

考虑资源禀赋及用户特征的综合能源系统规划

顾宇宸

(南京三新供电服务有限公司浦口分公司, 江苏 南京 211899)

摘要: 针对可再生能源分布的随机波动性及用户用能的不确定性使得区域综合能源系统 (integrated energy system, IES) 规划与实际需求存在偏差, 且规划策略难以兼顾多优化目标, 无法充分发挥 IES 节能减排与协调源荷资源的作用, 文章提出一种融合风、光、地热等可再生能源的电气热多能互补 IES 规划方案。基于区域自然资源禀赋和不同用户用能特征, 考虑多元优化目标构建双层优化模型; 采用改进粒子群算法和 Gurobi 求解器计算最优解集并依据决策者导向从中选取最佳解; 最后运用模糊评价法对规划结果进行评估并构建多场景算例进行实验验证, 结果表明该模型能够同时兼顾多种性能指标, 规划得到满足区域资源禀赋与用户用能特点的优化配置方案, 从而降低系统运行综合成本以及减小环境污染, 提升区域能源循环利用效率。

关键词: 综合能源系统; 资源禀赋; 双层优化配置; 改进粒子群算法; 用户用能特征

中图分类号: TM73/TK01

Integrated Energy System Planning Considering Resource Endowments and User Characteristics

GU Yuchen

(Nanjing Sanxin Power Supply Service Co., Ltd. Pukou Branch, Jiangsu Nanjing 211899, China)

Abstract: As the random fluctuation of renewable energy distribution and the uncertainty of user energy consumption lead to deviations between the planning of integrated energy system (IES) and the actual demand, the planning strategy is difficult to take into account multiple optimization objectives, and the role of IES in energy conservation, emission reduction and coordination of source load resources cannot be fully brought into play. In this paper, a multi-energy complementary IES planning scheme for electric heat is proposed, which integrates wind, solar, geothermal and other renewable energy sources. Based on regional natural resource endowment and different users' energy consumption characteristics, a bi-level optimization model is constructed considering multiple optimization objectives. An improved particle swarm optimization algorithm and Gurobi solver are used to calculate the optimal solution set and select the best solution according to the decision maker's guidance. Finally, a fuzzy evaluation method is used to evaluate the planning results, and multi-scenario case studies are conducted for experimental validation. The results demonstrate that the proposed model effectively balances various performance indicators, providing an optimized configuration that aligns with regional resource endowments and user energy consumption characteristics. This approach reduces the comprehensive operational cost, mitigates environmental pollution, and enhances the regional energy recycling rate.

Keywords: integrated energy system; resource endowment; double-layer optimal configuration; particle swarm optimization; user energy consumption characteristics

0 引言

目前的能源系统大多都是孤立的单独运行供能, 导致经济成本高、能源利用率低等问题^[1-2]。IES 能够协同多种独立功能系统进行优化配置, 打破了传统能源供给过程中的藩篱^[3-4]。然而, 可再生能源分布的随机波动性及用户用能的不确定性使得 IES 规

收稿日期: 2024-05-31

划与实际需求存在一定偏差, 难以充分发挥其节能减排与协调源荷资源的作用。随着可再生能源渗透率的进一步提升, 考虑区域自然资源禀赋和用户用能特征的多目标 IES 规划对于区域建设发展与生态环境改善具有重大意义。

目前, 国内外学者对 IES 的建模与运行优化方面已开展了部分研究, 文献 [5] 通过对 IES 能源设备的数学建模, 提出了综合效益评估体系; 文献 [6]

基于系统热惯性的基础上，提出了一种可行域方法的调度优化模型，满足了系统经济性能。文献[7]基于电气耦合型 IES 进行了协调运行方法的研究，有利于可再生能源的消纳。以上的优化策略大多仅针对单一特定场景下的能源设备，难以兼顾到地区自然资源禀赋状况。为此，有学者基于新能源的随机性与波动性，提出一种考虑区域自然资源禀赋和用户用电特征的两阶段优化调度策略，以运行费用最低为目标实现了协同优化策略^[8]。然而，该研究主要针对用户侧用电行为，未涉及用户侧冷、热、气负荷的需求，同时目标函数选取较为单一，仅考虑了经济性指标；文献[9]考虑地区地热能以及光照强度资源，综合经济与环境指标展开分析，优化了系统鲁棒性。但其规划配置过程中涉及的能源转换设备不够全面，并未深入考虑热网处于灵活性恢复过程时，如何协调 IES 其余灵活性资源参与调度，以期弥补功率平衡差额；文献[10]提出了双层优化模型，对 IES 进行二阶优化配置，上下层分别针对不同的目标函数逐一优化，但未考虑到上下层决策变量的耦合性，且未涉及实际区域的资源状态及用户需求。综上，上述研究多侧重于系统设备的协同控制调度，未考虑到优化可再生能源设备配置的现实问题以及用户侧负荷需求对 IES 规划的影响，

且涉及的用户侧用能特征及区域待规划设备均不够全面，仅针对单一目标的 IES 规划策略难以满足实际工程的需求。

针对上述问题，本文提出一种考虑区域自然资源禀赋与用户用能特征的 IES 规划方法。通过充分挖掘区域自然资源禀赋信息，设定多个不同自然资源禀赋区域场景；区别于传统孤立供能系统，综合考虑系统经济性、环保性、能效性以及安全可靠，构建含地热能、风、光等多种可再生能源的多目标电气热联供型综合能源双层优化配置模型；利用改进的粒子群算法与 Gurobi 求解器进行运算，并根据区域发展需求，从得到的最优解集中，寻求主观决策所需的最优解，并采用主客观赋权相结合的模糊评价法对其合理性进行了验证。算例结果验证了本文所提模型与规划算法的有效性与优越性。

1 系统架构及能源设备数学模型

1.1 多场景 IES 架构

综合能源系统（IES）主要分布于能源网络末端，实现对用户的多元供能。考虑区域自然资源禀赋的 IES 主要由具有中小型容量的产能、储能和能量转换设备组成。其典型的拓扑结构见图 1。

