

基于 AMOWOA 的区域综合能源系统运行优化调度

韩永明^{1,2} 王新鲁^{1,2} 耿志强^{1,2} 朱群雄^{1,2} 毕帅^{1,2} 张红斌³

摘要 目前,智能优化算法已广泛应用于工程优化中,在当前多能耦合与互补的能源发展趋势下,仅考虑系统经济指标的单目标优化模式已经不再适用于目前区域综合能源系统(Integrated energy system, IES)的运行优化调度,需要研究一种多目标运行策略来解决区域综合能源系统的运行优化调度问题。首先综合考虑经济与能源利用两个指标并结合商业住宅区域的特性,以系统日运行收益和一次能源利用率为优化目标构建商业住宅区域综合能源系统多目标运行优化调度模型。其次由于传统多目标智能优化算法缺乏一种最优解综合评价方法,基于非支配排序以及拥挤度计算的多目标算法框架,提出一种利用模糊一致矩阵选取全局最优解的多目标鲸鱼优化算法(A multi-objective whale optimization algorithm, AMOWOA),并将提出算法对商住区域综合能源系统多目标运行优化调度模型进行求解。最后以华东某商业住宅区域综合能源系统为例进行仿真,验证了该方法的有效性和可行性。

关键词 多目标优化,综合能源系统,动态层次分析,鲸鱼优化算法

引用格式 韩永明,王新鲁,耿志强,朱群雄,毕帅,张红斌.基于 AMOWOA 的区域综合能源系统运行优化调度.自动化学报,2024,50(3):576-588

DOI 10.16383/j.aas.c211146

Optimal Scheduling for Regional Integrated Energy System Operation Based on the AMOWOA

HAN Yong-Ming^{1,2} WANG Xin-Lu^{1,2} GENG Zhi-Qiang^{1,2} ZHU Qun-Xiong^{1,2}
BI Shuai^{1,2} ZHANG Hong-Bin³

Abstract Now intelligent optimization algorithms have been widely used in engineering optimization. Under the current energy development trend of multi-energy coupling and complementation, the single-objective optimization model that only considers system economic indicators is no longer applicable to the optimal scheduling for integrated energy system (IES) operation, it is necessary to study a multi-objective operation strategy to solve operation optimization and scheduling of regional integrated energy system problem. First, considering the two indicators of economy and energy utilization and combining the characteristics of commercial and residential areas, a multi-objective operation optimization and scheduling model of an integrated energy system for commercial and residential areas with system daily operating income and primary energy utilization as the optimization goals is constructed. Secondly, since the traditional multi-objective intelligent optimization algorithm lacks a comprehensive evaluation method of optimal solutions, based on the framework of multi-objective algorithm with non-dominated sorting and congestion calculation, a multi-objective whale optimization algorithm (AMOWOA) is proposed to select the optimal solution using fuzzy consistency matrix, and then the optimal solution will be evaluated by AMOWOA, and then the optimal solution will be selected by AMOWOA. AMOWOA is proposed to select the global optimal solution using a fuzzy consistency matrix, and the proposed algorithm is used to solve the multi-objective operation optimisation scheduling model of an integrated energy system in a commercial and residential area. The proposed algorithm is used to solve the multi-objective operation optimisation model of commercial and residential energy system. Finally, a commercial and residential area integrated energy system in East China is used as an example to verify the effectiveness and feasibility of the proposed method.

Key words Multi-objective optimization, integrated energy system (IES), dynamic analytic hierarchy process, whale optimization algorithm (WOA)

Citation Han Yong-Ming, Wang Xin-Lu, Geng Zhi-Qiang, Zhu Qun-Xiong, Bi Shuai, Zhang Hong-Bin. Optimal scheduling for regional integrated energy system operation based on the AMOWOA. *Acta Automatica Sinica*, 2024, 50(3): 576-588

收稿日期 2021-12-03 录用日期 2022-03-01

Manuscript received December 3, 2021; accepted March 1, 2022

国家自然科学基金(21978013),中央高校基本科研业务费专项资金(XK1802-4)资助

Supported by National Natural Science Foundation of China (21978013) and Fundamental Research Funds for the Central Universities (XK1802-4)

本文责任编辑 杨涛

Recommended by Associate Editor YANG Tao

1. 北京化工大学信息科学与技术学院 北京 100029 2. 智能过程系统工程教育部工程研究中心 北京 100029 3. 国网经济技术研究院有限公司 北京 102209

1. College of Information Science and Technology, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029 2. Engineering Research Center of Intelligent Process Systems Engineering (PSE), Ministry of Education, Beijing 100029 3. State Grid Economic and Technological Research Institute Co., Ltd., Beijing 102209

能源是人类赖以生存的根本, 随着全球化石能源的逐渐枯竭, 如何实现能源的有效利用已成当今社会关注的焦点. 能源互联网作为一种可以解决能源危机的策略, 已引起社会各界广泛关注^[1-3]. 综合能源系统 (Integrated energy systems, IES) 作为能源互联网重要实现形式之一, 以冷热电联供微网为核心单元, 将电能、天然气与分布式能源进行统一规划调度, 满足不同类型负荷需求的同时提高经济效益与环境效益, 是未来能源发展的重要方向^[4-5]. 由于综合能源系统能够利用各个能源系统之间在时空上的耦合机制, 从而实现各种能源的协同优化, 一方面提高可再生能源的利用率, 从而一定程度减少对化石能源的利用; 另一方面实现能源梯级利用, 从而提高了能源的综合利用水平^[6-8].

关于综合能源系统的日前运行优化问题, 如何进一步提高能源系统效益以及能源利用率, 一直是该领域的难点^[9]. 目前研究主要以经济性为优化目标进行单目标规划. 刘涤尘等^[10]对含冷热电联供及储能的区域综合能源系统基于总运行成本进行优化调度; 施泉生等^[11]以成本费用最小为目标函数, 对考虑储能与电转气的微网综合能源系统进行经济运行优化研究; 顾洁等^[12]基于多主体主从博弈优化交互机制, 研究区域综合能源系统优化运行策略; 郑亚锋等^[13]通过引入储热因子来描述储热装置的状态, 提出一种分层优化调度策略对该综合能源系统进行经济优化调度.

由于无法考虑运行时多项性能之间的协调, 单目标规划已难以适应未来综合能源系统运行调度需求. 在多目标优化调度方面, 方形等^[14]针对含氢综合能源系统运营过程中的成本和收益问题, 提出一种考虑功能方式的综合能源商业运营方法; 齐世雄等^[15]针对区域综合能源系统面临灾害的弹性恢复能力和系统运行经济性之间的矛盾问题, 提出一种通过多目标加权模糊规划的方法; 王磊等^[16]针对热电联供“以热定电”导致的弃风及运行成本较高问题, 提出基于 CHP (Combines heat and power) 灵活热电比的区域综合能源系统多目标优化调度方法; 华煌圣等^[17]基于多能互补的概念, 提出新的评价指标—综合能效水平, 用于描述多能系统能源利用效果. 程亮^[18]基于鲁棒优化方法构建风电出力不确定集合, 建立了区域综合能源系统运行优化模型; 张涛等^[19]针对电、气、热负荷柔性特征和可调度价值, 结合三种负荷在 RIES (Regional integrated energy system) 中形成的耦合关系, 提出计及电—气—热多种负荷的综合需求响应模型; 魏震波等^[20]为兼

顾区域综合能源系统中能耗成本、污染排放、风电消纳等多个调度目标, 建立了考虑综合需求响应的 RIES 多目标优化模型; 耿琪等^[21]基于能量路由器和公共母线的区域综合能源系统, 既实现了电、热、冷等多种能源互补, 也实现了区域内多个综合能源系统之间的电能互济; 施云辉等^[22]基于综合能源系统中供需双侧不确定因素对运行调度带来的风险问题, 提出一种考虑运行风险的含储能 IES 优化调度模型; 何畅等^[23]考虑不确定性及储能设备配置对综合能源系统优化调度的影响, 提出基于多时间尺度和多源储能的 IES 能量协调优化调度策略; 崔杨等^[24]为提高区域综合能源系统多能耦合利用效率, 提出含电转气的变效率热电联产调度模型; 张海静等^[25]考虑综合能源系统运营商和需求响应聚合商之间的交互博弈关系, 建立了计及需求响应的区域综合能源系统双层优化调度模型; 李玉帅等^[26]研究综合能源系统的协同能源管理问题, 并提出一种基于异步动态事件触发通信策略的分布式梯度算法来解决该问题.

