第XX卷 第XX期 XXXX年XX月XX日
DOI：10.7500/AEPS20250610002
电力系统自动化
Automation of Electric Power Systems
Vol. XX No. XX XX XX, XXXX

服务产业集聚区流程化工序能源需求的综合能源优化配置

梁 睿[1]，陈逸翔[1]，丁宣升[1]，陈曙光[1]，王 飞[1,2]，张 潇[2]
（1. 中国矿业大学电气工程学院，江苏省徐州市 221116；
2. 国网江苏省电力有限公司徐州供电分公司，江苏省徐州市 221000）

摘要： 产业集聚区涵盖工业生产全流程，其复杂的产业链结构和多元化的能源需求为优化配置和碳减排提供了巨大潜力。为此，文中提出一种服务产业集聚区流程化工序能源需求的综合能源优化配置方法。首先，根据各生产环节差异化的用能需求，将产业集聚区供能划分为服务工艺流程差异的多综合能源系统；然后，将系统运行经济性与工业生产全流程碳排放作为优化目标，构建综合能源双层优化配置模型；最后，以半导体产业集聚区为例，考虑流程化工序能源需求的关联性约束，通过混合自适应交叉变异改进非支配排序遗传算法，基于工业生产灵活用能实现设备容量的优化配置。仿真结果表明，该配置方法在兼顾产业集聚区运行经济性及碳减排的要求下，实现了多综合能源的优化配置。

关键词： 产业集聚区；综合能源系统；工序关联；优化配置；混合自适应交叉变异

0 引言

随着“碳达峰·碳中和”战略的深入推进，产业集聚区作为工业能源消费与碳排放的核心领域，正面临用能结构优化与碳减排协同提升的双重考验[1-3]。综合能源系统（integrated energy system，IES）凭借其多能互补等优势，成为推动工业绿色转型的重要途径[4-6]。然而，不同于离散工业场景，产业集聚区具备完整的产业链结构[7-9]，其上下游环节在流程上紧密衔接，能源需求呈现出工序关联的流程化特征。因此，如何实现全产业链能源需求与设备容量的动态匹配，成为制约工业系统能效提升的关键。

目前，对于IES优化配置已开展大量研究。文献[10]从氢电耦合的角度出发，通过构建跨季节储氢模型实现了氢能资源的时空转移；文献[11]采用鲁棒优化对热电混合共享储能系统进行功率配置，提升了系统应对不确定性扰动的能力。文献[12]提出基于变流量-变温度特性的电热耦合配置方法，有效反映了冷热电多能系统内部耦合规律；文献[13]通过构建长短期互补的风-光-水联合系统，实现了容量配置与调峰能力的分层协同。尽管上述方法在提升IES经济性与碳减排方面取得了显著成效，但其研究集中于个体工厂和商业楼宇等能源结构简单、负荷特性稳定的单一能源消费区域，配置方法侧重于区域内部的能源供需优化，难以体现多区域间能源需求的耦合关联。因此，在面对工序衔接紧密、工艺链条复杂的产业集聚区时，其模型适用性存在局限性。

在此基础上，部分研究开始关注工艺生产特性下的能源利用潜力。文献[14]构建能量梯级利用模型以提升热能回收效率；文献[15]提出包含绿氢与蓝氢的全过程产储模型，实现制储用氢一体化；文献[16]利用膝点驱动对工业生产的能耗成本与碳排放进行多目标优化，实现最优解筛选；文献[17]结合工业余热与高温蒸汽热泵技术，在保障系统运行灵活性的同时释放工业余热的减碳潜力。尽管这些研究在工业生产多能协同方面取得了突破，但大多仍聚焦于独立工业环节的能源需求，对于涵盖工业全流程的产业集聚区研究较少，忽略了产业链上下游在物料损耗、工序衔接影响下的能源需求关联特征。

综上所述，当前研究在涵盖工业生产全流程的IES优化配置方面仍存在不足，尤其在产业集聚区多工序、多区域、多能源交互的复杂场景下，亟须构建兼顾工序关联与能源需求的配置方法。本文以半导体产业集聚区为例，提出一种融合经济性与碳减排的双层优化配置策略，结合工序间能源需求耦合特性，构建多IES优化配置模型，通过混合自适应交

收稿日期：2025-06-10；修回日期：2025-07-14。
上网日期：XXXX-XX-XX。
江苏省碳达峰碳中和科技创新专项资金资助项目（BE2022609）；徐州市“双碳”专项基础研究项目（KC23076）。

叉变异的非支配排序遗传算法Ⅱ(nondominated sorting genetic algorithm-Ⅱ,NSGA-Ⅱ)求解。仿真结果验证了该方法在降低生产碳排放、实现降本增效方面的积极影响。

1 产业集聚区IES构成

本文以半导体产业为例,其产业集聚区IES架构如图1所示,分为硅原料制备区(IES1)、晶圆加工区(IES2)、封装测试区(IES3)。

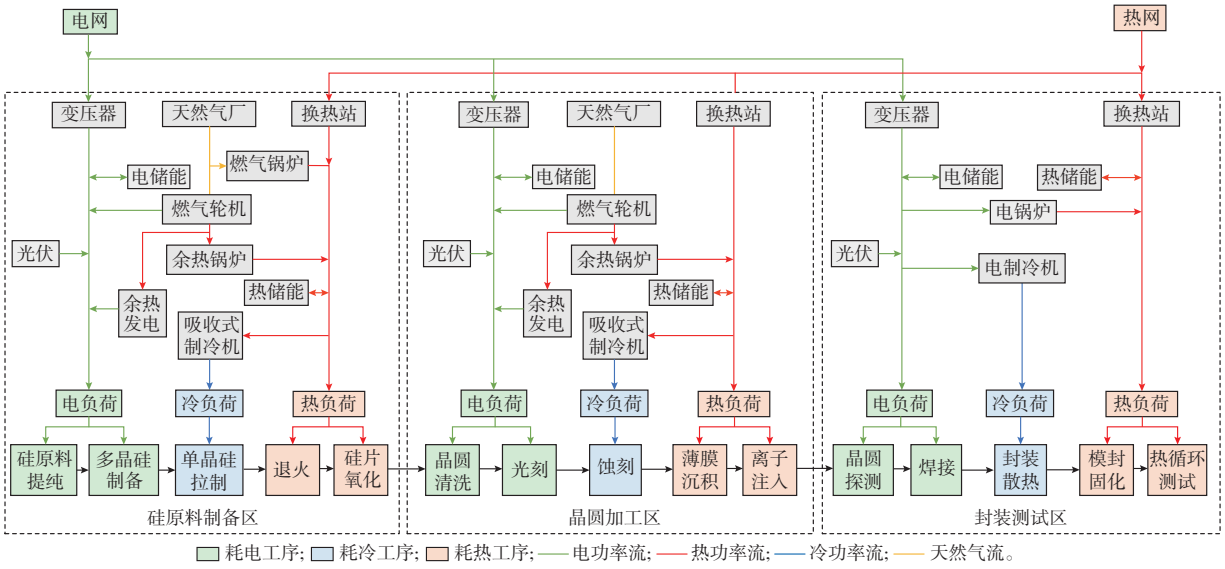


图1 产业集聚区IES构成

Fig. 1 Composition of integrated energy system in industry agglomeration zones

IES1服务于半导体产业链上游,涉及硅原料提纯等耗能环节,供能设备包括光伏(photovoltaic, PV)、燃气轮机(gas turbine, GT)、燃气锅炉(gas boiler, GB)、余热锅炉(waste heat boiler, WHB)、余热发电机(waste heat generator, WHG)、电储能(electric energy storage, ES)、热储能(thermal energy storage, TS)、吸收式制冷机(absorption chiller, AR)等。IES2服务于产业链中游,涉及光刻等耗能环节,供能设备包括PV、GT、WHB、WHG、ES、TS、AR等。IES3服务于产业链下游,涉及晶圆探测等耗能环节,供能设备包括电制冷机(electric chiller, ER)、电锅炉(electric boiler, EB)、PV、ES、TS等。

本文研究的半导体产业集聚区包含完整的产业链环节,硅原料制备作为产业链前端的高耗能工序,将硅原料合成硅片,电热需求巨大;晶圆加工借助高精度光刻将硅片转化为半成品芯片,电热需求中等;芯片制造测试则通过封装测试完成成品芯片制造,能耗最低。这种产业链各环节的能耗差异,直接体现在集聚区内不同IES的负荷特性上。具体而言,IES1由于承担前端高耗能工艺,其电热负荷呈现出峰值高且持续时间长的"单峰陡峭"特征;IES2的电热需求同样较大,也呈现单峰特性,但峰值水平低于IES1;而IES3的电热需求相对最低,其负荷曲线则因劳动密集型工艺呈现出"双峰"态。

针对上述各区域的负荷特性差异与能源需求,图1所示的IES通过与上级电网和热网的能量交换,并利用内部的电力互联与热力互联机制,实现全产业链能源的高效分配。其中,电力互联旨在平衡各区域电力余缺,降低对主网的依赖;热力互联则可以高效利用余热资源用于生产,降低环境污染。这种灵活的能源配置旨在最大化能源利用效率。

2 服务产业集聚区流程化工序能源需求的双层优化配置策略

本文提出一种融合经济性与环保性的双层优化配置策略。模型架构采用上下层交互迭代机制:上层规划模型以集聚区年综合成本与工业生产全流程碳排放最小为目标,确定IES内各设备的容量配置方案;下层运行模型则基于上层配置的容量结果,考虑生产用能调整时流程化工序间能源需求的关联性约束,构建以日运行成本最小为目标函数,通过求解得到典型日下的最优设备出力并反馈至上层模型进行修正。通过上下层数据交互与迭代寻优,最终得到经济-环境效益均衡的最优容量配置方案。该模型图详见附录A图A1。

2.1 上层优化配置模型

上层模型以产业集聚区年综合成本最小和生产

全流程碳排放量最小为目标，将各类设备的安装容量作为决策变量。

2.1.1　上层模型目标函数

1）目标函数1：年综合成本最小。

$$\min C_{\text{total}} = C_{\text{inv}} + C_{\text{ope}} \tag{1}$$

式中：C_{total}为年综合成本；C_{inv}为设备等值年投资成本；C_{ope}为系统年运行成本。

$$C_{\text{inv}} = \sum_{m=1}^{3}\sum_{n\in N} C_{m,n,\text{inv}} S_{m,n} \frac{d(1+d)^{L_{m,n}}}{(1+d)^{L_{m,n}}-1} \tag{2}$$

式中：N为设备类型集合；$C_{m,n,\text{inv}}$为第m个IES中设备n的单位投资成本；$S_{m,n}$为第m个IES中设备n的容量；d为贴现率；$L_{m,n}$为第m个IES中设备n的寿命。

$$C_{\text{ope}} = \sum_{m=1}^{3}\sum_{i\in I} D_i \sum_{t=1}^{24} C_{m,i,\text{ope}}(t) \tag{3}$$

式中：I为典型日种类集合；D_i为典型日i的天数；$C_{m,i,\text{ope}}(t)$为第m个IES在典型日i下t时刻的运行成本。

2）目标函数2：半导体生产全流程年碳排放量最小，其详细碳排放模型见附录A第A2节。

$$\min\left\{ D_i \sum_{m=1}^{3}\sum_{i\in I}(E_{\text{SUP}} + E_{\text{MAR}} + E_{\text{FC}} + E_{\text{SR}}) \right\} \tag{4}$$