图 1 中，系统架构由产能设备、储能设备以及

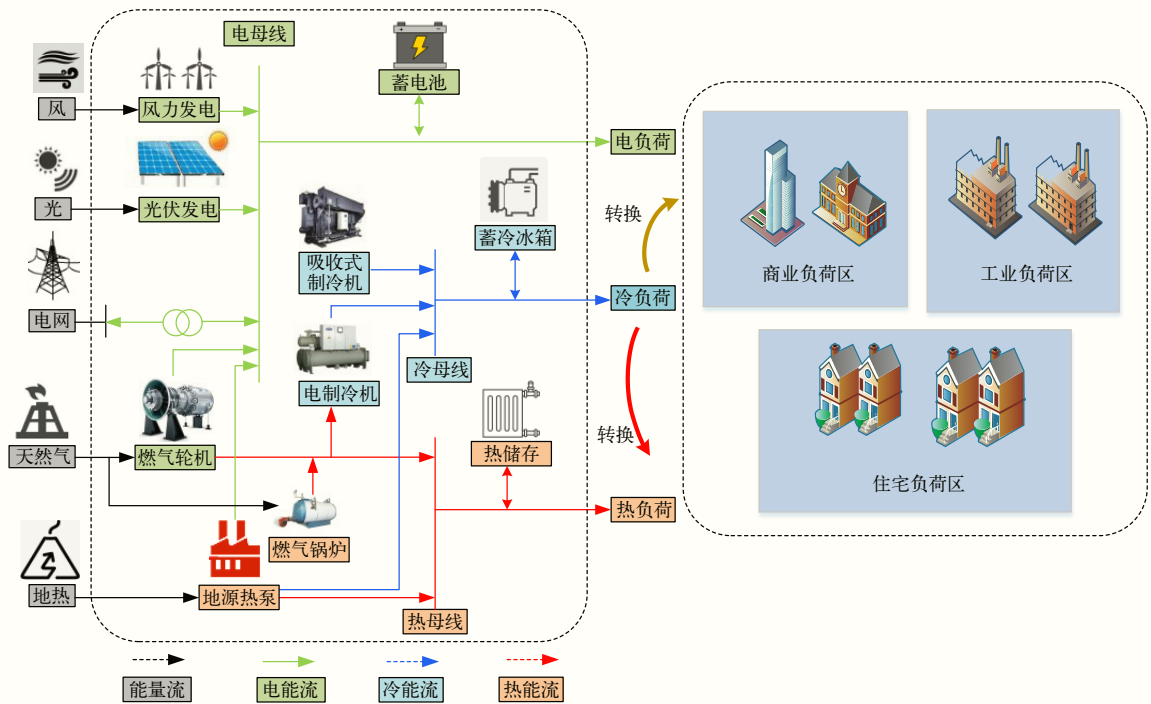


图1 基于自然资源禀赋的 IES 架构

能量耦合转化设备组成，其中产能设备主要包括热电联产（CHP）、光伏发电（PV）、风力发电（WT）；储能设备主要包括蓄电/热/冷装置、地源热泵等；能量耦合转化设备主要包括燃气锅炉（GB）、电制冷机（EC）、吸收式制冷机（AC）等^[11-13]。该架构综合考虑了区域自然资源禀赋情况，气象、月度等时空因素，区域内各能源子系统的耦合关系、控制策略以及用户侧用能行为习惯与时序分布特点等。

1.2 关键设备通用模型

1.2.1 光伏发电系统

光伏发电是利用半导体界面的光生伏特效应将光能直接转变为电能的一种技术。其光电转换效率在 15% 左右，其发电功率和光照强度关系为：

$$P_{PV} = \eta_{PV} \eta_M A_{PV} \xi \cos \theta \quad (1)$$

式中： P_{PV} 为光伏发电的输出功率； η_{PV} 为光电转化效率； η_M 为最大功率点跟踪控制器的效率； A_{PV} 为光伏面积； ξ 太阳的辐射强度； θ 为太阳的入射角。

1.2.2 风机发电系统

风机利用风轮将风的动能转化为轴旋转的机械能，经变速箱调速带动发电机发电。其发电功率与风速的关系一般可表示为：

$$P_W = \begin{cases} 0, & 0 \leq v < v_{ci} \\ (a_0 v^2 + b_0 v + c_0) P_W^r, & v_{ci} \leq v < v_r \\ P_W^r, & v_r \leq v \leq v_{co} \\ 0, & v_{co} < v \end{cases} \quad (2)$$

式中： P_W 、 P_W^r 分别为风机的输出功率和额定功率； v 、 v_{ci} 、 v_r 、 v_{co} 分别为实际风速、切入风速、额定风速和切出风速； a_0 、 b_0 、 c_0 为风机出力特性曲线参数。

1.2.3 地源热泵模型

地源热泵是一种既能供热又能制冷、在技术和经济上都具有较大优势的高效节能环保型空调系统^[14]。地源热泵通过输入少量的高品位能源（电能），即可实现能量从低温热源向高温热源的转移，其能源转换以及出力模型可表示为：

$$\begin{cases} Q_t^{CSHP} = COP_t^{CSHP} P_t^{HP} \\ Q_t^{CSHP, in} = \eta_t^{CP} P_t^{CP} = Q_t^{CSHP} - \eta_t^{HP} P_t^{HP} \\ P_t^{CSHP} = P_t^{CP} + P_t^{HP} \\ COP_t^{CSHP} = 1.65 + 1.3 \left(\frac{Q_t^{CSHP}}{Q_R^{CSHP}} \right) + 1.14 \left(\frac{Q_t^{CSHP}}{Q_R^{CHPP}} \right)^2 \end{cases} \quad (3)$$