耿志强等^[27]提出一种基于改进 NSGA-II (Non-dominated sorting genetic) 算法来研究一个多目标运行的解决方案; 曾鸣等^[28]以运行成本、系统可靠性、减排率为目标对综合能源系统进行多目标运行优化调度, 并利用改进 NSGA-II 算法进行求解; 董帅等^[29]综合考虑经济性和风电消纳能力两个方面, 实现综合能源系统多目标日前优化运行. 而一次能源利用率作为综合能源系统重要评价指标, 鲜有文献将其作为优化目标加以考虑. 同时针对综合能源系统优化调度问题, 由于传统多目标智能优化算法缺乏一种最优解综合评价方法, 对于最优解采取拥挤度以及随机选取模式, 使得针对具体问题情况下的 Pareto 解集难以达到最优. 因此, 基于非支配排序以及拥挤度计算的多目标算法框架, 本文提出一种利用模糊一致矩阵选取全局最优解的多目标鲸鱼优化算法 (A multi-objective whale optimization algorithm, AMOWOA), 并将提出的算法与 NSGA-II 算法、多目标粒子群优化 (Multiple objectives with particle swarm optimization, MOPSO) 算法、PESA-II (Pareto envelope-based selection) 算法和 NSPSO (Nondominated sorting particle swarm optimisation) 算法在多目标优化标准测试函数上进行对比, 通过收敛度和多样性两个指标作为度量验证了所提算法的 Pareto 前沿的收敛性和分布性都比较好.

同时由于综合能源系统各应用区域具有不同区域特性, 故其优化模型内部架构有较大差异. 而目

前智慧能源工程在以商业住宅区域为核心的城市间广泛应用,因此本文以商住区域为研究对象,针对当前问题,以日运行收益、一次能源利用率为目标构建该区域综合能源系统多目标运行优化模型,并采用本文提出的 AMOWOA 进行求解保证种群进化的正确性.最后通过对算例中的区域综合能源系统进行优化调度验证了方法的有效性.

1 商业住宅区域综合能源系统日前运行优化模型

1.1 区域特性及基本架构

区域综合能源系统介于用户级与跨区级综合能源系统之间,不仅能满足区域内多种类型负荷需求,而且还接入消纳可再生能源,实现能源的传输、分配、转换和平衡.

由于商业住宅区域为住宅、商业、办公混合区,该地区多为楼宇地段,因此不具备风电安装条件,但屋顶可安装光伏设备.在用能方面,由于该区域用能负荷相对较小,而内燃机在机组规模不大时发电效率明显比燃气轮机高,故非常适合用内燃机作为发电设备.内燃机的余热利用工艺主要有与烟气热水型余热吸收式空调机组直接对接或经过余热锅炉再与蒸汽或热水型余热吸收式空调机组间接连接两种形式,考虑到前者具有工艺简单、占地少的突出优势,而且由于减少了换热环节,采用直接连接系统的热效率更高,故本文采用直接连接方式.由于燃气锅炉与电锅炉能效系数(Coefficient of performance, COP)远低于热泵,节能效果不佳,暂不做考虑.结合以上特点,供能单元包括:电网供电、内燃机冷热电联产、热泵、光伏发电、电制冷机以及

储能设备,商住区域综合能源系统架构如图 1 所示.

1.2 目标函数

1) 日运行收益

对于连有外电网的 RIES,其日运行收益为

$$S = S_E + S_H - C_e - C_{gas} \quad (1)$$

式中, S_E 为日售电收益; S_H 为日售冷热收益; C_e 为向外电网购电成本; C_{gas} 为购天然气成本.本文综合能源系统日收益计算暂不考虑碳税成本和设备维护费用.

向外电网购电成本表达式为

$$C_e = \sum_{t=1}^d c_{BE}(t)s(t)P_{BE}(t)T \quad (2)$$

式中, d 是一天运行的时段数; T 为时段步长; $P_{BE}(t)$ 为 t 时段与外电网的购电交换功率; $c_{BE}(t)$ 为 t 时段外电网售电价格; $s(t)$ 为与外电网的交换状态,有交换表示为 1,无交换表示为 0.

购天然气成本表达式为

$$C_{gas} = \sum_{t=1}^d c_{gas}(t) \frac{P_{ICE}(t)}{\eta_E} T \quad (3)$$

式中, $c_{gas}(t)$ 为 t 时段天然气单价; $P_{ICE}(t)$ 为 t 时段内燃机发电功率; η_E 为内燃机发电效率.

日售电收益、日售冷热收益如式 (4) 和式 (5) 所示.

$$S_E = \sum_{t=1}^d c_{ME}(t)P_{ME}(t)T + \sum_{t=1}^d c_{WE}(t)P_{WE}(t)T \quad (4)$$

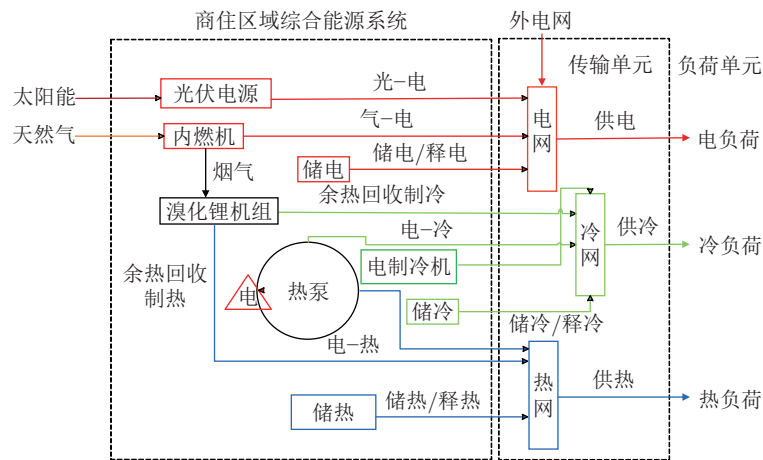


图 1 商业住宅区域综合能源系统架构

Fig.1 Integrated energy system architecture for commercial and residential area

$$\begin{aligned}
S_H = & \sum_{t=1}^d c_{MH}(t)P_{MH}(t)T + \\
& \sum_{t=1}^d c_{WH}(t)P_{WH}(t)T + \\
& \sum_{t=1}^d c_{ML}(t)P_{ML}(t)T + \\
& \sum_{t=1}^d c_{WL}(t)P_{WL}(t)T \quad (5)
\end{aligned}$$

式中, $c_{ME}(t)$, $c_{MH}(t)$, $c_{ML}(t)$, $c_{WE}(t)$, $c_{WH}(t)$, $c_{WL}(t)$ 分别为 t 时段向用户售电单价、 t 时段向用户售热单价、 t 时段向用户售冷单价、 t 时段向外网售电单价、 t 时段向外网售热单价、 t 时段向外网售冷单价; $P_{ME}(t)$, $P_{MH}(t)$, $P_{ML}(t)$, $P_{WE}(t)$, $P_{WH}(t)$, $P_{WL}(t)$ 分别为 t 时段用户电负荷、 t 时段用户热负荷、 t 时段用户冷负荷、 t 时段与外网的售电交换功率、 t 时段与外网的售热交换功率、 t 时段与外网的售冷交换功率。

2) 一次能源利用率

对于区域综合能源系统, 一次能源利用率是衡量能源利用效果的评价指标, 表达式为

$$\varphi = \frac{\sum_{t=1}^d P_{ICE}(t)T + \sum_{t=1}^d \frac{P_X(t)}{\omega_X}T + \sum_{t=1}^d P_{WE}(t)T}{\sum_{t=1}^d \frac{P_{ICE}(t)}{\eta_E}T + \sum_{t=1}^d \frac{s(t)P_{BE}(t)}{\eta_w \eta_s}T} \quad (6)$$

式中, η_w 为发电厂发电效率; η_s 为外电网输电效率; $P_X(t)$ 为溴化锂余热回收机组 t 时段出力; ω_X 为溴化锂余热回收机组能效系数 (COP)。

1.3 约束条件

1.3.1 系统平衡方程

1) 电负荷平衡方程

$$\begin{aligned}
P_{ICE} + P_{BE} + P_V + P_{ES,D} = \\
P_{ME} + P_{ES,C} + P_{WE} + P_{SB} \quad (7)
\end{aligned}$$

式中, P_V 为光伏出力功率; $P_{ES,D}$ 为储电设备放电功率; $P_{ES,C}$ 为储电设备充电功率; P_{SB} 为系统内设备用电量。

2) 热负荷平衡方程

$$\begin{aligned}
P_X \alpha_X + P_{HP} \alpha_{HP} + P_{HS,D} = \\
P_{MH} + P_{HS,C} + P_{WH} \quad (8)
\end{aligned}$$

式中, α_X 为溴化锂余热回收机组状态参数, 分为制冷、制热、停止运行三种状态; P_{HP} 为热泵机组出力; α_{HP} 为热泵机组状态参数, 分为制冷、制热、停

