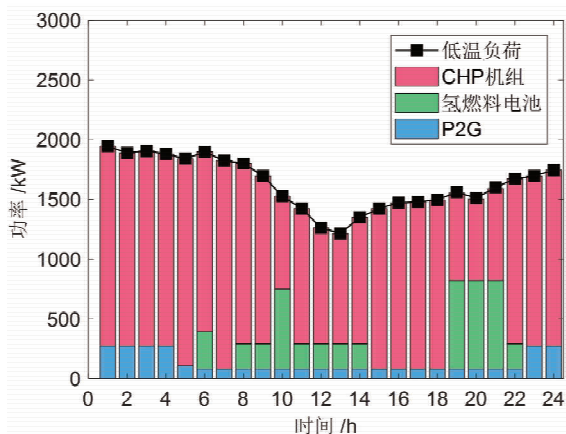
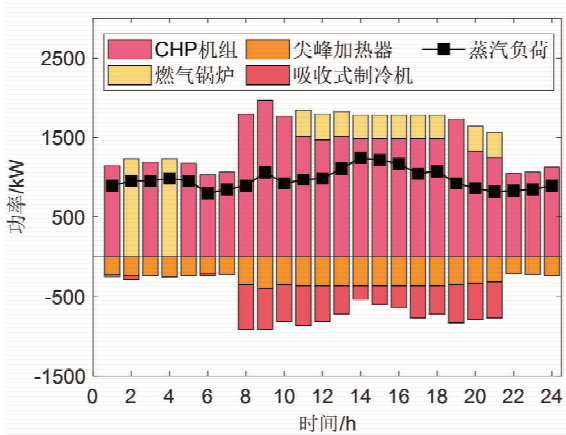


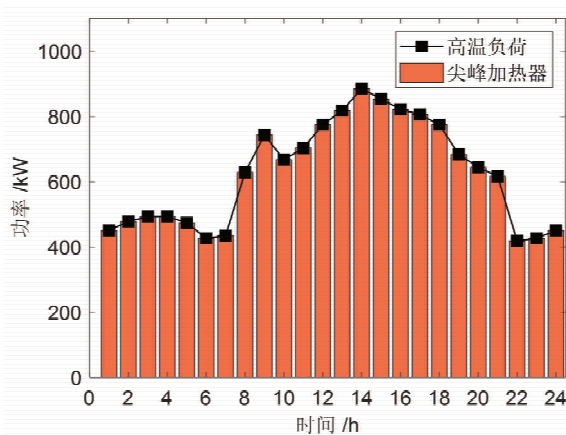
图3 场景4电能优化调度结果



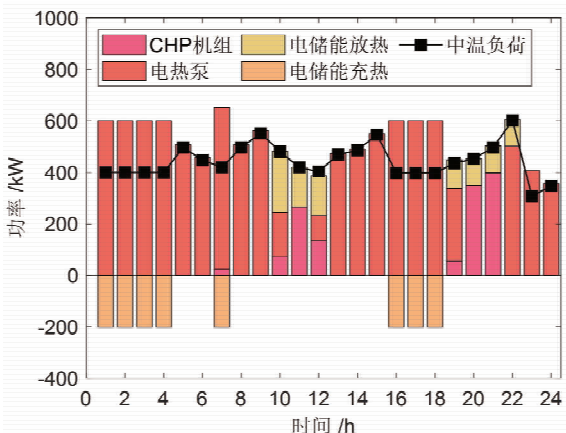
(c) 低温负荷优化调度结果



(a) 蒸汽负荷优化调度结果



(d) 高温负荷优化调度结果



(b) 中温负荷优化调度结果

图4 场景4热能优化调度结果

场景4热能优化调度结果如图4所示。由图可知,电价谷时段,系统中的蒸汽负荷主要由CHP机组承担;在电价峰平时段,主要由CHP与燃气锅炉协同供应蒸汽负荷。系统对中、低、高温负荷实行差异化供应与梯级利用,中温负荷通过电热泵与储热装置在电价谷、峰时段协同供能;低温负荷主要由CHP机组热回收供应,并辅以电解制氢余热;高温负荷由尖峰加热器提供,其富余热量回收后用于中、低温负荷。该策略实现了热能梯级利