式中： $Q_t^{CSHP, in}$ 、 Q_t^{CSHP} 、 COP_t^{CSHP} 分别为 t 时刻 GSHP 输出电源热能、GSHP 输出热（冷）功率及其运行能效； P_t^{CSHP} 、 P_t^{CP} 、 P_t^{HP} 分别为地源热泵、地源换热泵、热泵主机电能的损耗量； Q_R^{CSHP} 、 η_t^{CP} 、 η_t^{HP} 分别为 GSHP 额定制热（冷）功率、换热效率以及电热转换效率。

1.2.4 储能设备模型

面对接入波动性和随机性较强的可再生能源出力不稳定性问题，储能设备能够存储不同设备不同时刻下的出力剩下能量，弥补了区域能源时空分布多尺度问题。其储电、热、冷设备的数学模型如下：

$$E_{ES}^t = (1 - \mu_e) E_{ES}^{t-1} + \eta_{in}^e P_{in}^e(t) - \frac{P_{out}^e(t)}{\eta_{out}^e} \quad (4)$$

式中： μ_e 为储电设备自放电率； E_{ES}^{t-1} 为 $(t-1)$ 时段充放电能量； $P_{in}^e(t)$ 为充电功率； $P_{out}^e(t)$ 为放电功率； η_{in}^e 、 η_{out}^e 分别为储电设备的充、放电效率。储热与储能设备模型与其类似。

此外，其他能源设备如燃气轮机、燃气锅炉、电制冷机及吸收式制冷机等设备的模型参照文献 [14] 建立。

2 双层优化配置策略

2.1 目标函数

为解决多目标优化复杂度高与求解难度大的问题，本文采用双层优化配置策略来构建规划模型。上层面向全周期运行优化，下层面向日前-日内优化，提升运算精度，且决策变量上下传递迭代更新，能够加快运算收敛速度，其上下层配置见图 2。

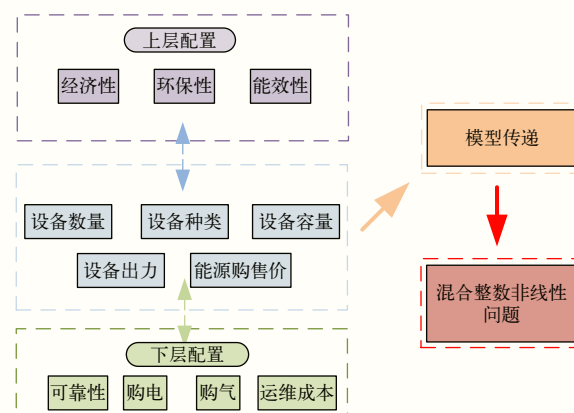


图2 双层优化配置架构图

2.1.1 上层优化配置目标函数

上层由设备机组投资成本 C_{CCHP} 、污染气体排

放物对环境影响的折算环保成本 C_H 以及区域能效综合利用率 η^{total} 组成, 其值大小为一段时间内区域负荷与输入区域一次能源的比值^[15]:

$$\eta^{\text{total}} = \frac{W_T^{\text{PL}} + W_T^{\text{HL}} + W_T^{\text{CL}}}{\sum_{i=1}^r \left(\frac{P_i^{\text{grid}}}{1-\zeta} + P_i^{\text{gas}} \right)} \quad (5)$$

式中: ζ 为输电线路的网损率, 一般取 5%; W_T^{PL} 、 W_T^{HL} 、 W_T^{CL} 分别为区域 T 时段内负荷消耗的电能、热能、冷能; P_i^{grid} 、 P_i^{gas} 为区域 t 时段内的购电量和购气量, T 时段一般分为长周期或短周期, 长周期选取全年 8 760 h, 短周期选取某典型日 24 h; t 为某单个时刻的采样区间段, 一般以 1 h 为刻度, 即在 $0 \sim T$ 时间段任意一段 1 h 的时间尺度。

将能效综合利用率提升所带来的收益转换为能耗节约成本 P_i^{gas} 的缩减。即得到上层目标函数 f_1 :

$$\min f_1 = (C_{\text{CCHP}}, C_H, C_N) \quad (6)$$

其中, C_{CCHP} 的计算方式可表示为:

$$C_{\text{CCHP}} = s(C_{\text{inf.GT}} P_{\text{cap.GT}} + C_{\text{inf.GB}} P_{\text{cap.GB}} + C_{\text{inf.GE}} P_{\text{cap.GE}} + C_{\text{inf.EC}} Q_{\text{cap.EC}} + C_{\text{inf.AC}} Q_{\text{cap.AC}}) \quad (7)$$

式中: s 为资金的回收率; $P_{\text{cap.GT}}$ 、 $P_{\text{cap.GB}}$ 、 $P_{\text{cap.GE}}$ 分别为燃气轮机、燃气锅炉、天然气内燃机组的额定电功率; $Q_{\text{cap.EC}}$ 、 $Q_{\text{cap.AC}}$ 分别为电制冷机、吸收式制冷机的额定电功率; $C_{\text{inf.GT}}$ 、 $C_{\text{inf.GB}}$ 、 $C_{\text{inf.GE}}$ 、 $C_{\text{inf.EC}}$ 和 $C_{\text{inf.AC}}$ 等参数分别为燃气轮机、燃气锅炉、天然气内燃机组、电制冷机和吸收式制冷机设备的运行成本。

环保成本 C_H 的计算方式为:

$$C_H = W_{\text{CO}_2} [\varepsilon_e P_{\text{EC}}^{\text{IN}} + \varepsilon_g (P_{\text{GT.g}} + P_{\text{GB.g}} + P_{\text{GE.g}})] \quad (8)$$

式中: W_{CO_2} 为排放 CO_2 单位价格; ε_e 为单位电功率 CO_2 的排放系数; ε_g 为单位体积天然气的 CO_2 排放系数; $P_{\text{EC}}^{\text{IN}}$ 、 $P_{\text{GT.g}}$ 、 $P_{\text{GB.g}}$ 和 $P_{\text{GE.g}}$ 分别为电制冷机、燃气轮机、燃气锅炉和天然气内燃机组的输入功率。