止运行三种状态; $P_{HS,D}$ 为储电设备放热功率; $P_{HS,C}$ 为储电设备蓄热功率。

3) 冷负荷平衡方程

$$\begin{aligned}
P_X \alpha_X + P_{HP} \alpha_{HP} + P_{LS,D} + P_Z = \\
P_{ML} + P_{LS,C} + P_{WL} \quad (9)
\end{aligned}$$

式中, $P_{LS,D}$ 为储冷设备放冷功率; $P_{LS,C}$ 为储冷设备蓄冷功率; P_Z 为电制冷机出力。

4) 溴化锂余热回收机组平衡方程

$$P_X = P_{ICE} \frac{\eta_Q}{\eta_E} \omega_X \quad (10)$$

式中, η_Q 为内燃机热效率。

1.3.2 系统内各设备出力约束

$$P_{i,\min} \leq P_i \leq P_{i,\max}, \quad i \in N \quad (11)$$

式中, P_i 为系统内第 i 种设备的出力; $P_{i,\max}$, $P_{i,\min}$ 为系统内第 i 种设备的出力上下限; N 为系统内设备集合。

1.3.3 储能设备约束

$$\begin{cases}
U_j(t+1) = U_j(t) + \\
\left(P_{j,C}(t)\eta_{j,C} - \frac{P_{j,D}(t)}{\eta_{j,D}} \right) T \\
U_{j,\min} \leq U_j(t+1) \leq U_{j,\max} \\
P_{j,C,\min} \leq P_{j,C}(t) \leq P_{j,C,\max} \\
P_{j,D,\min} \leq P_{j,D}(t) \leq P_{j,D,\max}
\end{cases} \quad (12)$$

式中, $U_j(t+1)$, $U_j(t)$ 分别为储能设备 j 在时间点 $t+1$ 和 t 的负荷量; $P_{j,C}(t)$, $P_{j,D}(t)$ 分别为储能设备 j 在时间点 t 的充能功率和放能功率; $\eta_{j,C}$, $\eta_{j,D}$ 分别为储能设备 j 在时间点 t 的充能效率和放能效率; $U_{j,\max}$, $U_{j,\min}$ 分别为储能设备 j 的负荷量上下限; $P_{j,C,\max}$, $P_{j,C,\min}$, $P_{j,D,\max}$, $P_{j,D,\min}$ 分别为储能设备 j 的充能功率上下限和放能功率上下限; $j \in D$, D 为系统内储能设备集合。

1.4 模型描述

本文充分考虑区域综合能源系统装置间的耦合性以及能源的梯级利用, 把内燃机每时段出力设为优化变量, 采用“以电定热”的方式, 光伏设备每时段功率由预测得出, 其他设备每时段出力根据约束条件求得。商住区域综合能源系统主要由光伏电源、内燃机、溴化锂机组、电网、冷网、热网组成, 传统的能源系统相对独立, 供能设备之一燃气内燃机作为商住区域综合能源系统耦合核心元件。该 RIES 将独立运行的电、气、热系统以及分布式能源系统在特定区域范围内进行综合管理, 实现了冷、热、电、气、太阳能等多种能源的协调互补和集成优化。对

于电网, 用户电负荷主要由内燃机与光伏出力满足, 不足部分由储电装置与外电网补充; 内燃机与光伏出力超出用户电负荷部分作为储电装置能量来源与系统内部设备用电能量来源, 如还有余量, 则与外网进行售电交换. 对于热网, 用户热负荷主要由溴化锂余热回收机组出力满足, 不足部分由储热装置与热泵出力补充; 溴化锂余热回收机组出力超出用户热负荷部分作为储热装置能量来源, 如还有余量, 则与外网进行售热交换. 对于冷网, 用户冷负荷主要由溴化锂余热回收机组出力满足, 不足部分由储冷设备与热泵出力补充, 如依然不足, 则由电制冷机出力提供; 溴化锂余热回收机组出力超出用户冷负荷部分作为储冷装置能量来源, 如还有余量, 则与外网进行售冷交换. 模型如式 (13) 所示.

$$\begin{aligned} \max y &= (S, \varphi) \\ \text{s.t. } g(x) &\leq 0 \\ h(x) &= 0 \\ x_{d, \min} &\leq x_d \leq x_{d, \max} \end{aligned} \quad (13)$$

式中, $g(x)$ 为不等式约束, $h(x)$ 为等式约束; $x_{d, \max}$, $x_{d, \min}$ 为每时段内燃机出力上下限; d 为一天运行的时段数.

2 基于动态层次分析的多目标鲸鱼优化算法

传统的鲸鱼优化算法为单目标优化算法, 本文通过引入基于非支配以及拥挤度排序的多目标算法框架, 利用模糊一致矩阵选取全局最优解, 提出一种基于动态层次分析的多目标鲸鱼优化算法 (AMO-WOA).

2.1 鲸鱼优化算法

鲸鱼优化算法 (Whale optimization algorithm, WOA)^[30] 是于 2016 年提出的一种模拟鲸鱼群体捕食行为的启发式单目标优化算法. 该算法具有原理简单、易实现、参数少等优势, 且相关研究发现, 在对基准函数进行测试时, WOA 的收敛速度与优化精度均明显优于粒子群算法、模拟退火算法等一些传统优化算法^[31]. 鲸鱼优化算法分为 3 个阶段, 分别为包围猎物、泡网攻击、搜寻猎物.

1) 包围猎物阶段

在 WOA 中, 鲸鱼通过一种包围方式逐步接近猎物, 假设目标猎物为当前最优解, 群体中的其他个体位置均向最优解位置进行移动, 更新位置方式为

$$D = |C \cdot \mathbf{X}^*(itev) - \mathbf{X}(itev)| \quad (14)$$

$$\mathbf{X}(itev + 1) = \mathbf{X}^*(itev) - \mathbf{A} \cdot D \quad (15)$$

式中, $\mathbf{X}^*(itev) = (X_1^*, X_2^*, \dots, X_V^*)$ 表示当前最优解即目标猎物的位置向量; $itev$ 代表当前迭代次数; $\mathbf{X}(itev)$ 表示当前解的位置向量; $\mathbf{A} \cdot D$ 表示包围步长, 其中, \mathbf{A} 定义如下:

$$\mathbf{A} = 2a \cdot \mathbf{rand}() - a \quad (16)$$

式中, $\mathbf{rand}()$ 表示 [0, 1] 之间的随机向量.

$$C = 2 \cdot \mathbf{rand}() \quad (17)$$

式中, $\mathbf{rand}()$ 表示 [0, 1] 之间的随机数; a 表示收敛因子, 随着迭代次数的增加从 2 线性递减到 0, 其表示为

$$a = \left(2 - \frac{2itev}{it_{\max}} \right) \quad (18)$$

式中, it_{\max} 表示最大迭代次数.

2) 泡网攻击阶段

在 WOA 中, 鲸鱼的捕食行为由两种方式描述, 分别为收缩包围机制和螺旋更新位置.

a) 收缩包围机制: 通过不断包围猎物中的收敛因子 a 的值来实现.

b) 螺旋更新位置: 首先计算当前个体与最优解位置之间的距离, 然后以螺旋的方式靠近最优解的位置, 其数学模型可以表示为

$$\mathbf{X}(itev + 1) = D^* \times e^{bl} \times \cos(2\pi l) + \mathbf{X}^*(itev) \quad (19)$$

式中, $D^* = \mathbf{X}^*(itev) - \mathbf{X}(itev)$ 表示当前个体和当前最优位置之间的距离; b 为常量系数, 用来限定对数螺旋形式; l 表示 [0, 1] 之间随机数.

鲸鱼捕获目标猎物时, 不仅以螺旋的方式靠近猎物位置, 而且还进行收缩包围行为, 因此, 为实现这两种操作, 需要选择概率系数 p 进行收缩包围机制和螺旋位置更新, 其数学模型表示为

$$\mathbf{X}(itev + 1) = \begin{cases} D^* \times e^{bl} \times \cos(2\pi l) + \mathbf{X}^*(itev), & p > 0.5 \\ \mathbf{X}^*(itev) - \mathbf{A} \cdot D, & p \leq 0.5 \end{cases} \quad (20)$$

3) 搜寻猎物阶段

当 $|A| \geq 1$ 时, 鲸鱼会远离参考目标进行搜寻, 从而找到一个更优的猎物, 其数学模型表示为

$$D = |C \cdot \mathbf{X}_{\text{rand}} - \mathbf{X}(itev)| \quad (21)$$

$$\mathbf{X}(itev + 1) = \mathbf{X}_{\text{rand}} - \mathbf{A} \cdot D \quad (22)$$

式中, \mathbf{X}_{rand} 表示随机选取的位置向量.