式中：E_{SUP}为供能设备碳排放；E_{MAR}为企业购能碳排放；E_{FC}和E_{SR}分别为薄膜沉积和硅片氧化碳排放。

2.1.2　待配置设备容量约束

$$S_{m,n,\min} \leqslant S_{m,n} \leqslant S_{m,n,\max} \tag{5}$$

式中：$S_{m,n,\max}$和$S_{m,n,\min}$分别为第m个IES中设备n的待配置容量上限和下限。

2.2　下层优化运行模型

下层模型以产业集聚区日运行成本最小为目标，考虑流程化工序能源需求关联性约束下的生产用能灵活调整，将各设备出力作为决策变量。

2.2.1　下层模型目标函数

运行层目标函数：

$$\min C_{\text{ope}} = C_{\text{e}} + C_{\text{om}} + C_{\text{in}} - R \tag{6}$$

式中：C_{e}为系统购能成本；C_{om}为设备运维成本；C_{in}为系统电热交互成本；R为系统收益。具体计算式如下。

$$\begin{aligned} C_{\text{e}} = \sum_{m=1}^{3}\sum_{t=1}^{24}[& o_{\text{p,outbuy}}(t) P_{m,i,\text{outbuy}}(t) + \\ & o_{\text{h,outbuy}}(t) Q_{m,i,\text{outbuy}}(t) + c_{\text{g,buy}}(t) V_{m,i,\text{buy}}(t)] \end{aligned} \tag{7}$$

式中：$P_{m,i,\text{outbuy}}(t)$、$Q_{m,i,\text{outbuy}}(t)$分别为第m个IES在典型日i下t时刻从电网购买的电功率和从热网购买的热功率；$o_{\text{p,outbuy}}(t)$为t时刻电网购电价格；$o_{\text{h,outbuy}}(t)$为t时刻热网购热价格；$c_{\text{g,buy}}(t)$为t时刻购气价格；$V_{m,i,\text{buy}}(t)$为第m个IES在典型日i下t时刻的购气量。

$$C_{\text{om}} = \sum_{m=1}^{3}\sum_{t=1}^{24}[C_{m,n,\text{om}} P_{m,n,i}(t)] \tag{8}$$

式中：$C_{m,n,\text{om}}$为第m个IES中设备n的单位运维成本；$P_{m,n,i}(t)$为第m个IES中设备n在典型日i下t时刻出力。

$$C_{\text{in}} = \sum_{m=1}^{3}\sum_{t=1}^{24}[o_{\text{p,in}}(t) P_{m,i,\text{in}}(t) + o_{\text{h,in}}(t) Q_{m,i,\text{in}}(t)] \tag{9}$$

式中：$o_{\text{p,in}}(t)$和$o_{\text{h,in}}(t)$分别为IES间t时刻购电和购热价格；$P_{m,i,\text{in}}(t)$和$Q_{m,i,\text{in}}(t)$分别为第m个IES在典型日i下t时刻IES间交互的电功率和热功率。

$$R = \sum_{m=1}^{3}(R_{m,\text{out}} + R_{m,\text{in}}) \tag{10}$$

式中：$R_{m,\text{out}}$为第m个IES与上级电网和上级热网的交易收益；$R_{m,\text{in}}$为第m个IES参与区域交互节省的成本。具体计算式如下。

$$\begin{aligned} R_{m,\text{out}} = \sum_{t=1}^{24}[& P_{m,i,\text{outsale}}(t) o_{\text{p,outsale}}(t) + \\ & Q_{m,i,\text{outsale}}(t) o_{\text{h,outsale}}(t)] \end{aligned} \tag{11}$$

式中：$P_{m,i,\text{outsale}}(t)$为第$m$个IES在典型日$i$下$t$时刻向电网售电功率；$o_{\text{p,outsale}}(t)$为$t$时刻向电网售电价格；$Q_{m,i,\text{outsale}}(t)$为第$m$个IES在典型日$i$下$t$时刻向热网售热功率；$o_{\text{h,outsale}}(t)$为$t$时刻向热网售热价格。

$$\begin{cases} R_{m,\text{in}} = \sum_{t=1}^{24}\{[o_{\text{p,outbuy}}(t) - o_{\text{p,in}}(t)] P_{m,i,\text{in}}(t) + \\ \qquad [o_{\text{h,outbuy}}(t) - o_{\text{h,in}}(t)] Q_{m,i,\text{in}}(t)\} \\ \sum_{t=1}^{24}\sum_{m=1}^{3} P_{m,i,\text{in}}(t) = \sum_{t=1}^{24}\sum_{m=1}^{3} P_{m,i,\text{inbuy}}(t) = \\ \qquad \sum_{t=1}^{24}\sum_{m=1}^{3} P_{m,i,\text{insale}}(t) \\ \sum_{t=1}^{24}\sum_{m=1}^{3} Q_{m,i,\text{in}}(t) = \sum_{t=1}^{24}\sum_{m=1}^{3} Q_{m,i,\text{inbuy}}(t) = \\ \qquad \sum_{t=1}^{24}\sum_{m=1}^{3} Q_{m,i,\text{insale}}(t) \end{cases} \tag{12}$$

式中：$P_{m,i,\text{inbuy}}(t)$和$Q_{m,i,\text{inbuy}}(t)$分别为第m个IES在典型日i下t时刻区域交互售卖的电功率和热功率；$P_{m,i,\text{insale}}(t)$和$Q_{m,i,\text{insale}}(t)$分别为第m个IES在典型日i下t时刻区域交互购买的电功率和热功率。

2.2.2　流程化工序能源需求关联性约束

半导体产业集聚区由硅原料制备、晶圆加工和芯片制造测试形成紧密衔接的产业链条。三大工序不仅工艺流程环环相扣，其能源需求也与生产进度

紧密关联。实际生产中，上游硅原料制备的用能变动将直接影响下游晶圆加工运行，若未能及时匹配调整能源供应，易造成原料浪费或库存积压。因此，在根据生产计划变动调整用能需求时，必须将工序间的能源关联作为核心约束，确保上下游工序在能源供应和生产节奏上的协调一致，避免因上下游用能调整不均而影响生产。基于此，约束如下：

$$\begin{cases} X_1(t)=X_2(t+\delta_{1,2}) \\ X_2(t)=X_3(t+\delta_{2,3}) \end{cases} \tag{13}$$

$$\begin{cases} 0\leqslant P_{j,\mathrm{adj}}(t)\leqslant P_{j,\mathrm{adj,max}} \\ 0\leqslant Q_{j,\mathrm{adj}}(t)\leqslant Q_{j,\mathrm{adj,max}} \end{cases} \tag{14}$$

$$\begin{cases} X_1(t)P_{1,\mathrm{adj}}(t)(1-\mu_{1,2}\xi_{\mathrm{P}})= \\ \quad P_{2,\mathrm{adj}}(t+\delta_{1,2})X_2(t+\delta_{1,2}) \\ X_2(t)P_{2,\mathrm{adj}}(t)(1-\mu_{2,3}\xi_{\mathrm{P}})= \\ \quad P_{3,\mathrm{adj}}(t+\delta_{2,3})X_3(t+\delta_{2,3}) \\ X_1(t)Q_{1,\mathrm{adj}}(t)(1-\mu_{1,2}\xi_{\mathrm{Q}})= \\ \quad Q_{2,\mathrm{adj}}(t+\delta_{1,2})X_2(t+\delta_{1,2}) \\ X_2(t)Q_{2,\mathrm{adj}}(t)(1-\mu_{2,3}\xi_{\mathrm{Q}})= \\ \quad Q_{3,\mathrm{adj}}(t+\delta_{2,3})X_3(t+\delta_{2,3}) \end{cases} \tag{15}$$

式中：j表示第j个生产环节，j=1,2,3，其中，生产环节1为硅原料制备，生产环节2为晶圆加工，生产环节3为封装测试；$X_1(t)$、$X_2(t)$、$X_3(t)$分别为t时刻环节1、2、3中设备的启停状态；$\delta_{1,2}$、$\delta_{2,3}$分别为环节1到2和环节2到3所需的物料传递与等待时间的总和；$X_2(t+\delta_{1,2})$、$X_3(t+\delta_{2,3})$分别为$t+\delta_{1,2}$时刻环节2和$t+\delta_{2,3}$时刻环节3中设备的启停状态；$P_{j,\mathrm{adj}}(t)$和$Q_{j,\mathrm{adj}}(t)$分别为t时刻环节j电负荷和热负荷的调整量；$P_{j,\mathrm{adj,max}}$和$Q_{j,\mathrm{adj,max}}$分别为第j个环节电负荷和热负荷调整量上限；$\mu_{1,2}$、$\mu_{2,3}$分别为环节1到2和环节2到3的物料损耗系数；ξ_{P}和ξ_{Q}分别为物料损耗影响下的电负荷和热负荷调整系数。

2.2.3 设备运行约束

集聚区所有待配置设备模型详见附录A第A3节。

2.2.4 功率交互与平衡约束

为保障各IES的稳定运行，系统需满足冷热电功率平衡并协调区域间能量交互。相关约束详见附录A第A4节。

3 模型求解

3.1 混合自适应交叉变异的NSGA-Ⅱ算法

针对上述双层优化配置模型的上层规划问题，本文选择全局搜索能力强、收敛精度高的NSGA-Ⅱ算法求解。然而，传统NSGA-Ⅱ算法采用的模拟二进制变异机制虽能维持局部搜索稳定性，但在高维复杂解空间中易导致种群基因多样性衰退及全局勘探能力不足[18-19]。因此，本文通过整合模拟二进制交叉(simulated binary crossover，SBX)与差分进化(differential evolution，DE)算子的双重优势，构建混合自适应交叉变异体系。其中，SBX算子负责父代优质基因的定向传递以强化局部开发效能，DE算子则通过向量差分扰动增强种群在未知区域的探索强度，并引入自适应参数调整机制，依据种群分布密度实时调节交叉概率与变异因子，动态平衡搜索强度。

1)混合交叉操作：

$$c_w=\begin{cases} \gamma_{p,\beta,\mathrm{SBX}} & \mathrm{rand}()\leqslant\eta_{\mathrm{sbx}} \\ p_{w,1}+F(k)(p_{w,2}-p_{w,3}) & \text{其他} \end{cases} \tag{16}$$

$$\gamma_{p,\beta,\mathrm{SBX}}=\begin{cases} 0.5[(1+\beta)p_{w,1}+(1-\beta)p_{w,2}] & \mathrm{rand}()\leqslant 0.5 \\ 0.5[(1-\beta)p_{w,1}+(1+\beta)p_{w,2}] & \text{其他} \end{cases} \tag{17}$$

$$\beta=\frac{1}{\eta_{\mathrm{SBX}}(k)+1} \tag{18}$$

式中：w为决策变量维度；c_w为子代个体在第w维的生成值；$\gamma_{p,\beta,\mathrm{SBX}}$为SBX算子生成的子代个体；$p_{w,1}$、$p_{w,2}$、$p_{w,3}$分别为第1、第2、第3个父代个体在第$w$维的决策变量；rand()为区间[0,1]上的随机数函数；η_{sbx}为SBX的选择概率阈值；k为迭代次数；$F(k)$为第k代DE算子的缩放因子；β为SBX算子的扩张因子；$\eta_{\mathrm{SBX}}(k)$为第k次迭代时SBX算子的选择概率。

2)自适应参数调整：

$$\begin{cases} \eta_{\mathrm{SBX}}(k)=\eta_{\mathrm{SBX,min}}+(\eta_{\mathrm{SBX,max}}-\eta_{\mathrm{SBX,min}})\dfrac{\bar{D}_k}{D_{\max}} \\ F(k)=F_{\min}+(F_{\max}-F_{\min})\left(1-\dfrac{\bar{D}_k}{D_{\max}}\right) \end{cases} \tag{19}$$