能耗节约成本 C_N 由能源利用率 η^{total} 和区域购气量 P_i^{gas} 、购电量 P_i^{grid} 及电、天然气单价 $c_{e,t}$ 、 $c_{g,t}$ 共同决定。

2.1.2 下层优化配置目标函数

下层考虑日内优化调度主要考虑日购电成本 C_e 、购买天然气成本 C_g 和设备维护成本 C_{EM} 以及可靠性惩罚成本 C_{rel} , 则得到下层目标函数 f_2 为:

$$\min f_2 = C_{\text{EM}} + C_e + C_g + C_{\text{rel}} \quad (9)$$

其中, 日购电、购气成本为:

$$C_e = \sum_{t=1}^T c_{e,t} P_{e,t} \quad (10)$$

$$C_g = \sum_{t=1}^T c_{g,t} P_{g,t} \quad (11)$$

式中: $c_{e,t}$ 为 t 时刻购电单价, $c_{g,t}$ 为 t 时刻购气单价; $P_{e,t}$ 、 $P_{g,t}$ 分别为 t 时段的购电、购气功率。

设备日维护成本 C_{EM} 的计算方式为:

$$C_{\text{EM}} = \sum_{d=1}^D \sum_{t=1}^T \sum_i c_i^{\text{EM}} S_{d,t}^i \quad (12)$$

式中: c_i^{EM} 为第 i 类设备单位功率维护成本; D 、 T 分别为全年天数和每日小时数, $S_{d,t}^i$ 表示第 i 类设备在 d 日 t 时刻的输出功率。

可靠性惩罚成本的降低用以实现系统设备安全可靠的目标, 其中可靠性惩罚成本 C_{rel} 与可靠性评估指标 E_{ELNS} 有关, 首先以能量缺负荷期望指标来体现系统可靠性的水平。将能量缺负荷值 D_{ELNS}^k 可表示为

$$D_{\text{ELNS}}^k(t) = P_{\text{eload}}(t) - \sum_{k' \neq k} (R_{k'}(t) + P_{k'}^{\text{out}}(t)) = P_{\text{eload}}(t) - \sum_{k' \neq k} P_{k'}^{\text{out,max}}(t) \quad (13)$$

式中: $P_{\text{eload}}(t)$ 为 t 时刻的负荷需求; $P_{k'}^{\text{out}}(t)$ 为 t 时刻非故障设备 k' 的能量出力; $P_{k'}^{\text{out,max}}(t)$ 为 t 时刻非故障设备 k' 的出力上限, 由设备的额定容量决定; $R_{k'}(t)$ 为 t 时刻第 k' 个设备的备用功率; $D_{\text{ELNS}}^k(t)$ 为能量缺负荷值。

系统正常运行时, 设备 k 的出力不大于其出力上限, 则 t 时刻设备 k 故障引起的缺负荷值的变化范围为:

$$0 \leq D_{\text{ELNS}}^k(t) \leq P_{k'}^{\text{out,max}}(t) \quad (14)$$

相应的能量可靠性指标表示为

$$E_{\text{ELNS}} = \sum_k \sum_t \hat{p}_k D_{\text{ELNS}}^k(t) \quad (15)$$

式中: $\hat{p}_k$ 为设备 k 的故障率, 可靠性指标 E_{ELNS} 意为能量缺负荷期望, 则可靠性成本计算方式为

$$C_{\text{rel}} = \sum_{s=1}^S \sum_{t=1}^T D_s \sigma_e E_{\text{ELNS}}(t) \Delta t \quad (16)$$

式中: D_s 为第 s 类设备故障的天数; σ_e 为缺能单价。

2.2 约束条件

2.2.1 设备特性约束

对文中提到的非储能设备如 CCHP、PV、WT、AC、EC 等均应满足能量输入与输出的关系约束即设备输入/输出功率上下限的约束：

$$l_t^i P_{\min}^{\text{in},i} \leq P_t^{\text{in},i} \leq l_t^i P_{\max}^{\text{in},i} \quad (17)$$

$$l_t^i P_{\min}^{\text{out},i} \leq P_t^{\text{out},i} \leq l_t^i P_{\max}^{\text{out},i} \quad (18)$$

式中： l_t^i 为第 i 类设备在 t 时刻的启停状态； $P_{\min}^{\text{in},i}$ 与 $P_{\max}^{\text{in},i}$ 为第 i 类设备输入功率的上下限； $P_{\min}^{\text{out},i}$ 与 $P_{\max}^{\text{out},i}$ 为第 i 类设备输出功率的上下限。

对于储电/热/冷等储能设备同样需满足其充放电功率上下限：

$$x_{\text{in}}^{\text{ES}} P_{\min}^{\text{ES,in}} \leq P_t^{\text{ES,in}} \leq x_{\text{in}}^{\text{ES}} P_{\max}^{\text{ES,in}} \quad (19)$$

$$x_{\text{in}}^{\text{ES}} P_{\min}^{\text{ES,out}} \leq P_t^{\text{ES,out}} \leq x_{\text{in}}^{\text{ES}} P_{\max}^{\text{ES,out}} \quad (20)$$

式中： $x_{\text{in}}^{\text{ES}}$ 与 $x_{\text{out}}^{\text{ES}}$ 为 0-1 变量，当储能设备处于储能状态是 $x_{\text{in}}^{\text{ES}}=1$ ，否则 $x_{\text{in}}^{\text{ES}}=0$ ；同理，当储能设备处于释能状态时， $x_{\text{out}}^{\text{ES}}=1$ ，否则 $x_{\text{in}}^{\text{ES}}=0$ ； $P_{\max}^{\text{ES,in}}$ 与 $P_{\max}^{\text{ES,out}}$ 为储能设备最大输入/输出功率。

为了避免储能设备同时处于储能与释能的状态并且满足储能设备容量约束：

$$x_{\text{in}}^{\text{ES}} + x_{\text{out}}^{\text{ES}} \leq 1 \quad (21)$$

$$E_{\min}^{\text{ES}} \leq E_t^{\text{ES}} \leq E_{\max}^{\text{ES}} \quad (22)$$