用,有效提升了能效并降低了成本与碳排放。图 5 为场景 4 冷能优化调度结果。系统通过分时策略满足冷负荷:电价谷段主要由电制冷机供冷并储冷;电价峰段则减少电制冷,转由吸收式制冷机与储冷装置协同供冷。

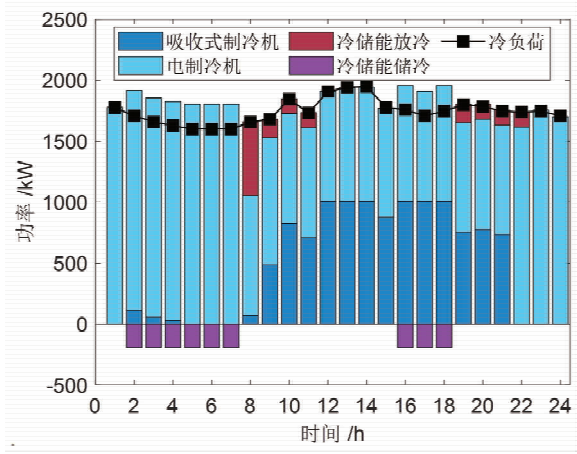


图 5 场景 4 冷能优化调度结果

### 4.2 不同算法结果对比分析

为验证本文所提出算法的有效性,本文选取 NSGA-II<sup>[13]</sup>、MOPSO<sup>[14]</sup>、基于分解的多目标进化算法 (Multi Objective Evolutionary Algorithm Based on Decomposition, MOEAD)<sup>[15]</sup> 和本文提出的 MOALA 对算例模型进行求解,其具体参数设置如表 3 所示。

表 3 不同算法的参数设置

算法	参数设置
NSGA-II	最大迭代次数 $T_{max} = 1000$ ,种群规模 $N = 150$ ,交叉概率 $CR = 1.0$ ,变异概率 $PM = 0.07$
MOPSO	最大迭代次数 $T_{max} = 1000$ ,粒子群数 $N = 150$ ,学习因子 $c_1 = 0.5$ 、 $c_2 = 2.0$ ,惯性权重 $\omega = 0.6$
MOEAD	最大迭代次数 $T_{max} = 1000$ ,种群规模 $N = 150$ ,交叉概率 $CR = 1.0$ ,变异概率 $PM = 0.07$
MOALA	最大迭代次数 $T_{max} = 1000$ ,种群规模 $N = 150$

不同场景中各种算法的具体优化结果如表 4 所示。其中在场景 1 和 2 中,综合运行成本降幅最大达到 10.31%和 11.02%;在场景 3 和 4 中,综合运行成本降幅最大达到 11.19%和 12.33%。可以看出 MOALA 在优化工业园区综合能源系统方面展现出显著优势,体现出更佳的优化性能。

为了更清晰地展现本文所提方法的有效性,统计所有寻优结果的均值、极值、均方差和平均收敛时间。统计结果见表 5 和表 6。由表可知,本文所

提方法在均值、均方差、极值和平均运行时间 4 个评价指标上均展现出显著的性能优越性。综上所述,本文所提方法具有出色的搜索计算能力,能够实现模型的高效求解。

表 4 不同场景中各种算法的具体优化结果

场景	算法	综合运行成本/元	碳排放总量/kg
场景 1	NSGA-II	54721.63	44459.28
	MOPSO	58704.49	45135.97
	MOEAD	59687.51	46230.21
	MOALA	53533.56	43113.59
场景 2	NSGA-II	49796.18	41798.07
	MOPSO	53523.27	42467.38
	MOEAD	54593.69	43560.39
场景 3	MOALA	48578.44	40492.38
	NSGA-II	49038.62	31241.08
	MOPSO	52845.92	32929.58
场景 4	MOEAD	53846.06	33930.67
	MOALA	47820.86	30934.39
	NSGA-II	45068.37	28866.84
场景 4	MOPSO	48956.53	28975.46
	MOEAD	49953.95	29895.84
	MOALA	43795.60	27520.15