2.2 最优解的选取以及外部归档集的更新策略

1) 最优解选取

针对最大化多目标优化问题, 对于 n 个目标函

数 $f_i(x)$, $i = 1, 2, \dots, n$, 任意给定两个决策变量 X_a, X_b , 若有式 (23) 成立, 则称 X_a 支配 X_b . 如果对于一个决策变量, 不存在其他决策变量能够支配, 那么就称该决策变量为非支配解.

$$\begin{cases} f_i(X_a) \geq f_i(X_b), & \forall i \in 1, 2, \dots, n \\ f_i(X_a) < f_i(X_b), & \exists i \in 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (23)$$

本文参考多目标粒子群优化算法 (MOPSO)^[32] 的思想, 将全局最优解作为泡网攻击的目标, 将局部最优解作为搜寻猎物的目标. 对于局部最优解, 基于解的支配关系和随机方式进行选取, 即当个体移动位置后能够支配局部最优解时, 选取移动位置后的个体作为当前局部最优解; 当移动位置后的个体与当前局部最优解互不支配时, 随机选择两者作为局部最优解, 从而保证解的分布性和非支配性. 对于全局最优解, 充分利用鲸鱼移动位置过程中已获得的信息, 基于 Pareto 非支配解集根据动态层次分析法选择全局最优解, 保证全局最优解选取过程中的有效性和客观性.

2) 三标度动态层次分析方法

层次分析法 (Analytic hierarchy process, AHP) 是一种基于模糊一致判断矩阵的综合指标评价方法. 文献 [32] 采用一种三标度的方式, 使得建立之后的判断矩阵具有较好的一致性和综合性. 待评价解表示为

$$S = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} & \cdots & s_{1n} \\ s_{21} & s_{22} & \cdots & s_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ s_{m1} & s_{m2} & \cdots & s_{mg} \end{bmatrix} \quad (24)$$

式中, S 为解集合, m 为待评价解个数, g 表示属性个数. 对解集合中解的每个属性进行重要性评估, $b_{i,j}^l$ 代表重要性指标, 其取值如下:

$$b_{i,j}^l = \begin{cases} 0, & s_{il}^* < s_{jl}^* \\ 0.5, & s_{il}^* = s_{jl}^* \\ 1, & s_{il}^* > s_{jl}^* \end{cases} \quad (25)$$

式中, $i, j \in \{1, 2, \dots, m\}$; $l \in \{1, 2, \dots, n\}$, 由式 (26) 可以得出判断一致矩阵中的各个元素, 即

$$C^l = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & \cdots & c_{1n} \\ c_{21} & c_{22} & \cdots & c_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{n1} & c_{n2} & \cdots & c_{nn} \end{bmatrix} \quad (26)$$

式中,

$$c_{i,j} = \frac{e_i^l - e_j^l}{2^\alpha n} + 1 \quad (27)$$

$$e_i^l = \sum_{j=1}^m b_{i,j}^l \quad (28)$$

式中, $\alpha \in \{0, 1, 2, 3\}$, 为敏感因子. 根据一致判断矩阵的特点, 采用乘积方根法计算每组权重并对其进行归一化, 得

$$\omega_i^l = \frac{(\prod_{j=1}^n c_{i,j}^l)^{\frac{1}{n}}}{\sum_{l=1}^m (\prod_{j=1}^n c_{i,j}^l)^{\frac{1}{n}}} \quad (29)$$

则第 i 个待评价解的综合评价函数为

$$p_i = \sum_{j=1}^n \omega_j^l s_{i,j} \quad (30)$$

3) 外部归档集的更新策略

本文将拥挤度排序作为外部归档集更新和维护策略. 对于每个目标函数, 个体拥挤度计算式为

$$n_d = n_d + \frac{f_m^{i+1} - f_m^{i-1}}{f_m^{\max} - f_m^{\min}} \quad (31)$$

式中, f_m^{\max} , f_m^{\min} 分别为目标函数最大值和最小值; f_m^{i-1} , f_m^{i+1} 分别为降序排列后前一个体和后一个体的目标函数值.

拥挤度可以直观地表现出解的分布情况, 当拥挤度越大时, 解的分布性也越好, 反之分布性则越差. 故对外部归档集进行更新和维护操作时, 可以根据拥挤度大小筛选出较大的解、淘汰较小的解, 从而维护解的多样性和分布性.

2.3 算法流程

AMOWOA 步骤如下:

步骤 1. 初始化种群大小、迭代次数等参数, 随机初始化种群中每个个体的位置, 以及初始化个体局部最优.

步骤 2. 计算每个初始种群个体的目标函数值.

步骤 3. 根据层次分析法选取整个种群的全局最优解, 进行种群位置移动方向的引导.

步骤 4. 根据 $|A|$ 与 p 的值以及判断条件利用式 (19) 和式 (20) 对种群每一个个体位置进行更新.

步骤 5. 利用支配原则以及拥挤度计算的更新策略, 对种群中的局部最优解进行更新.

步骤 6. 判断当前粒子是否为最后一个粒子, 若否, 则返回到步骤 4.

步骤 7. 判断是否达到迭代次数或者满足种群迭代结束条件, 若是, 则输出结果并结束, 否则返回到步骤 3.

2.4 算法性能验证

本文使用多目标优化标准测试函数 ZDT1、ZDT2、

ZDT3 对 AMOWOA 的性能进行验证 (具体函数表达式参见附录 A), 并采用文献 [33] 中的收敛度和多样性两个指标作为度量来验证解的分布性与多样性.

收敛度表示解集中的每个点到参考集中最小距离的平均值, 计算式为

$$\delta = \frac{1}{N} \sum \min |f - f'| \quad (32)$$

式中, N 为非支配解集的大小; f 为算法所获得的非支配解集; f' 为真实的非支配解集, 其值越小表示算法收敛性越好.

多样性表示所获得解集的广泛程度, 计算式为

$$\varphi = \frac{l_f + l_m + \sum_{i=1}^{N-1} |l_i - \bar{l}|}{l_f + l_m + (N-1)\bar{l}} \quad (33)$$

式中, l_f 和 l_m 分别为算法所获解集中极值解之间距离和每个目标间边界解距离; l_i 为算法所获解集中连续两个解之间距离; \bar{l} 为 l_i 的平均值, 其值越小表示算法所获得的解分布越均匀.

将本文提出的 AMOWOA 与 NSGA-II^[34] 算法、MOPSO^[35] 算法等基于多目标优化标准测试函数进

行实验对比, 运行后优化结果如图 2~4 所示. 其中种群数量为 100、最大迭代次数为 500 次, NSGA-II 算法交叉概率和变异概率分别为 0.9 和 0.1, AMOWOA 中两个优化目标重要性指标均相同. 表 1 和表 2 给出了运行后算法的收敛度和多样度的结果对比, PESA-II、NSPSO 算法结果来自文献 [36]. 数据由各种算法对每个测试函数独立运行 10 次后求得, 其中 M 为均值, V 为方差.

从图 2~4 以及表 1 和表 2 可以看出, 对于所有函数, 本文算法的收敛度整体都优于其他算法, 并且由于利用层次分析法选取全局最优解, 算法运行所获得的最优解集更接近于真实的 Pareto 前沿, 具有较好的收敛性. 就分布性而言, 对于 3 种测试函数, 本文算法的多样性基本都优于其他算法, 具有较好的分布性.