式中：$\eta_{\mathrm{SBX,max}}$和$\eta_{\mathrm{SBX,min}}$分别为SBX算子选择概率的最大和最小值；$\bar{D}_k$为第k代种群的平均拥挤度；$D_{\max}$为历史迭代中记录的最大拥挤度；$F_{\max}$和$F_{\min}$分别为缩放因子上限和下限。

3)多项式变异改进：

$$\begin{cases} \sigma_w=(2r_w-1)^{\frac{1}{\mu(k)+1}}\left(1-\dfrac{k}{K_{\max}}\right) \\ \mu(k)=\mu^0+k\Delta\mu \end{cases} \tag{20}$$

式中：σ_w为第w维的变异步长；r_w为0～1内均匀分布的随机数；$\mu(k)$为第k代的变异分布指数；μ^0为变

异分布指数的初始值；$\Delta\mu$为每代变异分布指数的增量；K_{max}为预设的最大迭代次数。

3.2　模型求解流程

本文建立的双层优化配置模型的程序求解流程如图2所示。

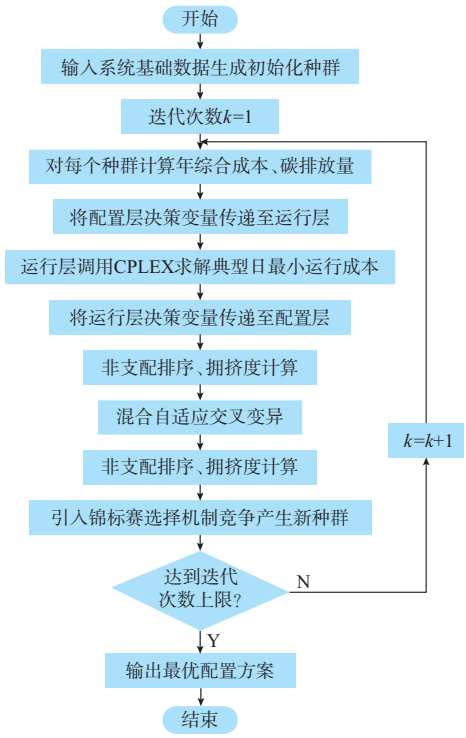


图2　双层优化配置模型求解流程图

Fig. 2　Flow chart of solution for bi-level optimal configuration model

1）参数初始化与种群生成：输入系统参数，设定算法参数（如种群规模、迭代次数），并随机生成代表设备容量配置方案的初始种群。

2）目标函数评估与分层交互：对每个种群个体计算其年综合成本与全流程碳排放作为多目标适应度值。上层传递设备容量至下层；下层构建混合整数规划模型，调用CPLEX求解最优日运行成本，并将设备出力反馈至上层。

3）多目标分层排序与分布优化：采用非支配排序对种群进行分层，并计算个体拥挤度，以维持解的多样性。

4）动态自适应交叉变异：采用本文提出的混合自适应交叉变异算子生成新一代种群。

5）迭代与终止：通过精英竞争策略筛选父代与子代，保留优质解进入下一次迭代。当达到最大迭代次数时算法终止，输出最优Pareto前沿及对应的设备配置方案。

4　算例分析

本章通过算例分析来验证所提配置策略的有效性和合理性。仿真计算在配备Intel Core i5-8265U处理器、主频1.8 GHz、8 GB内存的笔记本电脑上进行，使用MATLAB R2018b软件平台，结合CPLEX求解器求解。

4.1　基础数据

以中国江苏省徐州地区某半导体产业集聚区为例进行算例分析。考虑到工业生产集聚区内各区域距离较短，本文忽略电力线路与热力管道传输损耗。各区域供能设备相关参数等参考文献[20-21]，详见附录B表B1至表B4。本文基于该产业集聚区的全年历史负荷数据，选取了3类具有代表性的典型日，分别为冬季典型日（89 d）、夏季典型日（92 d）和过渡季典型日（184 d）。各典型日在电负荷上差异较小，而热负荷则呈现出冬季最高、夏季最低、过渡季居中的季节性变化特征，各典型日负荷数据详见附录B图B1至图B3。

4.2　场景设置

为了说明本文所提优化配置方法的有效性和合理性，分别采用基本NSGA-Ⅱ[22]、现有主流的多目标人工蜂鸟算法（multi-objective artificial hummingbird algorithm，MOAHA）[23]和本文提出的混合自适应交叉变异的NSGA-Ⅱ（HANSGA-Ⅱ）对算例模型进行求解。假设迭代次数均为300次，种群数量均为100，HANSGA-Ⅱ相关参数详见附录B表B5。

设置以下4个运行场景进行对比分析：

1）场景1：各IES间存在电力、热力交互，使用HANSGA-Ⅱ求解；

2）场景2：各IES间不存在电力、热力交互，使用HANSGA-Ⅱ求解；

3）场景3：各IES间存在电力、热力交互，使用传统NSGA-Ⅱ求解；

4）场景4：各IES间存在电力、热力交互，使用MOAHA求解。

4.3　结果分析

4.3.1　算法对比分析

基于场景1、场景3及场景4将3种算法的运行结果进行比较，通过筛选处理，各自获得40组有效基本解，其对应的Pareto前沿分布与迭代次数如图3所示。

为进一步优化决策，本文采用逼近理想解排序法（technique for order preference by similarity to

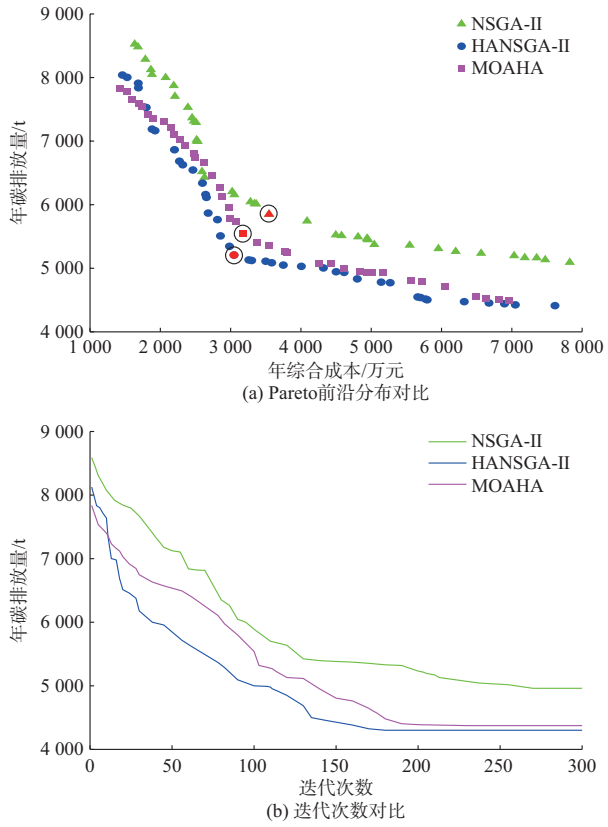


图3 不同算法下的Pareto前沿分布及迭代次数对比
Fig. 3 Comparison of Pareto frontier distribution and iteration times under various algorithms

ideal solution, TOPSIS)对40组基本解进行排序筛选。TOPSIS的核心思想是最优方案应同时最接近理想解(最小综合成本与最小碳排放)且最远离负理想解(最大综合成本与最大碳排放)[24],具体实现详见附录C式(C1)至式(C5)。

图3(a)中的加圈红色标记为3种算法经TOPSIS筛选得到的最优解。对比可见,本文提出的HANSGA-Ⅱ年综合成本为3 048.09万元,较传统NSGA-Ⅱ和MOAHA分别降低14.04%和3.92%;年碳排放量为5 208.16 t,较传统NSGA-Ⅱ和MOAHA分别减少10.97%和6.07%。此外,从图3(b)的收敛曲线可以看出,在相同的种群规模和最大迭代次数下,HANSGA-Ⅱ在约第180次迭代后即趋于收敛,Pareto解集边界逐渐稳定;相比之下,传统NSGA-Ⅱ直到约第270次迭代后才进入收敛阶段,收敛速度明显偏慢;MOAHA的收敛性能居中,约在第220次迭代时趋于稳定。

4.3.2 优化配置结果分析

经优化分析,表1和表2展示了各场景下的容量配置、成本与碳排放结果。场景1相较于场景2,在经济性和环保性上均表现最优,其年综合成本与碳排放量分别降低了19.72%和20.36%。这表明通过IES间的能源共享,系统不仅能大幅降低因外购能源产生的成本和碳排放量,还能通过优化设备容量配置,减少供能设备本身的投资成本及运行碳排放量。场景3、4虽然也考虑了能量交互,但所使用算法的全局搜索能力有限,导致优化过程中易陷入局部最优。相比之下,场景1采用的HANSGA-Ⅱ能更高效地捕捉设备容量的全局最优解,充分验证了所提算法的优越性。

表1 不同场景下的容量配置结果
Table 1 Capacity allocation results in various scenarios

场景	IES	设备容量/kW								储能容量/(kW·h)	
		吸收式制冷机	电制冷机	余热发电机	余热锅炉	燃气轮机	燃气锅炉	电锅炉	光伏	热储能	电储能
1	IES1	643	0	1 500	1 874	3 124	4 150	0	1 100	3 423	3 487
	IES2	570	0	1 391	1 739	2 898	0	0	1 092	3 071	3 108
	IES3	0	428	0	0	0	0	791	1 113	1 480	1 386
2	IES1	700	0	1 745	2 181	3 635	4 339	0	1 327	3 409	3 427
	IES2	585	0	1 513	1 892	3 153	0	0	1 391	3 026	3 003
	IES3	0	491	0	0	0	0	983	1 368	1 350	1 140
3	IES1	726	0	1 688	2 110	3 517	4 289	0	1 100	3 400	3 485
	IES2	526	0	1 398	1 747	2 912	0	0	1 137	3 062	3 109
	IES3	0	451	0	0	0	0	875	1 165	1 324	1 258
4	IES1	627	0	1 591	1 989	3 315	4 052	0	1 141	3 416	3 409
	IES2	515	0	1 460	1 826	3 043	0	0	1 126	3 062	3 102
	IES3	0	409	0	0	0	0	715	1 168	1 319	1 381

需要说明的是,表1所示的设备容量为模型优化得到的理论连续值,在实际工程应用中,应根据这些理论值,结合市场上可获得的设备型号规格,选择与之最接近的商业化设备容量。同时,将选定的实

表2　不同场景下的成本与碳排放量
Table 2　Cost and carbon emissions in various scenarios

场景	年投资成本/元	年购能成本/元	年运维成本/元	年交互成本/元	年收益/元	年综合成本/元	年碳排放量/t
1	8 012 379	15 983 155	5 581 263	2 583 915	1 679 822	30 480 890	5 208.159
2	9 027 093	23 454 392	6 380 303	0	891 723	37 970 065	6 539.288
3	8 422 103	17 861 104	8 041 475	2 331 527	1 195 749	35 460 460	5 849.810
4	8 196 140	16 545 505	5 956 413	2 453 799	1 426 900	31 724 957	5 544.630

际容量代回模型进行效益评估，以确保方案的工程可行性与经济性。

4.3.3　生产用能调整分析

本文以冬季典型日为例，通过一个连续多日的生产周期来分析生产用能的动态调整过程。为体现产业集聚区在生产计划变动前稳定的生产节奏，生产周期内电负荷与热负荷均基于冬季典型日负荷曲线进行多日延展。同时，为反映光伏出力的波动性，本文基于企业所在地的历史气象数据，分别在冬季、夏季和过渡季中筛选出“晴天”“多云天”和“阴雨天”3种代表性天气，构建了生产周期内变化的光伏出力场景。不同天气下的光照强度曲线如附录C图C1所示。