式中： $E_{\min}^{\text{ES}}$ 和 $E_{\max}^{\text{ES}}$ 分别为储能设备容量的上下限。

考虑到储能设备单日内存储状态的连续性，即保证设备一天内首末能量状态相同即满足约束：

$$E_0^{\text{ES}} = E_T^{\text{ES}} \quad (23)$$

式中： E_0^{ES} 为 0 时刻储能设备能量状态； E_T^{ES} 为 T 周期末尾， T 时刻储能设备能量状态。

2.2.2 功率平衡约束

为了满足区域内综合能源传输与负荷需求，系统内功率平衡约束。电负荷平衡约束：

$$P_{\text{VT}} + P_{\text{W}} + P_{\text{CHP}} + P_{\text{grid}} = P_{\text{load}} + P_{\text{GSHP}} + P_{\text{ES}} + P_{\text{EC}} \quad (24)$$

表示光伏 P_{VT} 、风机 P_{W} 、热电联产机组 P_{CHP} 等设备输出功率以及电网购电功率 P_{grid} 和负荷 P_{load} 、地源热泵 P_{GSHP} 、电制冷机 P_{EC} 和电储能设备 P_{ES} 消耗电功率平衡。冷热负荷功率平衡与电负荷类似，考虑到篇幅不再一一罗列。

2.2.3 能源购售约束

区域 IES 为从外部购入电量与天然气，需满足

上下限及出力爬坡约束^[12]：

$$-u_t^i \Delta P^i \leq P_t^i - P_{t-1}^i \leq u_t^i \Delta P^i \quad (25)$$

式中： ΔP^i 为外界能源输入的最大出力爬坡限额； P_t^i 为 t 时刻外界输入的能源功率； u_t^i 为限额系数。

2.3 规划方法

2.3.1 改进粒子群算法

对于构建的双层多目标函数及约束条件的 IES 模型，传统的粒子群算法容易陷入局部最优解的循环，不足以实现区域内最优方案配置。现采用改进 PSO 算法^[16] 进行优化，使其更适用于面向多目标多场景下的 IES 规划。

传统粒子群算法计算方法为：

$$v_{ij}^{t+1} = \omega v_{ij}^t + c_1 r_1 (P_{ij}^t - v_{ij}^t) + c_2 r_2 (P_{gj}^t - v_{ij}^t) \quad x_{ij}^{t+1} = x_{ij}^t + v_{ij}^{t+1} \quad (26)$$

式中： v_{ij}^{t+1} 为 $t+1$ 迭代后的粒子速度； t 为迭代次数； ω 为惯性权重因子； c_1 、 c_2 均为学习因子； r_1 和 r_2 分别为两个 0 到 1 之间的随机数，主要作用是增加粒子飞行的随机性，这两个随机数通过影响粒子的速度更新公式； P_{ij}^t 为粒子个体最优值位置； P_{gj}^t 为粒子种群最优值位置； x_{ij}^t 为粒子 t 次迭代时位置。

在改进的 PSO 算法中，预先设定权重因子的上下限范围，设定学习因子的起始值和终止值，以所有粒子的个体最优值的平均值替代个体最优值，已排除粒子群中最差的个体最优值，从而避免局部最优解循环的情况。

2.3.2 求解方法与流程

由于本文提出的模型属于混合整数非线性双层规划模型，难以直接求解。因此，将该模型转化为适用性更广、收敛性更好的混合整数线性规划模型，首先，获取边界条件如可再生能源出力特性、电气购入阶梯价格、需求侧电/冷/热负荷等。其次，在下层模型中基于 Matlab 的建模软件 YALMIP 进行设备建模，建立区域 IES 规划的多目标函数及约束条件，并调用商业优化求解器 Gurobi 进行求解，对设备出力优化调度反馈到上层。同时上层采用改进的 PSO 算法，依据区域资源禀赋特征初始化粒子群，不断寻求最优解的同时接收下层求解的优化结果，从而实现多目标优化配置，输出最优解集，再由决策者的需求评判，从最优解集输出最优配置方案。最终，基于模糊评价法以多指标评估体系验证配置方案。求解流程图见图 3。

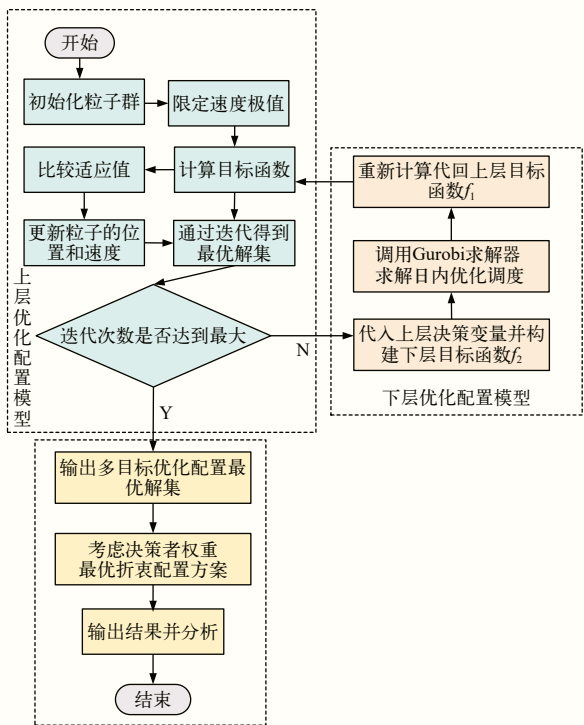


图3 多场景多目标算法的 IES 双层优化配置

3 算例分析

3.1 场景及参数设置

根据当地区域自然资源禀赋、地理位置特点以及气候条件，设计了基础资源禀赋与对照资源禀赋场景。考虑地区用户用能习惯及需求响应，设计了民用住宅、商业楼宇和工业园区 3 种场景。结合风机和光伏出力的时序特性，针对区域的某典型日出力曲线，构建以下 4 种场景分别对比区域自然资源禀赋和用户用能特征对综合能源规划方案的影响，对本文所提模型与算法进行验证。