3 算例分析

本文采用我国华东某商住混合区域综合能源系统为算例, 选择该系统冬季某典型日进行运行优化研究. 该系统全时段售冷、售热价格均为 100 元/GJ,

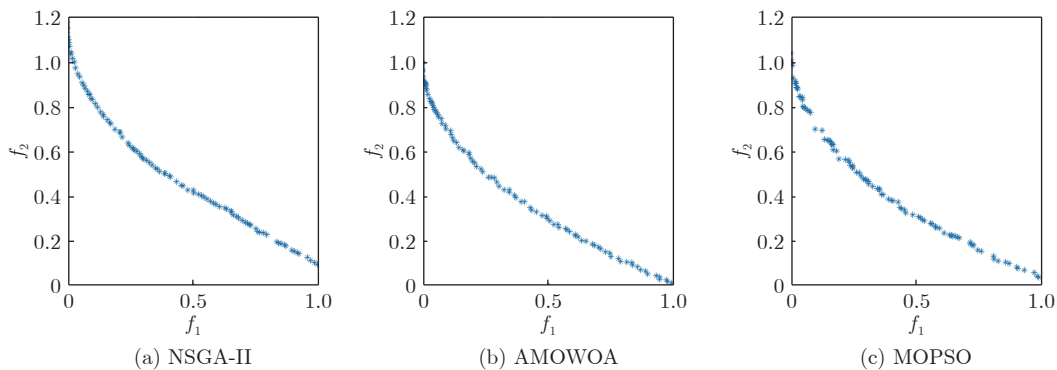


图 2 ZDT1 优化结果

Fig.2 ZDT1 optimization results

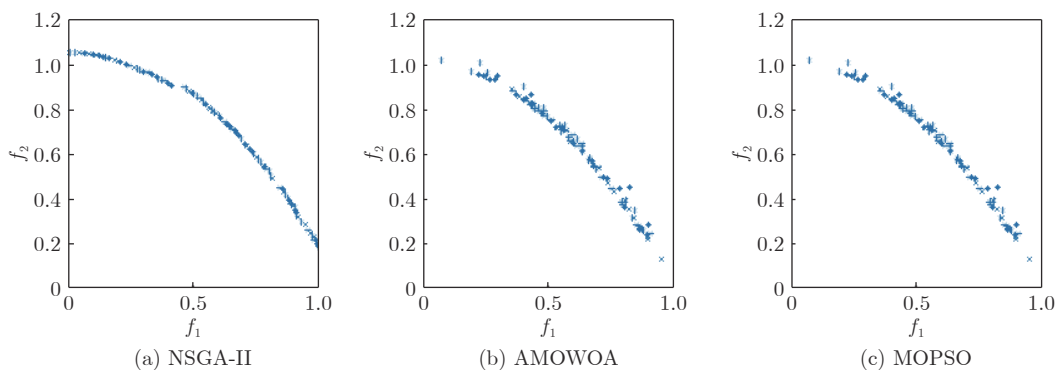


图 3 ZDT2 优化结果

Fig.3 ZDT2 optimization results

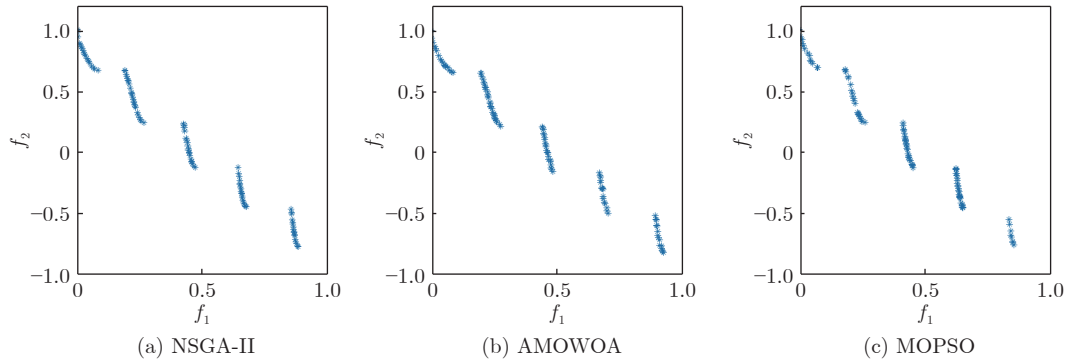


图 4 ZDT3 优化结果

Fig.4 ZDT3 optimization results

表 1 收敛度对比

Table 1 Convergence contrast

算法	指标	ZDT1	ZDT2	ZDT3
AMOWOA	M	9.41×10^{-4}	9.59×10^{-4}	9.68×10^{-4}
	V	2.26×10^{-5}	3.41×10^{-5}	2.16×10^{-5}
NSGA-II	M	9.79×10^{-4}	9.68×10^{-4}	9.84×10^{-4}
	V	4.88×10^{-5}	5.84×10^{-5}	3.63×10^{-5}
MOPSO	M	9.46×10^{-4}	1.42×10^{-3}	9.73×10^{-4}
	V	3.42×10^{-5}	8.26×10^{-5}	3.79×10^{-5}
PESA-II	M	1.05×10^{-3}	7.40×10^{-4}	7.89×10^{-3}
	V	0.00	0.00	1.10×10^{-4}
NSPSO	M	6.42×10^{-3}	9.51×10^{-3}	4.91×10^{-3}
	V	0.00	0.00	0.00

表 2 多样性对比

Table 2 Diversity contrast

算法	指标	ZDT1	ZDT2	ZDT3
AMOWOA	M	0.65560	0.74680	0.79080
	V	0.02109	0.03116	0.02679
NSGA-II	M	0.74470	0.87290	0.78760
	V	0.02901	0.05793	0.06771
MOPSO	M	0.75250	0.93860	0.95170
	V	0.03574	0.06475	0.01563
PESA-II	M	0.84810	0.89290	1.22730
	V	0.00287	0.05740	0.02930
NSPSO	M	0.90700	0.92200	0.06210
	V	0.00	1.20×10^{-4}	6.90×10^{-4}

全时段售电价格为 0.651 元/kWh, 天然气进价为 0.337 元/kWh (折算后), 外网电价 0:00 ~ 8:00 时段为 0.365 元/kWh, 14:00 ~ 17:00、19:00 ~ 20:00

时段为 0.681 元/kWh, 其余时段均为 1.086 元/kWh. 在实际运行过程中, 由于供能设备之一燃气内燃机是商住区域综合能源系统耦合核心元件, 涉及电、气、热三种能源形式, 频繁调节出力会影响内燃机稳定运行, 故本文将内燃机调度时段步长设为 4 h, 即一天调度 6 次, 其他设备调度时段步长设为 1 h. 该商住区域冬季典型日各类型负荷参数以及日光伏预测功率如图 5 和图 6 所示^[37].

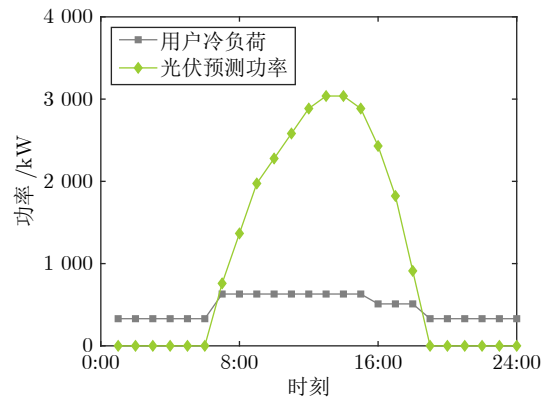


图 5 日均冷负荷与光伏预测功率曲线

Fig.5 Average daily cooling load and photovoltaic predicted power curves

由图 5 和图 6 可以明显看出, 该区域冬季日间冷负荷较低而电负荷与热负荷相对较高, 故溴化锂余热回收机组和热泵机组主要满足用户热负荷需求, 用户冷负荷需求由电制冷机满足. 该区域综合能源系统设备规格配置如表 3 所示, 其中内燃机型号采用 GE 颜巴赫 J612 型燃气内燃机, 模型其他参数如表 4 所示^[38]. 内燃机初始运行条件如表 5 所示^[39].

算例模型分别采用本文提出的 AMOWOA、NSGA-II 算法、MOPSO 算法进行求解, 其中迭代次数为 1 000, 种群为 100, NSGA-II 算法交叉概率

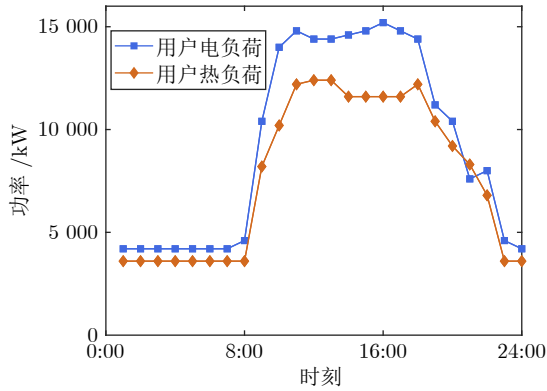


图 6 日均电负荷与日均热负荷曲线

Fig.6 Daily average electric load and daily average heat load curve

表 3 设备规格
Table 3 Specification of equipment

设备	配置容量	能效系数 (COP)
内燃机	10 000 kW	—
光伏	7 100 kW	—
电制冷机	2 000 kW	3.1
热泵	5 000 kW	4.4 (热)/5 (冷)
溴化锂余	8 000 kW	1.0
热机组		
蓄电池	6 000 kWh	0.9 (充/放)
储热设备	5 000 kWh	0.9 (充/放)
储冷设备	2 000 kWh	0.9 (充/放)

表 4 模型参数
Table 4 Model parameter

参数	数值
内燃机电效率	41.33%
内燃机热效率	40.54%
内燃机燃料热耗率	7 962.726 kJ/kWh
电网输电效率	92%
发电厂发电效率	37%