在此仿真设定下，产业集聚区在冬季典型日下根据生产计划变动调整用能需求如附录C所示。图C2至图C4分别展示了3个IES在120 h生产周期内的用能调整时序：IES1覆盖前72 h（1～72 h），IES2居中段72 h（24～96 h），IES3对应后72 h（48～120 h）。结合流程化工序间能源需求的关联性约束，各IES的用能调整时段呈现出24 h的关联间隔，对应上下游工序间的物料传递延迟约束。同时，由于硅原料制备、晶圆加工与封装测试环节分别存在40%与20%的逐级物料损耗，用能调整量在调整系数的影响下亦遵循关联递减关系。例如，IES1在首日11:00电负荷削减385 kW后，IES2于次日同时段电负荷削减量降至308 W（较上游减少20%），最终，IES3在第3日11:00削减277 kW（较中游减少10%），完整体现了流程化工序对用能需求的动态影响，实现了生产负荷在生产周期内的灵活调整。

4.3.4　电热功率优化结果分析

鉴于半导体生产中电负荷受季节影响较小，而热负荷因冬季低温及硅片氧化等高温工序的保温预热需求显著增加，在冬季达到全年峰值。因此，本节仍以冬季典型日为代表开展分析。在完成生产用能调整后，本文进一步对硅原料制备区在连续生产周期内的电热功率优化结果进行研究。图4展示了IES1在不同光伏出力扰动情景（晴天、多云天、阴雨天）下的电热功率运行情况。限于篇幅，IES2与IES1运行情况类似，不作赘述。IES3的运行情况详见附录C图C5。

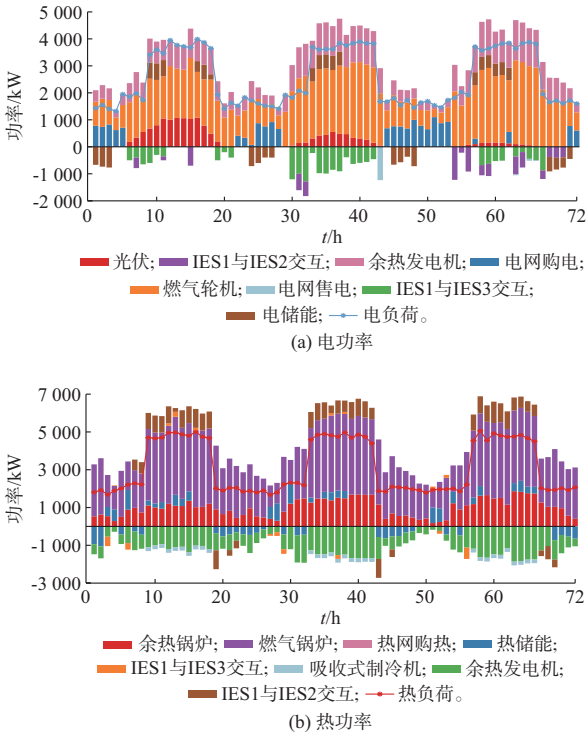


图4　正常工况下的IES1电热功率
Fig. 4　Electrical and thermal power of IES1 under normal operation

IES1涉及硅原料提纯、硅片氧化等耗电耗热巨大的工艺流程，工艺波动剧烈，电热负荷自每日08:00迅速上升，峰值持续至19:00，呈现出“单峰陡峭”特征。高峰时段，系统依托燃气轮机、光伏、余热发电与储能协同供能。燃气轮机作为核心设备，与光伏出力形成动态互补：晴天光伏出力充足，有效降低了其他机组运行成本；阴雨天气则通过提升燃气轮机与余热发电出力补足光伏不足，并将富余电能外供。同时，储能装置在低谷时段充电、高峰时段放电，进一步增强了系统运行灵活性。热能方面，通过配置余热锅炉与余热发电机回收工业余热，结合区域热能互济、燃气锅炉与储热设备，IES1成功摆脱了对上级热网的依赖，实现了生产供热的自给自足。

此外，为进一步验证所提模型在关键设备故障

下的适应性，本文模拟生产周期内某一天IES1燃气轮机与燃气锅炉最大出力骤降50%的运行状态，其仿真结果如图5所示。

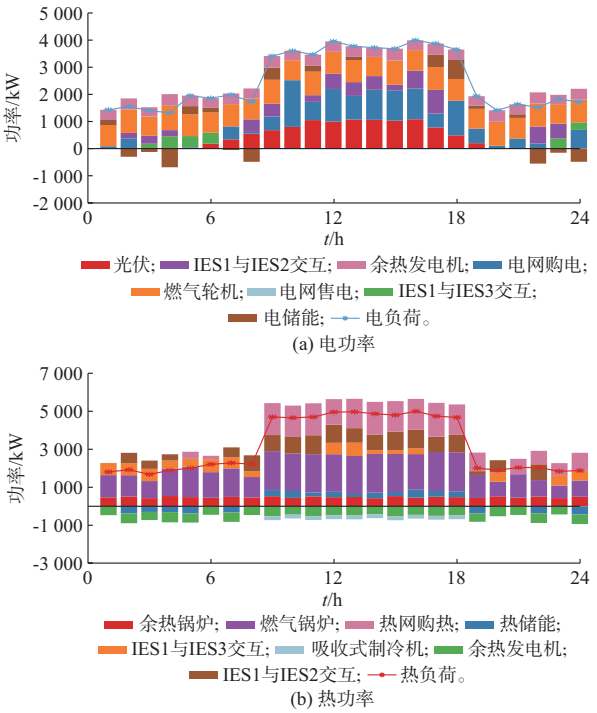


图5 设备故障下IES1电热功率

Fig. 5 Electrical and thermal power of IES1 under equipment fault

在电力方面，为弥补燃气轮机出力不足，系统显著增强与下游IES的电功率交互，实现从下游至上游的逆向支援，有效缓解上游供电压力。在热能供应方面，区域互济的优势更加突出，当燃气锅炉与余热锅炉产热能力同时受限时，IES2与IES3的供热机组几乎全时段满发，向IES1输送远超常规的大功率热能，为核心工艺的热负荷保障提供关键支撑。因此，受关键设备出力严重削弱影响，系统在负荷高峰期面临巨大供能缺口，但通过充分发挥区域间电热协同互济，运行可靠性得到了有效保障。

5 结语

针对工业生产集聚区复杂的产业链结构和多元化的能源需求，本文提出一种融合经济性与环保性的多IES双层优化配置方法。通过仿真验证表明：

1)混合自适应交叉变异的NSGA-Ⅱ通过整合SBX与DE算子，显著提升了全局搜索能力，有效解决了高维解空间下的局部收敛问题。

2)通过工业生产全流程碳排放的考量，在配置设备容量的同时促进各区域进行电热交互，打破了生产链上下游能源互动壁垒，提升了系统经济性和清洁化水平。

3)基于工序关联约束下的用能调整充分考虑流程化工序间能源需求的关联特性，实现了生产负荷在生产周期内的灵活调整。

由此可见，本文所提配置方法具有切实的工程应用价值：一方面，在当前各地大力布局半导体产业的趋势下，该方法可为政府在产业集聚区能源系统前期规划层面提供科学决策依据，通过各区域能源需求特征及上下游工序耦合关系的刻画，优化协调电力、热力等多种资源分配，从而统一部署能源供给设备，避免各入驻企业单独建设导致的设备冗余；另一方面，该配置模型可扩展至钢铁、化工等其他流程型高耗能工业，根据具体工艺流程替换相关能耗参数与关键约束，即可为不同工业园区的节能减排与绿色转型提供针对性的方案支持。

目前，本文对区域热功率交互的研究仅着眼于功率传输，尚未涉及流量、温度等传热学要素，后续将对此进行拓展，使本文研究更具实用价值。

附录见本刊网络版，点击http://www.aeps-info.com/aeps/article/abstract/20250610002，或扫描英文摘要后二维码，可阅读全文。

参 考 文 献

[1] 姜春海，闫振好，王敏.“双碳”目标约束下的能耗双控到碳排放双控：规制工具、效应模拟与政策评价[J].中国工业经济，2024(11)：5-23.
JIANG Chunhai, YAN Zhenhao, WANG Min. From energy consumption control to carbon emission control under the constraint of “dual carbon” goals: regulatory tools, effect simulation and policy evaluation[J]. China Industrial Economics, 2024(11): 5-23.

[2] 黄震，谢晓敏，张庭婷.“双碳”背景下我国中长期能源需求预测与转型路径研究[J].中国工程科学，2022，24(6)：8-18.
HUANG Zhen, XIE Xiaomin, ZHANG Tingting. Medium- and long-term energy demand of China and energy transition pathway toward carbon neutrality[J]. Strategic Study of CAE, 2022, 24(6): 8-18.

[3] 王景洋.工业聚集区碳排放优化调整常用措施研究[J].山西化工，2024，44(4)：265-267.
WANG Jingyang. Common measures for carbon emission optimization and adjustment in industrial clusters [J]. Shanxi Chemical Industry, 2024, 44(4): 265-267.

[4] 孙毅，谷家训，郑顺林，等.考虑广义储能和LCA碳排放的综合能源系统低碳优化运行策略[J].上海交通大学学报，2024，58(5)：647-658.
SUN Yi, GU Jiaxun, ZHENG Shunlin, et al. Low-carbon optimal operation strategy of integrated energy system considering generalized energy storage and LCA carbon emissions [J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2024, 58(5): 647-658.

[5] 曾艾东，邹宇航，郝思鹏，等．考虑阶梯式碳交易机制的园区工业用户综合需求响应策略[J]．高电压技术，2022，48(11)：4352-4363.
ZENG Aidong, ZOU Yuhang, HAO Sipeng, et al. Comprehensive demand response strategy of industrial users in the park considering the stepped carbon trading mechanism[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(11): 4352-4363.

[6] 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)：1409-1421.
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): 1409-1421.

[7] 郭赍佳，洪方驰，王安阳，等．考虑阶段发展的离散制造工业园区优化规划[J]．能源工程，2022，42(1)：82-89.
GUO Lijia, HONG Fangchi, WANG Anyang, et al. Optimization planning of discrete manufacturing industrial parks considering staged development[J]. Energy Engineering, 2022, 42(1): 82-89.

[8] 周苏洋，关奥博，顾伟，等．工业综合能源系统的多工序统一建模与规划[J]．电力系统自动化，2025，49(3)：31-41.
ZHOU Suyang, GUAN Aobo, GU Wei, et al. Unified modeling and planning of industrial integrated energy system with multiple processes[J]. Automation of Electric Power Systems, 2025, 49(3): 31-41.

[9] 廖思阳，肖雨朵，徐箭，等．需求响应下计及高耗能工业负荷生产流程的经济调度模型[J]．电力系统自动化，2025，49(3)：22-30.
LIAO Siyang, XIAO Yuduo, XU Jian, et al. Economic dispatch model considering production process of energy-intensive industrial load under demand response[J]. Automation of Electric Power Systems, 2025, 49(3): 22-30.

[10] 李子晨，夏杨红，孙勇，等．考虑氢能长短周期储能特性的电氢综合能源系统容量配置方法[J]．电网技术，2025，49(1)：12-21.
Ll Zichen, XlA Yanghong, SUN Yong, et al. Optimal sizing of electricity-hydrogen integrated energy system considering multi-timescale operation of hydrogen storage system [J]. Power System Technology, 2025, 49(1): 12-21.