（场景 1）基础资源禀赋场景：光照强度大，风机、光伏出力丰富且地热转换承载极限贫瘠区域 + 用户用能特征为民用住宅区域；

（场景 2）基础资源禀赋场景+用户用能特征替换为商业区域；

（场景 3）基础资源禀赋场景+用户用能特征替换为工业园区；

（场景 4）对照资源禀赋场景：风光出力较小且地热转换承载极限高区域+用户用能特征为民用住宅区域。

根据区域自然资源禀赋状况设置的基础和对照场景下的可再生能源出力预测曲线如图 4 中的（a）

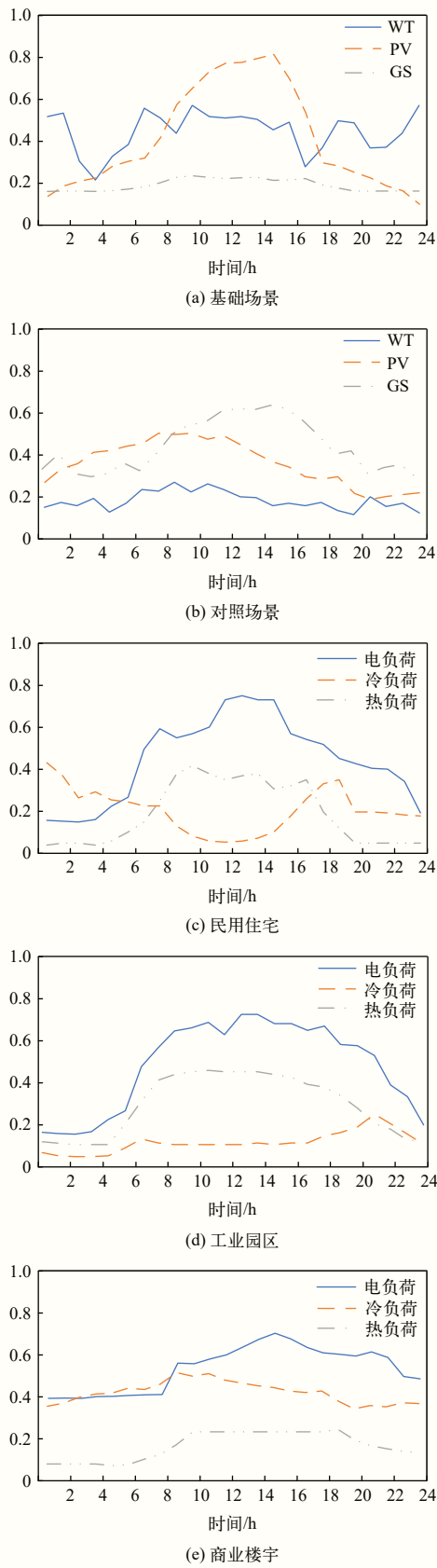


图4 不同区域下的负荷需求曲线以及可再生能源出力曲线

(b) 所示，依据不同区域用户用能特性，分为民用、工业和商业区域的日内负荷波动曲线如图 4 中的 (c) (d) (e) 所示。分别设定典型日电热冷负荷曲线图以及可再生能源出力曲线。

天然气价格选取 3.01 元/m³，所有场景案例中粒子群个数取 150，迭代次数为 200，惯性权重因子 ω 的上下限设置为 0.3~0.85，学习因子 c_1 、 c_2 的起始值分别设置为 0.33、1；终止值设置为 1、0.33。

3.1.1 不同用户用能特征的影响

以基础场景下不同用户用能特征规划过程为例，依据决策者赋经济性导向大权重，对比场景 1~3 下的规划结果见表 1。

用户类型	风机	光伏	热电联产设备台数	地源热泵台数	电制冷机	吸收式制冷机	储能
民用住宅	352	497	2	2	440	798	647
商业楼宇	45	87	4	1	796	696	980
工业园区	80	60	4	1	320	311	676

负荷类型包含商用、民用和工业，商用负荷选择商场群，热、电日负荷峰值分别为 2.5 MW、4 MW，民用负荷选择住宅群，热、电日负荷峰值分别取 2.1、1.5 MW，工业负荷选择工业园区，热、电日负荷峰值分别为 8、6.5 MW，光伏电站日出力峰值为 1 MW，风电场日出力峰值为 3 MW。

场景一下部分机组出力情况如图 5~6 所示。

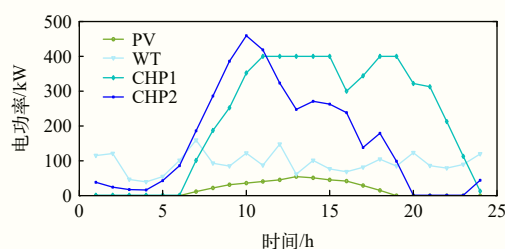


图5 场景1下部分机组电出力情况

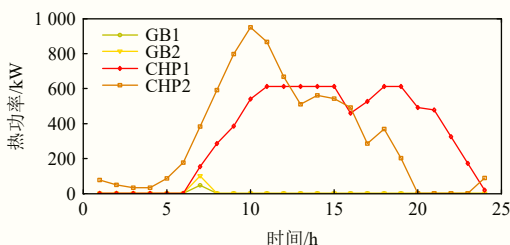


图6 场景1下部分机组热出力情况

由上表可知，工业园区和商业楼宇对于能源供应可靠性要求较高，考虑到可再生能源的波动性与随机性大，在综合规划方面配置较小的风光出力以提升系统供能的稳定性。同时，由于商业园区用户对冷负荷需求高，在场景 2 中可适当增加制冷设备与储冷装置的投放，以提升制冷设备出力。因此，不同用户用能行为特征会导致该区域对不同类型负荷的需求存在较大差异，从而对 IES 各类能源设备的安装数量、容量以及出力情况的规划带来明显的区别，依据用户用能特征使得 IES 规划方案的合理性得到了显著提升。