和变异概率分别为 0.9 和 0.1, AMOWOA 中两个优化目标重要性指标均相同, 该条件下的 Pareto 分布结果如图 7 所示. 从各算法的 Pareto 解集中取平均值与初始运行条件以及单供系统 (外网供电、热泵供热、电制冷机供冷) 进行比较, 结果如图 8 所示. 从图 7 和图 8 可以明显看出, 本文提出算法在该算例模型中收敛效果较好, 同时由于算法利用模糊一致矩阵选取全局最优解, 其 Pareto 分布在两种指标上也优于其他两种算法. 由结果可知, 日运行

表 5 初始运行条件
Table 5 Initial operating conditions

时段	内燃机出力 (kW)
1 (0:00-4:00)	4 000
2 (4:00-8:00)	4 000
3 (8:00-12:00)	8 000
4 (12:00-16:00)	8 000
5 (16:00-20:00)	8 000
6 (20:00-24:00)	4 000

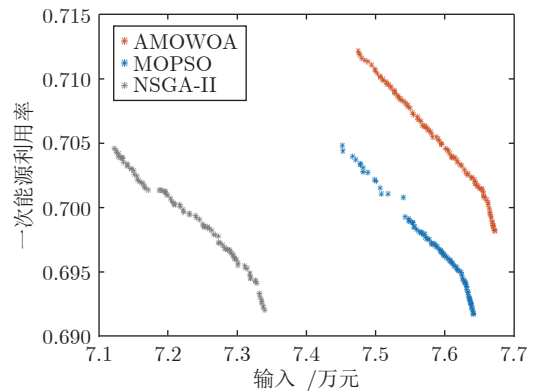


图 7 Pareto 分布对比

Fig.7 Pareto distribution of contrast

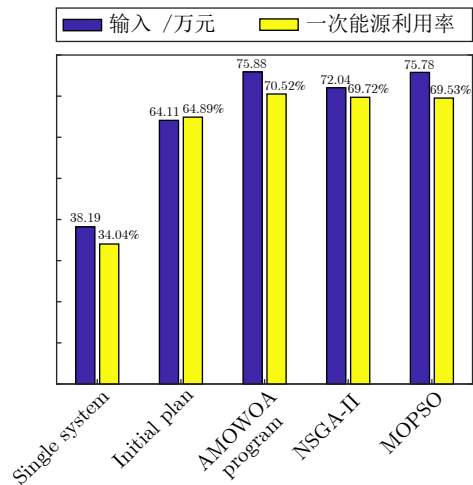


图 8 结果对比

Fig.8 Comparison of results

收益提高的同时一次能源利用率也会降低, 这是由于电价低谷期增大外网购电量会增加运行收益, 但系统能源利用率会随之降低.

同时, 综合能源系统相比较于单供系统具有更高的一次能源利用率和日运行收益, 体现了综合能

源系统相比单供系统具有能源利用率高、经济效益好等优势,且优化后运行方案明显优于初始运行方案.优化前后日运行收益和一次能源利用率两种指标都有明显提升,不但达到了提高经济效益的目的,也充分保证了能源的有效利用,验证了本文优化方法的有效性.由于算法运行后的优化结果仅为决策者提供决策范围,若要选择具体运行条件,决策者需要基于 Pareto 前沿根据偏好进行决策评估从而选择满意的解,故本文从 Pareto 非支配解集中随机选取一个个体,将其与初始运行条件进行内燃机全时段出力功率和储能设备全天负荷状态变化对比,比较结果如图 9 和图 10 所示.

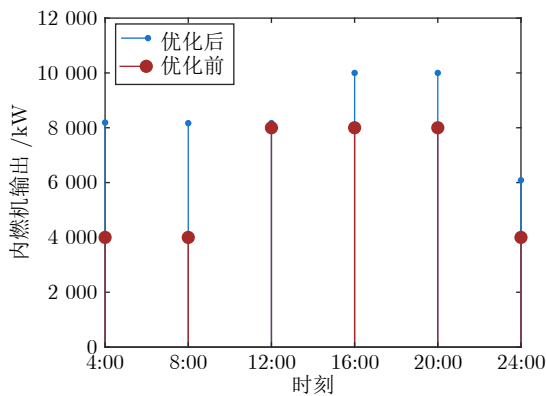


图 9 优化前后内燃机出力对比

Fig.9 Comparison of internal combustion engines before and after optimize output

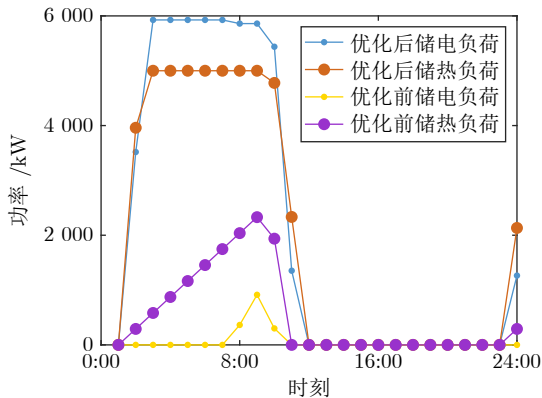


图 10 储能设备负荷对比

Fig.10 Load comparison of energy storage equipment

从图 9 和图 10 可以看出,优化后内燃机全时段出力相比原运行条件维持在一个较高水平,发挥了内燃机发电效率高、余热能回收利用的优势,同时优化后运行方案充分利用了储能设备削峰填谷的功能,使得储能资源很大程度参与调度,提高了系统运行的灵活性.

4 结束语

研究多目标运行优化策略是实现综合能源系统运行兼顾多项性能的重要手段.综合本文研究,可得以下结论:

1) 本文针对商住区域,利用一次能源利用率作为能效评价指标,以系统日运行收益及一次能源利用率为目标,构建了该区域综合能源系统多目标运行优化调度模型.

2) 由于传统智能优化算法种群进化方向合理性和客观性不足,本文提出一种基于动态层次分析的多目标鲸鱼优化算法,该算法利用模糊一致矩阵选取全局最优解从而保证种群朝着最优方向进化.

3) 算例结果表明,在优化模型中本文提出算法 Pareto 前沿较 NSGA-II 算法、MOPSO 算法对于日运行收益以及一次能源利用率两种指标优化效果更好,同时优化后两种指标都显著提升,验证了本文方法的可行性和有效性.同时为充分发挥多能耦合及互补优势,应该对供能设备以及储能设备进行联合调度,充分发挥储能设备削峰填谷功能.

在将来的研究中,我们将加入可再生能源的使用对商业住宅区域综合能源系统运行的影响,并结合其他多目标智能优化算法比如遗传算法、蚁群算法等综合考虑商业住宅的运行优化调度方案.

附录 A 多目标优化标准测试函数的具体说明

表 A1 多目标优化标准测试函数表达式

Table A1 Multi-objective optimization standard test functions expression

测试函数	表达式
ZDT1	$\begin{cases} \min f_1(x_1) = x_1 \\ \min f_2(x) = g \left(1 - \sqrt{\frac{f_1}{g}} \right) \\ g(x) = 1 + \frac{9 \sum_{i=2}^m x_i}{m-1} \end{cases}$
ZDT2	$\begin{cases} \min f_1(x_1) = x_1 \\ \min f_2(x) = g \left(1 - \left(\frac{f_1}{g} \right)^2 \right) \\ g(x) = 1 + \frac{9 \sum_{i=2}^m x_i}{m-1} \end{cases}$
ZDT3	$\begin{cases} \min f_1(x_1) = x_1 \\ \min f_2(x) = g \left(1 - \sqrt{\frac{f_1}{g}} - \left(\frac{f_1}{g} \right) \sin(10\pi f_1) \right) \\ g(x) = 1 + \frac{9 \sum_{i=2}^m x_i}{m-1} \end{cases}$