[11] 周勃，李二超．一种考虑风光不确定性的热电混合共享储能双层优化配置方法[J]．太阳能学报，2025，46(3)：189-198.
ZHOU Bo, LI Erchao. A two-layer optimal allocation method for hybrid shared energy storage considering the uncertainty of wind power and photovoltaic[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2025, 46(3): 189-198.

[12] 申鸿帅，吕家君，李更丰，等．考虑热储灵活配置与热网水力热力特性的电热综合能源系统优化规划[J]．电力自动化设备，2024，44(7)：214-222.
SHEN Hongshuai, LV Jiajun, LI Gengfeng, et al. Optimal planning of integrated electrical and thermal energy system considering flexible thermal storage configuration and hydraulic and thermal characteristics of thermal network [J]. Electric Power Automation Equipment, 2024, 44(7): 214-222.

[13] 王海伦，丁一凡，李杨，等．计及混合式抽水蓄能改造的清洁微网分布鲁棒容量优化配置[J]．电工技术学报，2025，40(7)：2112-2126.
WANG Hailun, DING Yifan, LI Yang, et al. Distributionally robust capacity optimization for clean energy microgrid considering pumped-storage retrofitting [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2025, 40(7): 2112-2126.

[14] ZHU X, YANG J, PAN X L, et al. Regional integrated energy system energy management in an industrial park considering energy stepped utilization[J]. Energy, 2020, 201: 117589.

[15] 张逸，孙守铨，谢金勇，等．钢铁工业园区多元制氢系统规划配置研究[J]．新型电力系统，2024，2(4)：445-457.
ZHANG Yi, SUN Shouquan, XIE Jinyong, et al. Research on the planning and configuration of diversified hydrogen production systems in steel industry parks[J]. New Type Power Systems, 2024, 2(4): 445-457.

[16] 喻磊，王扬，林心昊，等．基于膝点驱动的低碳工业综合能源系统多目标运行策略[J/OL]．南方电网技术：1-8[2024-10-30]. https://nfdwjs. csg. cn/gatewayweb/zh/debutDetail. htmlserial Num=20240612004.
YU Lei, WANG Yang, LIN Xinhao, et al. Multi-objective operation strategy for low carbon industrial integrated energy system based on knee point-driven [J/OL]. Southern Power System Technology: 1-8[2024-10-30]. https://nfdwjs.csg.cn/gatewayweb/en/debutDetail.htmlserialNum=20240612004.

[17] 王永利，刘泽强，陈鑫，等．基于梯级利用的工业园区综合能源系统双层优化[J]．科学技术与工程，2024，24(29)：12595-12603.
WANG Yongli, LIU Zeqiang, CHEN Xin, et al. Bi-level optimization of industrial park integrated energy system based on cascaded utilization[J]. Science Technology and Engineering, 2024, 24(29): 12595-12603.

[18] 黄洪斌，蔡乐才，肖体刚，等．基于NSGA-Ⅱ改进GSO算法的并网型微电网多目标优化调度研究[J]．四川轻化工大学学报(自然科学版)，2020，33(6)：24-31.
HUANG Hongbin, CAI Lecai, XIAO Tigang, et al. Research on multi-objective optimal scheduling of grid-connected microgrid based on improved GSO algorithm by NSGA-Ⅱ[J]. Journal of Sichuan University of Science & Engineering (Natural Science Edition), 2020, 33(6): 24-31.

[19] 陈鑫，王果，闵永智，等．计及低碳与经济的配电网源-网-荷-储协同规划模型[J]．电力系统保护与控制，2025，53(7)：1-15.
CHEN Xin, WANG Guo, MIN Yongzhi, et al. A source-network-load-storage collaborative planning model for a distribution network considering low carbon and economy[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(7): 1-15.

[20] 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)：3680-3690.
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): 3680-3690.

[21] 宋晓通，孙艺，刘欣博，等．计及能量互济的多区域综合能源系统多目标双层优化[J]．高电压技术，2024，50(4)：1426-1435.

SONG Xiaotong, SUN Yi, LIU Xinbo, et al. Multi-objective bi-level optimization of multi-regional integrated energy systems considering energy mutual aid[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(4): 1426-1435.

[22] XU Z M, CHANG B H, LU A J. Multi-objective operation optimization of regional integrated energy system based on NSGA-Ⅱ algorithm[J]. E3S Web of Conferences, 2021, 257: 2022.

[23] 卢子敬,李子寿,郭相国,等.基于多目标人工蜂鸟算法的电-氢混合储能系统最优配置[J].中国电力,2023,56(7):33-42.
LU Zijing, LI Zishou, GUO Xiangguo, et al. Optimal configuration of electricity-hydrogen hybrid energy storage system based on multi-objective artificial hummingbird algorithm[J]. Electric Power, 2023, 56(7): 33-42.

[24] 杨晓辉,邓福伟,张钟炼,等.基于自适应ε约束法考虑OLTC模糊控制的低碳配电网双层规划[J].电力系统保护与控制,2023,51(13):1-11.
YANG Xiaohui, DENG Fuwei, ZHANG Zhonglian, et al. Bi-level planning for low-carbon distribution networks based on an adaptive ε-constraint method considering OLTC fuzzy control[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(13): 1-11.

梁　睿(1981—),男,通信作者,博士,教授,博士生导师,主要研究方向:电力系统自动化、综合能源系统优化运行、供配电安全与保护。E-mail:liangrui@cumt.edu.cn

陈逸翔(2001—),男,硕士研究生,主要研究方向:综合能源系统优化运行。E-mail:ts23230082p31@cumt.edu.cn

丁宣升(2001—),男,硕士研究生,主要研究方向:综合能源系统优化运行。E-mail:ts23230011a31@cumt.edu.cn

(编辑　章黎)

Integrated Energy Optimal Configuration for Energy Demand in Process of Service Industry Agglomeration Zones

LIANG Rui[1], *CHEN Yixiang*[1], *DING Xuansheng*[1], *CHEN Shuguang*[1], *WANG Fei*[1,2], *ZHANG Xiao*[2]

(1. School of Electrical Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China;
2. Xuzhou Power Supply Company of State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Xuzhou 221000, China)

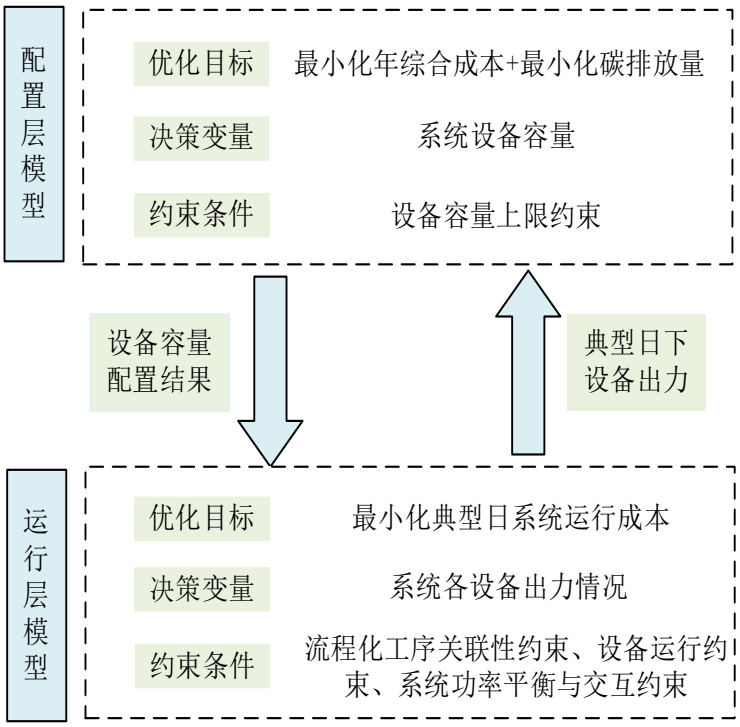
Abstract: Industry agglomeration zones encompass the entire industrial production process, and their complex industrial chain structures and diversified energy demands offer significant potential for the optimal configuration and carbon emission reduction. To this end, an integrated energy optimal configuration method for the energy demand in the process of service industry agglomeration zones is proposed. First, based on the differentiated energy utilization demands in various production stages, the energy supply of the industry agglomeration zones is divided into multiple integrated energy systems that serve distinct industrial processes. Then, taking the system operation economy and carbon emissions throughout the entire industrial production process as optimization objectives, a bi-level integrated energy optimal configuration model is constructed. Finally, taking a semiconductor industry agglomeration zone as an example and considering the correlation constraints in the process of energy demands, an improved non-dominated sorting genetic algorithm (NSGA-Ⅱ) by hybrid adaptive crossover-mutation is used to optimize the equipment capacity configuration based on flexible energy utilization in the industrial production. Simulation results demonstrate that the proposed configuration method achieves optimal configuration of multiple integrated energy systems while balancing the operation economy and carbon emission reduction requirements of industry agglomeration zones.

This work is supported by Jiangsu Provincial Science and Technology Innovation Special Fund for Carbon Emission Peak and Carbon Neutrality (No. BE2022609) and Xuzhou Special Fund for "Dual Carbon" Basic Research Project (No. KC23076).

Key words: industry agglomeration zone; integrated energy system; process correlation; optimal configuration; hybrid adaptive crossover-mutation

附录A

A1 优化配置模型



图A1　双层优化配置模型
Fig. A1　Bi-level optimization configuration model

A2 碳排放模型

1）供能设备碳排放

$$\begin{cases} E_{\mathrm{GT}}=\sigma_{\mathrm{GT}}\sum_{t=1}^{24}P_{m,i,\mathrm{GT}}(t) \\ E_{\mathrm{GB}}=\sigma_{\mathrm{GB}}\sum_{t=1}^{24}Q_{m,i,\mathrm{GB}}(t) \\ E_{\mathrm{WHB}}=\sigma_{\mathrm{WHB}}\sum_{t=1}^{24}Q_{m,i,\mathrm{WHB}}(t) \end{cases} \tag{A1}$$

式中：E_{GT}为燃气轮机碳排放；E_{GB}和E_{WHB}分别为燃气锅炉和余热锅炉碳排放；σ_{GT}为燃气轮机碳排放系数；σ_{GB}和σ_{WHB}分别为燃气锅炉和余热锅炉的碳排放系数；$P_{m,i,\mathrm{GT}}(t)$为第m个IES在典型日i下t时刻燃气轮机出力；$P_{m,i,\mathrm{GB}}(t)$和$Q_{m,i,\mathrm{WHB}}(t)$分别为第m个IES在典型日i下t时刻燃气锅炉和余热锅炉出力。

2）薄膜沉积碳排放

$$\begin{cases} E_{\mathrm{FC}}=\mu_{\mathrm{FC}}\sum_{t=1}^{24}V_{i,\mathrm{FC}}(t) \\ V_{i,\mathrm{FC}}(t)=\partial_{\mathrm{FC}}Q_{i,\mathrm{FC}}(t) \end{cases} \tag{A2}$$

式中：E_{FC}为薄膜沉积产生的碳排放；$V_{i,\mathrm{FC}}(t)$为典型日i下t时刻薄膜沉积消耗的化学原料气；μ_{FC}为薄膜沉积消耗单位体积化学原料气产生的碳排放；$Q_{i,\mathrm{FC}}(t)$为典型日i下t时刻薄膜沉积所需热负荷；∂_{FC}为热负荷与化学原料气的转换系数。

3）硅片氧化碳排放

$$\begin{cases} E_{\mathrm{SR}} = \sigma_{\mathrm{SR}} \sum_{t=1}^{24} O_{i,\mathrm{SR}}(t) \\ O_{i,\mathrm{SR}}(t) = \partial_{\mathrm{SR}} Q_{i,\mathrm{SR}}(t) \end{cases} \tag{A3}$$