3.1.2 不同区域资源禀赋的影响

以场景 1 和场景 4 的规划过程为例，分析对比不同区域资源禀赋对 IES 规划的影响。同样在考虑多重指标优化配置方案的前提下，用户用能类型均为民用住宅区域，赋经济性导向为大权重求解，得到如表 2 所示的优化配置方案。

场景	风机	光伏	热电联产设备台数	地源热泵台数	电制冷机	吸收式制冷机	储能
基础场景	480	846	3	1	562	364	402
对照场景	120	24	2	3	545	322	430

由表 2 可知基础场景下风光资源丰富，配置光伏、风机设备以提高可再生能源利用率以达到降低经济成本、保护生态环境和减少能源消耗的目标。而在对照场景中，由于地热转换承载极限较高，利用少量的输入能源即可降低品质的热量转换为居民生活所需要的高品质冷、热负荷，配置多台地源热泵设备可以减轻其他冷、热设备工作的消耗。因此，不同区域的资源禀赋使得 IES 规划过程中考虑可再生能源设备的安装与出力情况存在差异，为此依据区域资源禀赋的 IES 规划更加符合地区实际需求。

对照场景 4 下的部分机组热、电出力见图 7~8。

3.2 多目标优化运行分析

算例优化周期设置为 24 h，步长 1 h，基于 4 个不同典型场景的双层优化配置，综合考虑经济性、环保性、能效性和安全可靠优化目标，折算为投资运行成本、环境成本、能源节约成本和可靠性惩罚成本，采用改进 PSO 算法和 Gurobi 求解。

结合上述区域资源禀赋状况与用户用能特征情况两种考量因素，以场景一为例，针对决策者不同

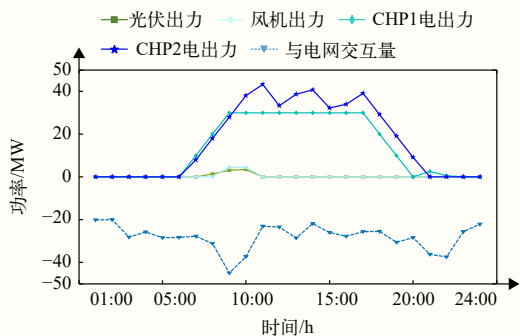


图7 场景4下部分机组电出力情况

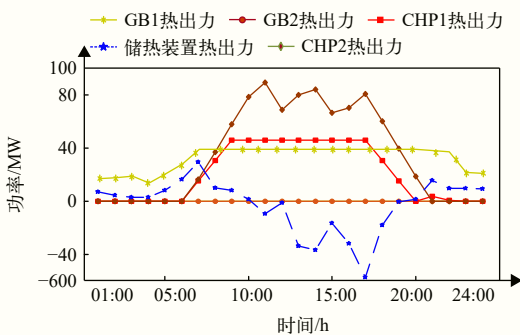


图8 场景4下部分机组热出力情况

优化目标权重分配下的 IES 配置方案见表 3。

表3 不同导向性规划配置

优化目标导向	经济成本/万元	风机/kW	光伏/kW	热电联产设备台数	地源热泵台数	污染气体排放量/t	能效利用率/%
经济性导向	1 645.14	462	402	4	1	2 419.57	21
环保性导向	1 664.31	596	720	2	4	1 980.51	14
能源节约导向	1 651.25	546	538	5	2	2 272.81	45

经济性导向与环保性导向分别具有最低的经济成本和最少的污染气体排放量，其中经济性导向充分考虑经济性指标，配置了较少的价格昂贵的可再生能源与储能设备，大大降低了方案的设备投建成本，有效地控制了总经济成本。与此同时，可再生能源得不到充分的利用导致该区域需要从当地电网进行购能供给，从而引起污染气体排放量的增加。

环保性导向则降低了传统功能机组的能源产量，大量配置了包括风机、光伏发电和地源热泵等在内可再生能源设备，配套相应的储能装置，牺牲一部分经济效益，从而实现环保性指标提升。

能源节约型导向更多使用了可实现能源梯级利

用的 CHP 机组，将多余的电能售出，节约了运营成本支出，提升了能源利用效率，但同时造成了污染气体排放量的增加。

此外，当处于用能高峰期时，系统中的储电/热/冷设备可同时处于供能状态，各设备出力机组处于工作输出能量状态，可以有效缓解可再生能源随机性与波动性所带来的系统稳定性影响。当储能设备能量剩余时，可向其他相连区域或电网输出能量，提高当地区域系统经济性能。

3.3 综合规划评估验证

利用基于主客观赋权法的模糊评价法对上节得到的各场景下的最优配置方案进行验证，选取经济效益指标、物理效益指标和生态效益指标对规划结果进行评估，其评估流程见图 9。

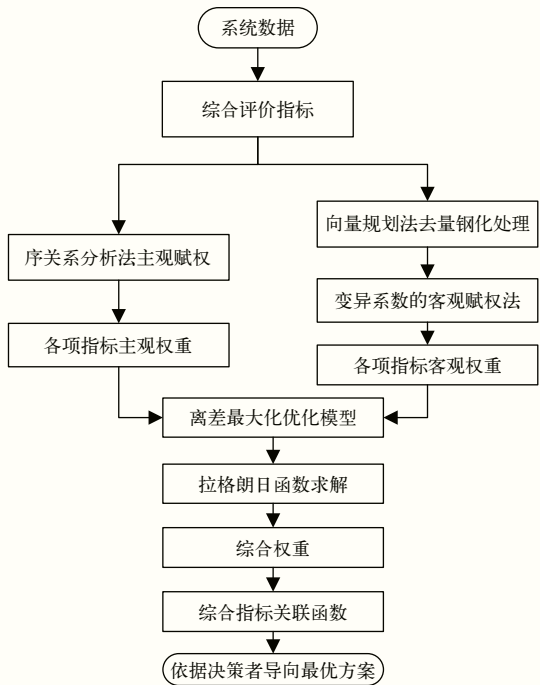


图9 系统规划评估流程图

其中，以经济效益指标综合权重为例，基于主客观结合的模糊评价法的权重数值见表 4。

根据上述流程模糊评价法中的组合权重、关联特性矩阵等可以计算出不同指标导向性的方案在相应场景下的得分情况见图 10。

由图 10 可知，场景 1 与场景 2 下以经济性导向得到的优化配置方案得分高于其他两指标导向性得分情况，基于此场景下经济导向性方案为最优配置解。场景 3 下经济性导向方案与环保性导向方案