References

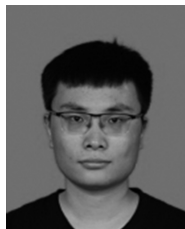
- Wang Wei-Liang, Wang Dan, Jia Hong-Jie, Chen Zhao-Yu, Guo Bing-Qing, Zhou Hai-Ming, et al. Review on steady state analysis of typical regional integrated energy system under the background of energy Internet. *Chinese Journal of Electrical Engineering*, 2016, **36**(12): 3292–3306
(王伟亮, 王丹, 贾宏杰, 陈沼宇, 郭炳庆, 周海明, 等. 能源互联网背景下的典型区域综合能源系统稳态分析研究综述. 中国电机工程学报, 2016, **36**(12): 3292–3306)
- Kim I, James J A, Crittenden J. The case study of combined cooling heat and power and photovoltaic systems for building customers using HOMER software. *Electric Power Systems Research*, 2017, **143**: 490–502
- Gu W, Wang Z H, Wu Z, Luo Z, Tang Y Y, Wang J. An online optimal dispatch schedule for CCHP microgrids based on model predictive control. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2017, **8**(5): 2332–2342
- Zhang X, Shahidehpour M, Alabdulwahab A, Abusorrah A. Optimal expansion planning of energy hub with multiple energy infrastructures. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2015, **6**(5): 2302–2311
- Qu Kai-Ping, Huang Lin-Ni, Yu Tao, Zhang Xiao-Shun. Decentralized scheduling of multi regional integrated energy system under carbon trading mechanism. *Chinese Journal of Electrical Engineering*, 2018, **38**(3): 697–707
(瞿凯平, 黄琳妮, 余涛, 张孝顺. 碳交易机制下多区域综合能源系统的分散调度. 中国电机工程学报, 2018, **38**(3): 697–707)
- Wu Ke-He, Wang Ji-Ye, Li Wei, Zhu Ya-Yun. Research on operation mode of new generation power system for energy Internet. *Chinese Journal of Electrical Engineering*, 2019, **39**(4): 966–979
(吴克河, 王继业, 李为, 朱亚运. 面向能源互联网的新一代电力系统运行模式研究. 中国电机工程学报, 2019, **39**(4): 966–979)
- Bie Chao-Hong, Lin Chao-Fan, Li Geng-Feng, Qiu Ai-Ci. Development and prospect of flexible power system under energy transformation. *Chinese Journal of Electrical Engineering*, 2020, **40**(9): 2735–2745
(别朝红, 林超凡, 李更丰, 邱爱慈. 能源转型下弹性电力系统的发展与展望. 中国电机工程学报, 2020, **40**(9): 2735–2745)
- Wang Y R, Zeng B, Guo J, Shi J Q, Zhang J H. Multi energy flow calculation method of electric heat gas integrated energy system. *Power Grid Technology*, 2016, **40**(10): 2942–2951
- Hajabdollahi H, Ganjehkaviri A, Jaafar M N M. Assessment of new operational strategy in optimization of CCHP plant for different climates using evolutionary algorithms. *Applied Thermal Engineering*, 2015, **75**: 468–480
- Liu Di-Chen, Ma Heng-Rui, Wang Bo, Gao Wen-Zhong, Wang Jun, Yan Bing-Ke. Operation optimization of regional integrated energy system with combined cooling, heating and power supply and energy storage. *Power System Automation*, 2018, **42**(4): 113–120, 141
(刘涤尘, 马恒瑞, 王波, 高文忠, 王骏, 闫秉科. 含冷热电联供及储能的区域综合能源系统运行优化. 电力系统自动化, 2018, **42**(4): 113–120, 141)
- Shi Quan-Sheng, Ding Jian-Yong, Liu Kun, Yan Wei. Economic optimization of microgrid integrated energy system with three kinds of energy storage including electricity, gas and heat. *Power Automation Equipment*, 2019, **39**(8): 269–276, 293
(施泉生, 丁建勇, 刘坤, 晏伟. 含电、气、热 3 种储能的微网综合能源系统经济优化运行. 电力自动化设备, 2019, **39**(8): 269–276, 293)
- Gu Jie, Bai Kai-Feng, Shi Ya-Jun. Optimal operation of regional comprehensive energy system based on multi-agent master-slave game optimization interaction mechanism. *Power Grid Technology*, 2019, **43**(9): 3119–3134
(顾洁, 白凯峰, 时亚军. 基于多主体主从博弈优化交互机制的区域综合能源系统优化运行. 电网技术, 2019, **43**(9): 3119–3134)
- Zheng Ya-Feng, Wei Zhen-Hua, Wang Chun-Yu. Hierarchical optimal scheduling of integrated energy system considering heat storage device. *Chinese Journal of Electrical Engineering*, 2019, **39**(S1): 36–43
(郑亚锋, 魏振华, 王春雨. 计及储热装置的综合能源系统分层优化调度. 中国电机工程学报, 2019, **39**(S1): 36–43)
- Fang Tong, Jiang Dong-Fang, Yang Yang, Yuan Tie-Jiang. Commercial operation mode of hydrogen integrated energy system based on NSGA-II and entropy weight method. *China Power*, 2022, **55**(1): 110–118
(方彤, 蒋东方, 杨洋, 袁铁江. 基于 NSGA-II 和熵权法的氢综合能源系统商业运营模式. 中国电力, 2022, **55**(1): 110–118)
- Qi Shi-Xiong, Wang Xiu-Li, Shao Cheng-Cheng, Wang Zhi-Dong, Zhu Cheng-Zhi. Multi objective optimal scheduling of regional integrated energy system considering elastic recovery. *China Power*, 2019, **52**(6): 19–26
(齐世雄, 王秀丽, 邵成成, 王智冬, 朱承治. 计及弹性恢复的区域综合能源系统多目标优化调度. 中国电力, 2019, **52**(6): 19–26)
- Wang Lei, Jiang Tao, Song Dan, Cui Yang, Hu Yang-Yu, Chai Xu-Zheng, et al. Multi objective optimal scheduling of regional integrated energy system based on flexible thermal power ratio. *Power System Protection and Control*, 2021, **49**(8): 151–159
(王磊, 姜涛, 宋丹, 崔杨, 胡扬宇, 柴旭峥, 等. 基于灵活热电比的区域综合能源系统多目标优化调度. 电力系统保护与控制, 2021, **49**(8): 151–159)
- Hua Huang-Sheng, Liu Yu-Quan, Xiong Wen, Xu Hang, Shi Yun-Hui, Dong Shu-Feng. Multi objective optimal operation of energy system considering comprehensive energy efficiency level. *China Southern Power Grid Technology*, 2018, **12**(3): 81–84
(华煌圣, 刘育权, 熊文, 徐航, 施云辉, 董树锋. 考虑综合能效水平的能源系统多目标优化运行. 南方电网技术, 2018, **12**(3): 81–84)
- Cheng Liang. Operation optimization scheduling strategy of regional integrated energy system based on robust optimization method. *Power System Equipment*, 2021, (18): 79–80
(程亮. 基于鲁棒优化方法的区域综合能源系统运行优化调度策略. 电力系统装备, 2021, (18): 79–80)
- Zhang Tao, Guo Yue-Tong, Li Yi-Hong, Yu Li, Zhang Jia-Ying. Optimal dispatching of regional integrated energy system considering comprehensive demand response of electrical and thermal. *Power System Protection and Control*, 2021, **49**(1): 52–61
(张涛, 郭玥彤, 李逸鸿, 余利, 章佳莹. 计及电气热综合需求响应的区域综合能源系统优化调度. 电力系统保护与控制, 2021, **49**(1): 52–61)
- Wei Zhen-Bo, Ren Xiao-Lin, Huang Yu-Han. Multi objective optimal scheduling of regional integrated energy system considering comprehensive demand side response. *Power Construction*, 2020, **41**(7): 92–99
(魏震波, 任小林, 黄宇涵. 考虑综合需求侧响应的区域综合能源系统多目标优化调度. 电力建设, 2020, **41**(7): 92–99)
- Geng Qi, Hu Yan, He Jian-Zong, Zhou Yong-Yan, Zhao Wei. Operation optimization of regional integrated energy system based on Nash negotiation. *Power Construction*, 2020, **41**(1): 114–125
(耿琪, 胡炎, 何建宗, 周永言, 赵伟. 基于纳什谈判的区域综合能源系统运行优化. 电力建设, 2020, **41**(1): 114–125)
- Shi Yun-Hui, Guo Chuang-Xin. Optimal scheduling of integrated energy system with energy storage considering operation risk. *Power Generation Technology*, 2020, **41**(1): 46–53
(施云辉, 郭创新. 考虑运行风险的含储能综合能源系统优化调度. 发电技术, 2020, **41**(1): 46–53)
- He Chang, Cheng Shan, Xu Jian-Yu, Fang Zi-Fan. Energy co-