表 5 各种算法的综合运行成本优化统计结果

指标	NSGA-II	MOPSO	MOEAD	MOALA
均值	45523.58	49446.09	50953.03	44535.51
极值	46124.79	49936.87	51953.45	44982.25
均方差	359.2	389.9	563.9	265.3
平均收敛时间/s	109.5	95.2	93.1	75.3

表 6 各种算法的碳排放总量优化统计结果

指标	NSGA-II	MOPSO	MOEAD	MOALA
均值	29155.51	29265.21	30494.84	27920.15
极值	29446.32	29565.71	30895.62	28020.03
均方差	319.4	339.1	537.6	252.7
平均收敛时间/s	113.4	97.3	94.5	76.2

## 5 结论

针对工业园区复杂综合能源系统碳排放核算准确度低以及系统综合成本和碳排放总量的多目

标优化调度的问题,提出了基于多目标人工旅鼠算法的优化调度方法,有效解决了工业园区综合能源系统的低碳经济调度问题。结果表明,所建模型在经济效益与减排效果上均显著优于传统模型,引入的改进动态碳排放因子法提升了核算精度,所提MOALA算法在综合性能上明显优于主流对比算法,展现出更优的收敛速度与解集分布。

## 参考文献

- [1] 叶铸德. “双碳”目标下工业园区减污降碳协同增效路径分析与技术要求[J]. 节能, 2024, 43(12): 126—128.
- [2] 崔萍, 张来伟, 李骥, 等. 工业园区综合能源系统评价及碳排放核算研究综述[J]. 山东建筑大学学报, 2024, 39(1): 126—134.
- [3] 王利珍, 刘砚文, 张世阳. 低碳工业园区碳排放计算方法综述[J]. 现代建筑电气, 2024, 15(6): 1—6.
- [4] 覃文力, 荣娜. 基于全生命周期法的含氢能梯级利用综合能源系统优化调度[J]. 电网与清洁能源, 2025, 41(4): 145—153.
- [5] LIU X, QIN W, TIAN J, et al. Optimized scheduling of an integrated energy system containing hydrogen energy cascade utilization based on the life cycle assessment[C]//2024 6th International Conference on Power and Energy Technology (ICPET). IEEE, 2024: 1026—1032.
- [6] WANG R, WEN X, WANG X, et al. Low carbon optimal operation of integrated energy system based on carbon capture technology, LCA carbon emissions and ladder-type carbon trading[J]. Applied Energy, 2022, 311: 118664.
- [7] 许乐, 徐玉韬, 袁旭峰, 等. 计及动态碳排的含氢综合能源系统低碳调度[J]. 电网与清洁能源, 2025, 41(2): 120—129.
- [8] 崔杨, 邹新鹏, 赵钰婷, 等. 考虑动态电碳排放因子的新型电力系统电碳综合需求响应调度方法[J]. 电力自动化设备, 2024, 44(10): 1—7.
- [9] 韩逸飞, 徐婧, 谢典, 等. 考虑碳捕集的风光火储综合能源系统多目标运行优化[J]. 热力发电, 2024, 53(8): 30—37.
- [10] 史明明, 缪惠宇, 郭佳豪, 等. 面向配电网可靠性提升的综合能源系统优化配置方法[J]. 电测与仪表, 2025, 62(5): 22—30.
- [11] XIAO Y, CUI H, KHURMA R A, et al. Artificial lemming algorithm: a novel bionic meta-heuristic technique for solving real-world engineering optimization problems[J]. Artificial Intelligence Review, 2025, 58(3): 84.
- [12] KALITA K, RAMESH J V N, CEPOVA L, et al. Multi-objective exponential distribution optimizer (MOEDO): a novel math-inspired multi-objective algorithm for global optimization and real-world engineering design problems[J]. Scientific reports, 2024, 14(1): 1816.
- [13] 刘硕, 滕云, 陈哲. 融合减碳型多能源微网的都市能源系统环境—经济协调优化模型[J]. 电工技术学报, 2025: 1—24.
- [14] 陶静, 徐武, 李逸琳, 等. 基于多目标算法的冷热电联供型综合能源系统运行优化[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(33): 200—205.
- [15] 汪永康, 黄伟. 基于改进 MOEAD 算法的 CCHP 系统运行优化[J]. 计算机仿真, 2024, 41(6): 114—119+128.