式中：E_{SR}为硅片氧化的碳排放；σ_{SR}为化石燃料燃烧的碳排放系数；$O_{i,\mathrm{SR}}(t)$为典型日i下t时刻硅片氧化消耗的化石燃料；$Q_{i,\mathrm{SR}}(t)$为典型日i下t时刻硅片氧化所需热负荷；∂_{SR}为热负荷与化石燃料的转换系数。

4)企业购能碳排放

$$E_{\mathrm{MAR}} = \sum_{t=1}^{24} [\sigma_{\mathrm{e}} P_{m,i,\mathrm{outbuy}}(t) + \sigma_{\mathrm{h}} Q_{m,i,\mathrm{outbuy}}(t)] \tag{A4}$$

式中：E_{MAR}为企业购能碳排放；$P_{m,i,\mathrm{outbuy}}(t)$为第$m$个IES在典型日$i$下$t$时刻向上级电网购电量；$Q_{m,i,\mathrm{outbuy}}(t)$为第$m$个IES在典型日$i$下$t$时刻向上级热网购热量；$\sigma_{\mathrm{e}}$为购电碳排放系数；$\sigma_{\mathrm{h}}$为购热碳排放系数。

A3 设备模型

1)燃气锅炉设备模型

$$\begin{cases} Q_{m,\mathrm{GB}}(t) = \eta_{\mathrm{GB}} \varepsilon_{\mathrm{gas}} V_{m,\mathrm{GB}}(t) \\ \Delta Q_{\mathrm{GB,min}} \leqslant Q_{m,\mathrm{GB}}(t+1) - Q_{m,\mathrm{GB}}(t) \leqslant \Delta Q_{\mathrm{GB,max}} \\ 0 \leqslant Q_{m,\mathrm{GB}}(t) \leqslant Q_{\mathrm{GB,max}} \end{cases} \tag{A5}$$

式中：$Q_{m,\mathrm{GB}}(t)$为第m个IES中燃气锅炉在t时刻输出的热功率；$V_{m,\mathrm{GB}}(t)$为第m个IES中燃气锅炉在t时刻的耗气量；η_{GB}为燃气锅炉的制热效率；$\varepsilon_{\mathrm{gas}}$为天然气热值；$\Delta Q_{\mathrm{GB,max}}$和$\Delta Q_{\mathrm{GB,min}}$分别为燃气锅炉热功率爬坡上限和下限；$Q_{\mathrm{GB,max}}$为燃气锅炉待配置容量。

2)燃气轮机设备模型

$$\begin{cases} P_{m,\mathrm{GT}}(t) = \eta_{\mathrm{GT}} V_{m,\mathrm{GT}}(t) \\ \Delta P_{\mathrm{GT,min}} \leqslant P_{m,\mathrm{GT}}(t+1) - P_{m,\mathrm{GT}}(t) \leqslant \Delta P_{\mathrm{GT,max}} \\ 0 \leqslant P_{m,\mathrm{GT}}(t) \leqslant P_{\mathrm{GT,max}} \end{cases} \tag{A6}$$

式中：$P_{m,\mathrm{GT}}(t)$为第m个IES中燃气轮机在t时刻输出的电功率；$V_{m,\mathrm{GT}}(t)$为第m个IES中燃气轮机在t时刻的耗气量；η_{GT}为燃气轮机的发电效率；$\Delta P_{\mathrm{GT,max}}$和$\Delta P_{\mathrm{GT,min}}$分别为燃气轮机电功率爬坡上限和下限；$P_{\mathrm{GT,max}}$为燃气轮机待配置容量。

3)余热锅炉设备模型

$$\begin{cases} Q_{m,\mathrm{GT}}(t) = \alpha_{\mathrm{GT}} P_{m,\mathrm{GT}}(t) \\ Q_{m,\mathrm{WHB}}(t) = \alpha_{\mathrm{WHB}} Q_{m,\mathrm{GT}}(t) \\ 0 \leqslant Q_{m,\mathrm{WHB}}(t) \leqslant Q_{\mathrm{WHB,max}} \end{cases} \tag{A7}$$

式中：$Q_{m,\mathrm{GT}}(t)$为第m个IES中燃气轮机在t时刻输出的热功率；α_{GT}为燃气轮机的热电比；α_{WHB}为燃气轮机余热被余热锅炉回收的比例；$Q_{m,\mathrm{WHB}}(t)$为第m个IES中余热锅炉在t时刻回收的热量；$Q_{\mathrm{WHB,max}}$为余热锅炉待配置容量。

4)余热发电设备模型

$$\begin{cases} Q_{m,\mathrm{WHG}}(t) = \alpha_{\mathrm{WHG}} Q_{m,\mathrm{GT}}(t) \\ P_{m,\mathrm{WHG}}(t) = \eta_{\mathrm{WHG}} Q_{m,\mathrm{WHG}}(t) \\ \Delta P_{\mathrm{WHG,min}} \leqslant P_{m,\mathrm{WHG}}(t+1) - P_{m,\mathrm{WHG}}(t) \leqslant \Delta P_{\mathrm{WHG,max}} \\ 0 \leqslant P_{m,\mathrm{WHG}}(t) \leqslant P_{\mathrm{WHG,max}} \end{cases} \tag{A8}$$

式中：$Q_{m,\mathrm{WHG}}(t)$为第m个IES中余热发电在t时刻吸收的热功率；α_{WHG}为燃气轮机余热被余热发电机组回收的比例；η_{WHG}为余热发电及组的热转电效率；$P_{m,\mathrm{WHG}}(t)$为第m个IES中余热发电机在t时刻的发电功率；$\Delta P_{\mathrm{WHG,max}}$和$\Delta P_{\mathrm{WHG,min}}$分别为余热发电机功率爬坡上限和下限；$P_{\mathrm{WHG,max}}$为余热发电机待配置容量。

5)吸收式制冷机设备模型

$$\begin{cases} C_{m,\mathrm{AR}}(t)=\eta_{\mathrm{AR}}Q_{m,\mathrm{AR}}(t) \\ \Delta C_{\mathrm{AR,min}}\leqslant C_{m,\mathrm{AR}}(t+1)-C_{m,\mathrm{AR}}(t)\leqslant\Delta C_{\mathrm{AR,max}} \\ 0\leqslant C_{m,\mathrm{AR}}(t)\leqslant C_{\mathrm{AR,max}} \end{cases} \tag{A9}$$

式中：$C_{m,\mathrm{AR}}(t)$为第m个IES中吸收式制冷机在t时刻输出的冷功率；$Q_{m,\mathrm{AR}}(t)$为第m个IES中吸收式制冷机在t时刻吸收的热功率；η_{AR}为吸收式制冷机的制冷效率；$\Delta C_{\mathrm{AR,max}}$和$\Delta C_{\mathrm{AR,min}}$分别为制冷功率爬坡上限和下限；$C_{\mathrm{AR,max}}$为吸收式制冷机待配置容量。

6）电锅炉设备模型

$$\begin{cases} Q_{m,\mathrm{EB}}(t)=\eta_{\mathrm{EB}}P_{m,\mathrm{EB}}(t) \\ \Delta Q_{\mathrm{EB,min}}\leqslant Q_{m,\mathrm{EB}}(t+1)-Q_{m,\mathrm{EB}}(t)\leqslant\Delta Q_{\mathrm{EB,max}} \\ 0\leqslant Q_{m,\mathrm{EB}}(t)\leqslant Q_{\mathrm{EB,max}} \end{cases} \tag{A10}$$

式中：$Q_{m,\mathrm{EB}}(t)$为第m个IES中电锅炉在t时刻输出的热功率；$P_{m,\mathrm{EB}}(t)$为第m个IES中电锅炉在t时刻输入的电功率；η_{EB}为电锅炉转换效率；$\Delta Q_{\mathrm{EB,max}}$和$\Delta Q_{\mathrm{EB,min}}$分别为电锅炉热功率爬坡上限和下限；$Q_{\mathrm{EB,max}}$为电锅炉待配置容量。

7）电制冷机设备模型

$$\begin{cases} C_{m,\mathrm{ER}}(t)=\eta_{\mathrm{ER}}P_{m,\mathrm{ER}}(t) \\ \Delta C_{\mathrm{ER,min}}\leqslant C_{m,\mathrm{ER}}(t+1)-C_{m,\mathrm{ER}}(t)\leqslant\Delta C_{\mathrm{ER,max}} \\ 0\leqslant C_{m,\mathrm{ER}}(t)\leqslant C_{\mathrm{ER,max}} \end{cases} \tag{A11}$$

式中：$P_{m,\mathrm{ER}}(t)$为第m个IES中电制冷机在t时刻输入的电功率；$C_{m,\mathrm{ER}}(t)$为第m个IES中电制冷机在t时刻输出的冷功率；η_{ER}为电制冷机的制冷效率；$\Delta C_{\mathrm{ER,max}}$和$\Delta C_{\mathrm{ER,min}}$分别为电制冷机冷功率爬坡上限和下限；$C_{\mathrm{ER,max}}$为电制冷机待配置容量。

8）热储能设备模型

$$\begin{cases} 0\leqslant Q_{m,\mathrm{TSin}}(t)\leqslant Q_{\mathrm{TSin,max}} \\ 0\leqslant Q_{m,\mathrm{TSout}}(t)\leqslant Q_{\mathrm{TSout,max}} \\ S_{m,\mathrm{TS}}(t)=S_{m,\mathrm{TS}}(t-1)+\left(\eta_{\mathrm{TSin}}x_{\mathrm{TSin}}(t)Q_{m,\mathrm{TSin}}(t)-\dfrac{x_{\mathrm{TSout}}(t)Q_{m,\mathrm{TSout}}(t)}{\eta_{\mathrm{TSout}}}\right)\Delta t \\ 0\leqslant S_{m,\mathrm{TS}}(t)\leqslant S_{\mathrm{TS,max}} \\ x_{\mathrm{TSin}}(t)+x_{\mathrm{TSout}}(t)\leqslant 1 \\ (1-\eta_{\mathrm{TSloss}})\sum\limits_{t=1}^{24}[\eta_{\mathrm{TSin}}x_{\mathrm{TSin}}(t)Q_{m,\mathrm{TSin}}(t)]\Delta t- \\ \sum\limits_{t=1}^{24}\left(\dfrac{(x_{\mathrm{TSout}}(t)Q_{m,\mathrm{TSout}}(t))}{\eta_{\mathrm{TSout}}}\right)\Delta t\geqslant 0 \end{cases} \tag{A12}$$

式中：$Q_{m,\mathrm{TSin}}(t)$和$Q_{m,\mathrm{TSout}}(t)$分别为第m个IES中储热设备在t时刻储热和放热功率；$Q_{\mathrm{TSin,max}}$和$Q_{\mathrm{TSout,max}}$分别为储热装置最大储热和放热功率；η_{TSin}和η_{TSout}分别为储热设备的储热和放热效率；$x_{\mathrm{TSin}}(t)$和$x_{\mathrm{TSout}}(t)$分别为储热设备在t时刻的储热和放热状态变量；η_{TSloss}为热量耗散系数；$S_{m,\mathrm{TS}}(t)$为第m个IES中储热设备在t时刻的储热量；$S_{\mathrm{TS,max}}$为储热设备待配置容量。