表4 经济指标子指标权重分配

指标	主观权重	客观权重	组合权重
设备使用寿命年限	0.05	0.26	0.16
设备利用率	0.09	0.23	0.16
系统投资回收期	0.12	0.25	0.19
能源经济性水平	0.88	0.23	0.56

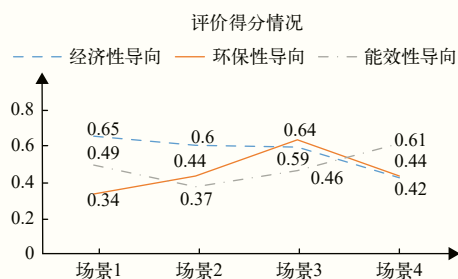


图10 系统规划方案评价得分

得分相近，环保导向性方案得分略高于经济导向性方案。场景4下能效导向性方案得分情况明显高于其他2种方案。

以上根据 IES 规划评估方法得出的不同导向性优化配置方案可验证是否与上节规划结果一致，若存在偏差可为决策者提供不同导向配置方案的量化得分情况，依据当地综合发展情况以及决策者的导向，实现辅助规划，提升优化策略的目标。

4 结束语

本文提出了考虑区域自然资源禀赋-用户用能特征双响应的 IES 优化配置方法，结合改进的粒子群算法，构建双层优化模型，通过算例分析，得到以下结论：

综合考虑经济性、环保性、能效性与安全可靠性等多目标优化，结合 IES 各类约束条件与当地可再生能源分布以及用户用能特点，实现了 IES 合理、精准的优化配置，拓宽了其规划的深度与广度。

针对提出的双层优化配置模型，采用改进的粒子群算法进行求解能够兼顾区域多目标函数的需求，且收敛速度更快、精度更高，求得的优化解集更好地使系统规划配置符合区域实际需求，降低系统运行综合成本，减少系统环境污染，提升区域能源循环利用。

提出的综合规划评估验证方法能够有效的验证决策者从优化解集中选取的最佳解是否满足当地的

区域特点以及所选取的优化配置方案是否合理，使 IES 规划更具有整体最优性，辅助优化策略。

本文提出的模型未能深入定量分析地热承载转化模型，考虑区域地热承载极限的动态模型将是后续工作中进一步研究的重点。

参考文献

- [1] 李兵,牛洪海,陈俊,等.多能互补综合能源系统运行优化研究[J].分布式能源,2018,3(2):53-57.
- [2] 左帅,崔双喜,郑浩,等.考虑风电消纳和梯级利用的综合能源优化调度[J].计算机仿真,2022,39(9):125-129,455.
- [3] 李宁,孙文慧,毕云帆,等.考虑需求响应不确定性的综合能源系统优化调度研究[J].电气工程学报,2023,18(1):153-159.
- [4] 陈克文,王帅,韩兴臣,等.考虑风电消纳的冷热电联供型综合能源系统多目标日前优化调度[J].电气工程学报,2022,17(3):170-176.
- [5] 段可,王维,曹伟杰,等.考虑气热能延迟特性的综合能源系统内能流自分配策略[J].电气工程学报,2022,17(3):76-84.
- [6] ZHAO GUANG PAN, QING LAI GUO, HONG BIN SUN. Feasible region method based integrated heat and electricity dispatch considering building thermal inertia[J]. Applied Energy, 2017(192):395-407.
- [7] BORNAPOUR M, HOOSHMAND R A, KHODA-BAKHSHIAN A, et al. Optimal coordinated scheduling of combined heat and power fuel cell, wind, and photovoltaic units in micro grids considering uncertainties[J]. Energy, 2016, 117(P1):176-189.
- [8] 降国俊,崔双喜,樊小朝,等.计及综合需求侧响应的电-气综合能源系统协调优化运行[J].电测与仪表,2020,57(18):43-49.
- [9] 雷金勇,郭祚刚,陈聪,等.考虑不确定性及电/热储能的综合能源系统两阶段规划-运行联合优化方法[J].电力自动化设备,2019,39(8):169-175.
- [10] 张友鹏,雷炳银,孙荣智,等.基于双层优化的综合能源系统规划配置研究[J].电子设计工程,2021,29(18):26-29,34.
- [11] 王锐,顾伟,吴志.含可再生能源的热电联供型微网经济运行优化[J].电力系统自动化,2011,35(8):22-27.
- [12] 冯智慧,吕林,许立雄.基于能量枢纽的沼-风-光全可再生能源系统日前-实时两阶段优化调度模型[J].电网技术,2019,43(9):3101-3109.
- [13] 程浩忠,胡泉,王莉,等.区域综合能源系统规划研究综述[J].电力系统自动化,2019,43(7):2-13.
- [14] 金璐,何伟,闫华光,等.考虑多评价指标的可再生微能源网双层优化配置[J].电测与仪表,2022,59(2):112-119.
- [15] 魏震波,马新如,郭毅,等.碳交易机制下考虑需求响应的综合能源系统优化运行[J].电力建设,2022,43(1):1-9.
- [16] 李斌,李岩,刘佳鑫.基于改进粒子群算法的综合能源系统经济优化运行[J].电工技术,2023,584(2):153-157.

作者简介

顾宇宸(1998—),男,本科,助理工程师,研究方向为智能电网信息技术、需求侧管理等,Email: Ws_0608@163.com。

(责任编辑:张峰亮)