- ordinated optimal scheduling of integrated energy system based on multi time scale and multi-source energy storage. *Journal of Power System and Automation*, 2020, **32**(2): 77–84, 97
(何畅, 程杉, 徐建宇, 方子凡. 基于多时间尺度和多源储能的综合能源系统能量协调优化调度. 电力系统及其自动化学报, 2020, **32**(2): 77–84, 97)
- 24 Cui Yang, Yan Shi, Zhong Wu-Zhi, Wang Zheng, Zhang Peng, Zhao Yu-Ting. Thermoelectric optimal scheduling of regional integrated energy system with electricity to gas. *Power Grid Technology*, 2020, **44**(11): 4254–4263
(崔杨, 闫石, 仲悟之, 王铮, 张鹏, 赵钰婷. 含电转气的区域综合能源系统热电优化调度. 电网技术, 2020, **44**(11): 4254–4263)
- 25 Zhang Hai-Jing, Yang Yong-Qi, Zhao Xin, Xu Nan, Li Chen-Hui, Xue Wan-Lei. Two-level optimal dispatching strategy for regional integrated energy system considering demand response. *China Power*, 2021, **54**(4): 141–150
(张海静, 杨雍琦, 赵昕, 徐楠, 李晨辉, 薛万磊. 计及需求响应的区域综合能源系统双层优化调度策略. 中国电力, 2021, **54**(4): 141–150)
- 26 Li Yu-Shuai, Li Tian-Yi, Gao Wei, Gao Wen-Zhong. Distributed cooperative optimal operation method of integrated energy system based on asynchronous dynamic event triggered communication strategy. *Journal of Automation*, 2020, **46**(9): 1831–1843
(李玉帅, 李天义, 高炜, 高文忠. 基于异步动态事件触发通信策略的综合能源系统分布式协同优化运行方法. 自动化学报, 2020, **46**(9): 1831–1843)
- 27 Geng Zhi-Qiang, Bi Shuai, Wang Zun, Zhu Qun-Xiong, Han Yong-Ming. Operation optimization of ethylene cracking furnace based on improved NSGA-II algorithm. *Journal of Chemical Engineering*, 2020, **71**(3): 1088–1094
(耿志强, 毕帅, 王尊, 朱群雄, 韩永明. 基于改进 NSGA-II 算法的乙烯裂解炉操作优化. 化工学报, 2020, **71**(3): 1088–1094)
- 28 Zeng Ming, Han Xu, Li Yuan-Fei, Liu Jin-Jie, Peng Li-Lin. Multi objective cooperative optimization operation of integrated energy system based on Tent map chaotic optimization NSGA-II algorithm. *Power Automation Equipment*, 2017, **37**(6): 220–228
(曾鸣, 韩旭, 李源非, 刘金洁, 彭丽霖. 基于 Tent 映射混沌优化 NSGA-II 算法的综合能源系统多目标协同优化运行. 电力自动化设备, 2017, **37**(6): 220–228)
- 29 Dong Shuai, Wang Cheng-Fu, Liang Jun, Dong Xiao-Ming, Liang Zheng-Tang, Li Hua-Dong. Multi objective day ahead optimal scheduling of integrated energy system considering the operation cost of electricity to gas. *Power System Automation*, 2018, **42**(11): 8–15
(董帅, 王成福, 梁军, 董晓明, 梁正堂, 李华东. 计及电转气运行成本的综合能源系统多目标日前优化调度. 电力系统自动化, 2018, **42**(11): 8–15)
- 30 Mirjalili S, Lewis A. The whale optimization algorithm. *Advances in Engineering Software*, 2016, **95**: 51–67
- 31 Kaur G, Arora S. Chaotic whale optimization algorithm. *Journal of Computational Design and Engineering*, 2018, **5**: 275–284
- 32 Huang Bo-Nan, Wang Yong, Li Yu-Shuai, Liu Xin-Rui, Yang Chao. Multi objective optimal scheduling of integrated energy system based on distributed neural dynamic optimization. *Journal of Automation*, 2022, **48**(7): 1718–1736
(黄博南, 王勇, 李玉帅, 刘鑫蕊, 杨超. 基于分布式神经动态优化的综合能源系统多目标优化调度. 自动化学报, 2022, **48**(7): 1718–1736)
- 33 Sun Cai-Zhi, Lin Xue-Yu. Fuzzy consistency judgment matrix based on analytic hierarchy process and its application. *Fuzzy Systems and Mathematics*, 2002, **16**(3): 59–63
(孙才志, 林学钰. 基于层次分析的模糊一致性判断矩阵及其应用. 模糊系统与数学, 2002, **16**(3): 59–63)
- 34 Chen Min-You, Zhang Cong-Yu, Luo Ci-Yong. Adaptive evolutionary multi-objective particle swarm optimization algorithm. *Control and Decision Making*, 2009, **24**(12): 1851–1855
(陈民铀, 张聪誉, 罗辞勇. 自适应进化多目标粒子群优化算法. 控制与决策, 2009, **24**(12): 1851–1855)
- 35 Deb K, Pratap A, Agarwal S, Meyarivan T. A fast and elitist multiobjective genetic algorithms: NSGA-II. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2002, **6**(2): 182–197
- 36 Xiong Luo-Lin, Mao Shuai, Tang Yang, Meng Ke, Dong Chao-Yang, Qian Feng. Summary of integrated energy system management based on reinforcement learning. *Journal of Automation*, 2021, **47**(10): 2321–2340
(熊珞琳, 毛帅, 唐漾, 孟科, 董朝阳, 钱锋. 基于强化学习的综合能源系统管理综述. 自动化学报, 2021, **47**(10): 2321–2340)
- 37 Gu Wei, Lu Shuai, Wang Jun, Yin Xiang, Zhang Cheng-Long, Wang Zhi-He. Heating network modeling and system operation optimization of multi area integrated energy system. *Chinese Journal of Electrical Engineering*, 2017, **5**: 1305–1315
(顾伟, 陆帅, 王珺, 尹香, 张成龙, 王志贺. 多区域综合能源系统热网建模及系统运行优化. 中国电机工程学报, 2017, **5**: 1305–1315)
- 38 Bai Mu-Ke, Wang Yue, Tang Wei, Wu Cong, Zhang Bo. Day ahead optimal scheduling of regional integrated energy system based on interval linear programming. *Power Grid Technology*, 2017, **12**: 240–247
(白牧可, 王越, 唐巍, 吴聪, 张博. 基于区间线性规划的区域综合能源系统日前优化调度. 电网技术, 2017, **12**: 240–247)
- 39 Wu Cong, Tang Wei, Bai Mu-Ke, Zhang Lu, Cai Yong-Xiang. User side energy Internet planning based on energy router. *Power System Automation*, 2017, **41**(4): 20–28
(吴聪, 唐巍, 白牧可, 张璐, 蔡永翔. 基于能源路由器的用户侧能源互联网规划. 电力系统自动化, 2017, **41**(4): 20–28)



韩永明 北京化工大学信息科学与技术学院教授。分别于 2009 年和 2014 年获得北京化工大学学士学位和博士学位。主要研究方向为知识图谱分析, 神经网络, 智能计算, 数据挖掘和分析。
E-mail: hanym@mail.buct.edu.cn

(HAN Yong-Ming Professor at the College of Information Science and Technology, Beijing University of Chemical Technology. He received his bachelor degree and Ph.D. degree from Beijing University of Chemical Technology, in 2009 and 2014, respectively. His research interest covers knowledge map analysis, neural network, intelligent computing, data mining and analysis.)



王新鲁 北京化工大学硕士研究生。2018 年获得北京化工大学学士学位。主要研究方向为食品安全风险预测预警, 多目标优化。
E-mail: wangxinlu_9102@126.com

(WANG Xin-Lu Master student at Beijing University of Chemical Technology. He received his bachelor degree from Beijing University of Chemical Technology in 2018. His research interest covers food safety risk prediction and early warning and multi-objective optimization.)



耿志强 北京化工大学信息科学与技术学院教授。1997年和2002年分别获得郑州大学学士学位和硕士学位。2005年获得北京化工大学博士学位。主要研究方向为神经网络, 智能计算, 数据挖掘, 知识管理与过程建模。本文通信作者。

E-mail: gengzhiqiang@mail.buct.edu.cn

(GENG Zhi-Qiang Professor at the College of Information Science and Technology, Beijing University of Chemical Technology. He received his bachelor degree and master degree from Zhengzhou University in 1997 and 2002, respectively. He received his Ph.D. degree from Beijing University of Chemical Technology in 2005. His research interest covers neural network, intelligent computing, data mining, knowledge management, and process modeling. Corresponding author of this paper.)



朱群雄 北京化工大学信息科学与技术学院教授。主要研究方向为计算智能与工业应用, 过程建模与系统优化, 故障诊断与报警管理, 虚拟现实与数字孪生。

E-mail: zhuqx@mail.buct.edu.cn

(ZHU Qun-Xiong Professor at the College of Information Science and Technology, Beijing

University of Chemical Technology. His research interest covers computational intelligence and industrial applications, process modeling and system optimization, fault diagnosis and alarm management, virtual reality and digital twinning.)



optimization.)

毕 帅 2021年获得北京化工大学硕士学位。主要研究方向为智能优化。

E-mail: bishuai@vip.qq.com

(BI Shuai Received his master degree from Beijing University of Chemical Technology in 2021. His main research interest is intelligent



张红斌 博士, 国网经济技术研究院有限公司教授级高级工程师。主要研究方向为智能配电网以及综合能源规划。

E-mail: hongbin09172015@163.com

(ZHANG Hong-Bin Ph.D., Professor-level senior engineer at the State Grid Economic and Technological Research Institute Co., Ltd.. His research interest covers intelligent distribution network and integrated energy planning.)