9）电储能设备模型

$$\begin{cases} 0 \leqslant P_{m,\mathrm{ESin}}(t) \leqslant P_{\mathrm{ESin,max}} \\ 0 \leqslant P_{m,\mathrm{ESout}}(t) \leqslant P_{\mathrm{ESout,max}} \\ S_{m,\mathrm{OC}}(t) = S_{m,\mathrm{OC}}(t-1) + \left(\dfrac{\eta_{\mathrm{ESin}} x_{\mathrm{ESin}}(t) P_{m,\mathrm{ESin}}(t)}{S_{\mathrm{ES}}} - \dfrac{x_{\mathrm{ESout}}(t) P_{m,\mathrm{ESout}}(t)}{S_{\mathrm{ES}} \eta_{\mathrm{ESout}}} \right) \Delta t \\ 0 \leqslant S_{m,\mathrm{OC}}(t) \leqslant S_{\mathrm{ES}} \\ x_{\mathrm{ESin}}(t) + x_{\mathrm{ESout}}(t) \leqslant 1 \\ \sum_{t=1}^{24} \left(\eta_{\mathrm{ESin}} x_{\mathrm{ESin}}(t) P_{m,\mathrm{ESin}}(t) - \dfrac{(x_{\mathrm{ESout}}(t) P_{m,\mathrm{ESout}}(t))}{\eta_{\mathrm{ESout}}} \right) \Delta t = 0 \end{cases} \tag{A13}$$

式中：$P_{m,\mathrm{ESin}}(t)$和$P_{m,\mathrm{ESout}}(t)$分别为第m个IES中储电设备在t时刻充电和放电功率；$P_{\mathrm{ESin,max}}$和$P_{\mathrm{ESout,max}}$分别为储电设备最大充电和放电功率；η_{ESin}和η_{ESout}分别为储电设备充电和放电效率；$x_{\mathrm{ESin}}(t)$和$x_{\mathrm{ESout}}(t)$分别为储电设备在t时刻的充电和放电状态变量；$S_{m,\mathrm{OC}}(t)$为第m个IES中储电设备在t时刻的储电量；S_{ES}为储电设备待配置容量。

10)光伏发电设备模型

$$\begin{cases} P_{m,\mathrm{PV}}(t) = \eta_{\mathrm{PV}} S_{m,\mathrm{PV}} T_{\mathrm{solar}}(t) \\ 0 \leqslant P_{m,\mathrm{PV}}(t) \leqslant P_{\mathrm{PV,max}} \end{cases} \tag{A14}$$

式中：$P_{m,\mathrm{PV}}(t)$为第m个IES中光伏发电在t时刻的输出功率；η_{PV}为光伏发电效率；$S_{m,\mathrm{PV}}$为第m个IES光伏板面积；$T_{\mathrm{solar}}(t)$为t时刻光照强度；$P_{\mathrm{PV,max}}$为光伏发电待配置容量。

A4 功率交互与平衡约束

1)电功率平衡约束

$$P_{m,\mathrm{load,adj}}(t) = P_{m,\mathrm{load}}(t) + P_{j,\mathrm{adj}}(t) \tag{A15}$$

$$\begin{aligned} P_{m,\mathrm{load,adj}}(t) = {} & P_{m,\mathrm{WHG}}(t) + P_{m,\mathrm{PV}}(t) + P_{m,\mathrm{inbuy}}(t) + P_{m,\mathrm{GT}}(t) - \\ & P_{m,\mathrm{outsale}}(t) - P_{m,\mathrm{EB}}(t) + P_{m,\mathrm{ESin}}(t) - P_{m,\mathrm{ER}}(t) - \\ & P_{m,\mathrm{insale}}(t) + P_{m,\mathrm{outbuy}}(t) - P_{m,\mathrm{ESout}}(t) \end{aligned} \tag{A16}$$

式中：$P_{m,\mathrm{load,adj}}(t)$为第$m$个IES在$t$时刻生产计划变动调整后的电负荷；$P_{m,\mathrm{load}}(t)$为第$m$个IES在$t$时刻调整前电负荷；$P_{j,\mathrm{adj}}(t)$为$t$时刻环节$j$电负荷的调整量。

2)热功率平衡约束

$$Q_{m,\mathrm{load,adj}}(t) = Q_{m,\mathrm{load}}(t) + Q_{j,\mathrm{adj}}(t) \tag{A17}$$

$$\begin{aligned} Q_{m,\mathrm{load,adj}}(t) = {} & Q_{m,\mathrm{EB}}(t) - Q_{m,\mathrm{WHG}}(t) + Q_{m,\mathrm{GB}}(t) + Q_{m,\mathrm{WHB}}(t) - \\ & Q_{m,\mathrm{AR}}(t) + Q_{m,\mathrm{TSin}}(t) - Q_{m,\mathrm{TSout}}(t) + Q_{m,\mathrm{inbuy}}(t) - \\ & Q_{m,\mathrm{outsale}}(t) - Q_{m,\mathrm{insale}}(t) + Q_{m,\mathrm{outbuy}}(t) \end{aligned} \tag{A18}$$

式中：$Q_{m,\mathrm{load,adj}}(t)$为第$m$个IES在$t$时刻生产计划变动调整后的热负荷；$Q_{m,\mathrm{load}}(t)$为第$m$个IES在$t$时刻调整前热负荷；$Q_{j,\mathrm{adj}}(t)$为$t$时刻环节$j$热负荷的调整量。

3)冷功率平衡约束

$$C_{m,\mathrm{load}}(t) = C_{m,\mathrm{AR}}(t) + C_{m,\mathrm{ER}}(t) \tag{A19}$$

式中：$C_{m,\mathrm{load}}(t)$为第m个IES在t时刻的冷负荷。

4)系统与上级电网/上级热网功率交互约束

$$\begin{cases} 0 \leqslant P_{m,\mathrm{outbuy}}(t) \leqslant P_{\mathrm{max,outbuy}} x_{\mathrm{m,outbuy}}(t) \\ 0 \leqslant P_{m,\mathrm{outsale}}(t) \leqslant P_{\mathrm{max,outsale}} x_{m,\mathrm{outsale}}(t) \\ x_{m,\mathrm{outbuy}}(t) + x_{m,\mathrm{outsale}}(t) \leqslant 1 \end{cases} \tag{A20}$$

式中：$P_{\mathrm{max,outbuy}}$和$P_{\mathrm{max,outsale}}$分别为IES向电网购电和售电功率上限，本文取1800kW；$x_{\mathrm{m,outbuy}}(t)$和$x_{m,\mathrm{outsale}}(t)$分别为第$m$个IES在$t$时刻向电网购电和售电的状态变量，热网同理在这里不做赘述。

5)IES间电/热功率交互约束

$$\begin{cases}\sum_{m=1}^{3}\sum_{t=1}^{24}P_{m,\text{insale}}(t)=\sum_{m=1}^{3}\sum_{t=1}^{24}P_{m,\text{inbuy}}(t)\\0\leqslant P_{m,\text{inbuy}}(t)\leqslant P_{\text{in,max}}x_{m,\text{inbuy}}(t)\\0\leqslant P_{m,\text{insale}}(t)\leqslant P_{\text{in,max}}x_{m,\text{insale}}(t)\\x_{m,\text{inbuy}}(t)+x_{m,\text{insale}}(t)\leqslant 1\end{cases}\tag{A21}$$

式中：$P_{\text{in,max}}$为IES间电功率传输上限，本文取1500kW；$x_{m,\text{inbuy}}(t)$和$x_{m,\text{insale}}(t)$分别为IES间在t时刻购电和售电的状态变量；热功率同理在这里不做赘述。

附录B

表B1　待配置设备成本参数
Table B1　Equipment cost parameters to be configured

设备	运维成本/[元/(kW·h)]	单位投资成本/(元/kW)	寿命/年
光伏发电系统	0.059	6000	25
电储能	0.023	544	5
余热发电机	0.073	5285	15
余热锅炉	0.17	500	15
燃气轮机	0.069	4285	15
燃气锅炉	0.066	782	15
电锅炉	0.066	1047	15
热储能	0.073	102	20
吸收式制冷机	0.043	789	15
电制冷机	0.045	598	15

表B2　待配置设备运行参数
Table B2　Equipment operating parameters to be configured

参数	取值	参数	取值
η_{PV}	0.15	$\eta_{\text{TS,in}}$	0.94
$\eta_{\text{TS,loss}}$	0.05	η_{WHG}	0.8
$\eta_{\text{ES,in}}$	0.98	$\eta_{\text{TS,out}}$	0.95
$\eta_{\text{ES,out}}$	0.99	η_{GB}	0.9
η_{GT}	0.42	ε_{gas}	9.44
α_{GT}	1.2	η_{EB}	0.98
α_{WHB}	0.5	η_{AR}	1.2
α_{WHG}	0.5	η_{ER}	3.5

表B3　能源价格
Table B3　Energy price

时段	电网购电/[元/(kW·h)]	电网售电/[元/(kW·h)]	区域电价/[元/(kW·h)]	热网购热/[元/(kW·h)]	热网售热/[元/(kW·h)]	区域热价/[元/(kW·h)]	天然气价/[元/(kW·h)]
23:00—07:00	0.41	0.19	0.20	0.60	0.18	0.16	0.387
08:00—11:00，15:00—18:00	0.74	0.19	0.20	0.60	0.18	0.16	0.387
12:00—14:00，19:00—22:00	1.2	0.19	0.20	0.60	0.18	0.16	0.387

表 B4 半导体生产相关参数
Table B4 Parameters related to semiconductor manufacturing

符号	参数值	符号	参数值
$\delta_{1,2}$	24 h	σ_{WHB}	0.108 kg/(kW·h)
$\delta_{2,3}$	24 h	σ_{GT}	0.124 kg/(kW·h)
$\mu_{1,2}$	40%	σ_{GB}	0.109 kg/(kW·h)
$\mu_{2,3}$	20%	∂_{FC}	0.017 m^3/MJ
ξ_{P}	0.5	∂_{SR}	0.021 kg/MJ
ξ_{Q}	0.25	σ_e	0.672 kg/(kW·h)
μ_{FC}	2.162 kg/m^3	σ_h	0.470 kg/(kW·h)

表 B5 算法相关参数
Table B5 Parameters related to algorithm

参数名称	参数值
种群大小	100
$K_{\max}$	300
η_{sbx}	0.7
$\eta_{\mathrm{SBX}}^{\min}$	0.2
$\eta_{\mathrm{SBX}}^{\max}$	0.8
$F_{\max}$	0.4
$F_{\min}$	0.9
μ^0	10
$\Delta\mu$	0.1

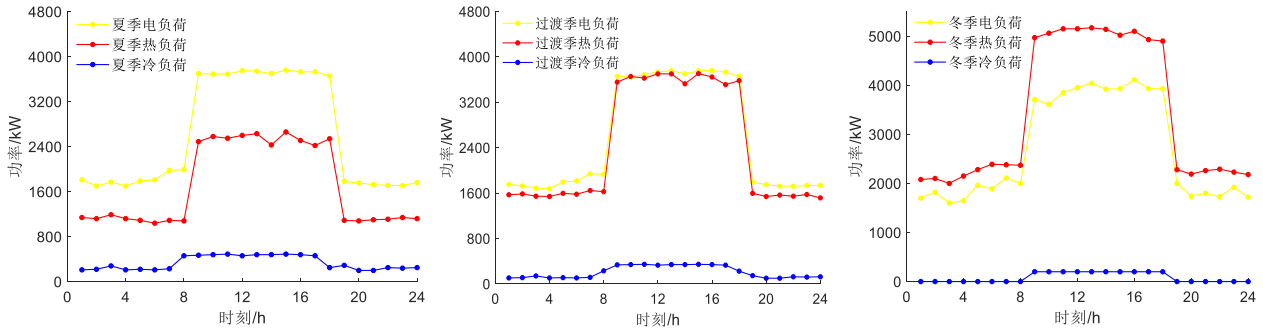


图 B1 IES1 典型日负荷
Fig. B1 Typical day of IES1

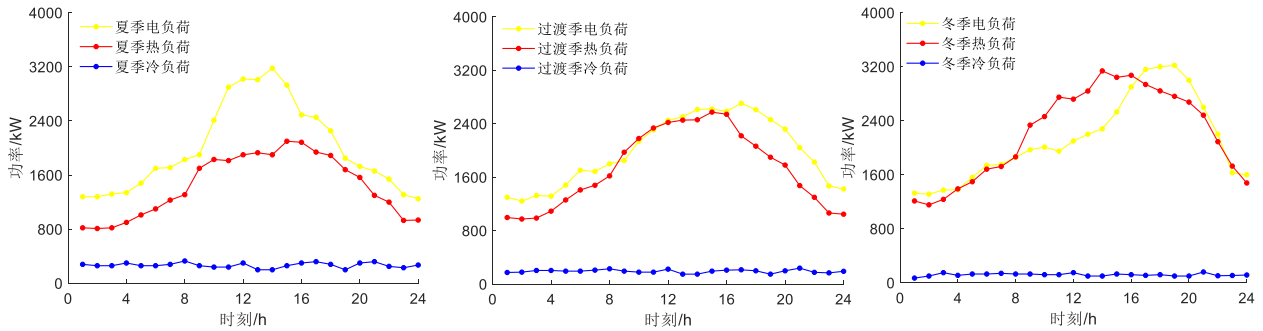


图 B2 IES2 典型日负荷
Fig. B2 Typical day of IES2

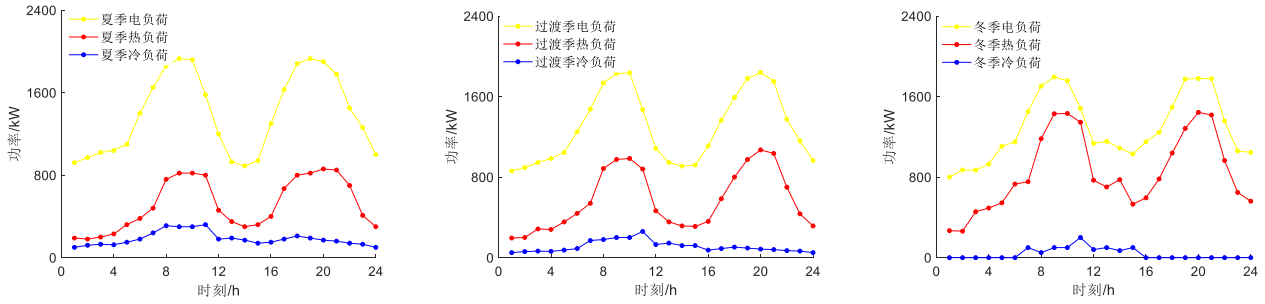


图 B3　IES3 典型日负荷
Fig. B3　Typical day of IES3

附录 C

1）对于每个决策方案 a，计算其评价指标构成决策矩阵 $\boldsymbol{X}$，进一步计算加权归一化矩阵 $\boldsymbol{V}$。

$$\boldsymbol{X}=\begin{bmatrix} C_1 & E_1 \\ C_2 & E_2 \\ \vdots & \vdots \\ C_{40} & E_{40} \end{bmatrix} \tag{C1}$$

$$v_{ab}=z_b\frac{y_{ab}}{\sqrt{\sum_{a=1}^{A}y_{ab}^2}} \tag{C2}$$

式中：C_1 为第一组解的年综合成本；E_1 为第一组解的年碳排放量；v_{ab} 为归一化决策矩阵元素；z_b 为第 b 个目标的权重；y_{ab} 为 Pareto 解集元素；A 为 Pareto 解的个数，这里取 40。

2）从归一化矩阵中确定目标 b 正理想解 v_b^+ 与负理想解 v_b^-，计算各方案与正理想解的距离 U_a^+ 与负理想解的距离 U_a^-。

$$\begin{cases} v_b^+=\min(v_{ab}) \\ v_b^-=\max(v_{ab}) \end{cases} \tag{C3}$$

$$\begin{cases} U_a^+=\sqrt{\sum_{b=1}^{2}(v_{ab}-v_b^+)^2} \\ U_a^-=\sqrt{\sum_{b=1}^{2}(v_{ab}-v_b^-)^2} \end{cases} \tag{C4}$$

3）计算评价指标 f_a 并排序，最大值即为最优解。

$$f_a=\frac{U_a^-}{U_a^++U_a^-} \tag{C5}$$

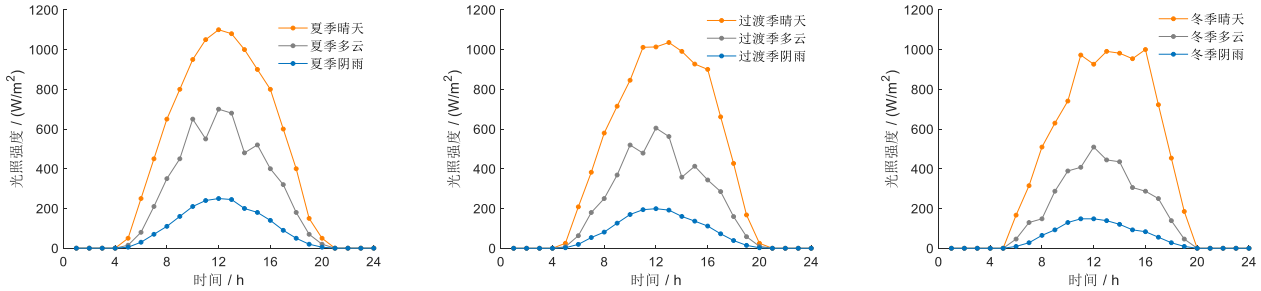


图 C1　各典型日不同天气下光照强度

Fig. C1　Solar irradiance profiles for typical days under various weather scenarios

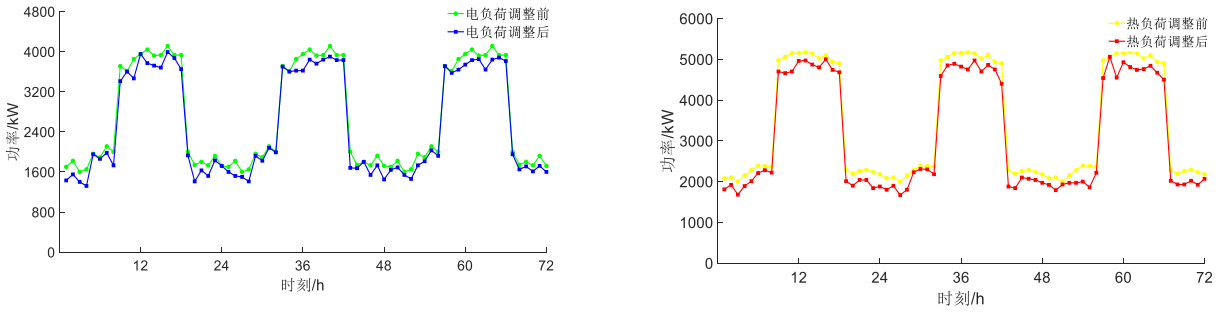


图 C2　IES1 负荷调整前后对比图

Fig. C2　Before and after adjustment comparison of IES1

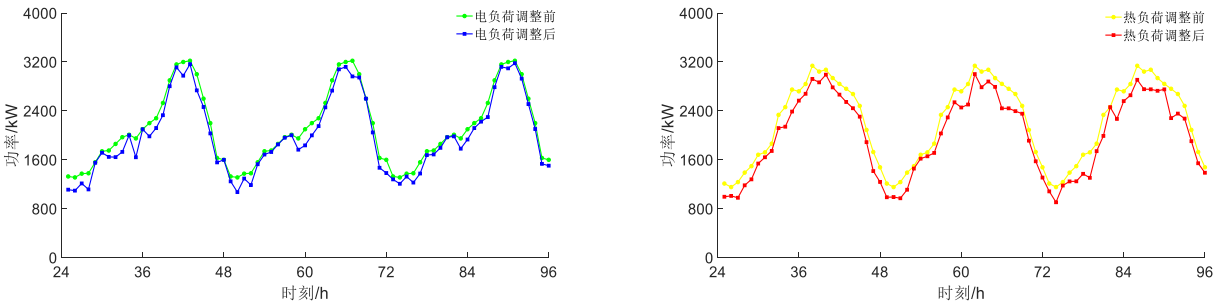


图 C3　IES2 负荷调整前后对比图

Fig. C3　Before and after adjustment comparison of IES2 loa

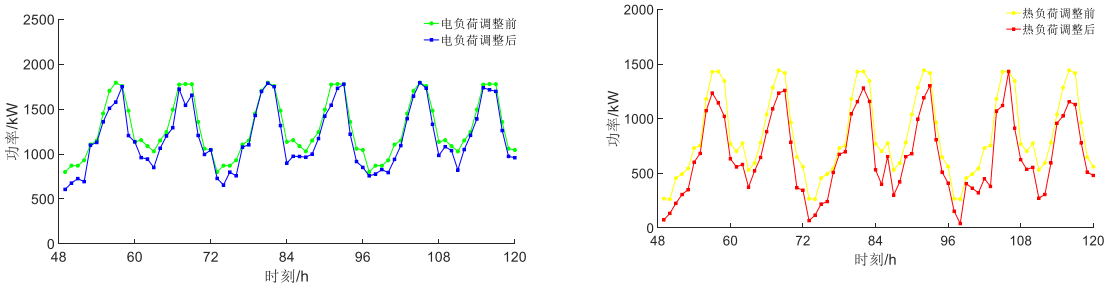
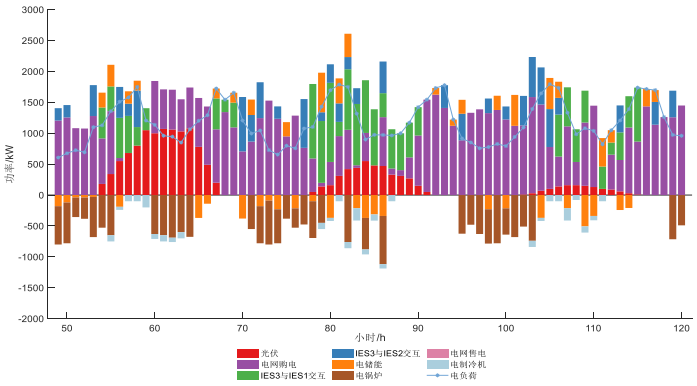
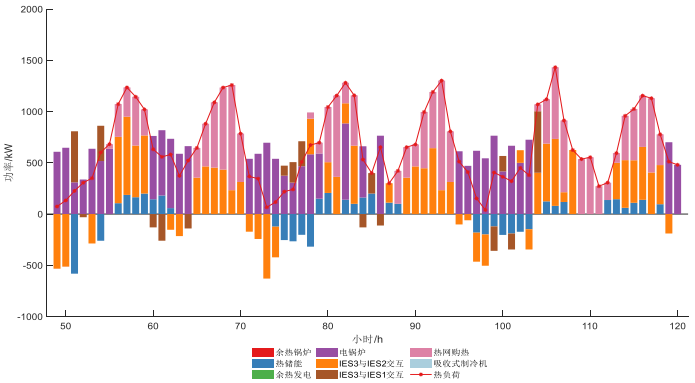


图 C4　IES3 负荷调整前后对比图

Fig. C4　Before and after adjustment comparison of IES3 load



(a) 电功率



(b) 热功率

图 C5　IES3 电热功率图

Fig. C5　Operation chart of electrical and thermal power for IES3