



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2408862

引用格式:党皓严,吴振奎,张继红,等.多场景下户用热泵直流微电网系统优化调度[J].科学技术与工程,2025,25(31):13437-13445.

Dang Haoyan, Wu Zhenkui, Zhang Jihong, et al. Optimized scheduling of DC microgrid systems for domestic heat pumps in multiple scenarios [J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(31): 13437-13445.

多场景下户用热泵直流微电网系统优化调度

党皓严,吴振奎*,张继红,刘鑫冉

(内蒙古科技大学自动化与电气工程学院,包头 014010)

摘 要 为了提高户用热泵直流微电网运行时的经济性与蓄电池使用寿命,建立了户用热泵直流微电网多场景联合优化模型,综合考虑了发电成本、放电成本、购电成本、售电收入、功率平衡约束及充放电时间约束等因素。以成本最低与蓄电池最优荷电状态为目标函数,利用改进的分群自适应粒子群优化算法平衡多目标优化的局部最优与全局最优问题。通过对比分析仿真结果,发现在不同场景下,改进粒子群算法的表现均优于其他算法。尤其在光伏发电量充足的晴天,该算法的运行成本比传统粒子群算法低 8.8%,比遗传算法低 24%,比线性规划算法低 13.9%。结果验证了改进粒子群算法在降低户用热泵微电网并网模式下日常运行成本方面的有效性。

关键词 光伏发电;微电网;优化调度策略;改进粒子群优化算法;惯性权重;学习因子

中图分类号 TM731;

文献标志码 A

Optimized Scheduling of DC Microgrid Systems for Domestic Heat Pumps in Multiple Scenarios

DANG Hao-yan, WU Zhen-kui*, ZHANG Ji-hong, LIU Xin-ran

(School of Automation and Electrical Engineering, Inner Mongolia University of Science & Technology, Baotou 014010, China)

[Abstract] In order to improve the economy and battery service life during the operation of household heat pump DC microgrid, a multi-scenario joint optimization model of household heat pump DC microgrid was established, which took into account the factors of power generation cost, discharge cost, power purchase cost, power sales revenue, power balance constraints, and charging/discharging time constraints. Taking the lowest cost and the optimal battery charging state as the objective function, the improved swarm adaptive particle swarm optimization algorithm was used to balance the local optimization and global optimization problems of multi-objective optimization. By comparing and analyzing the simulation results, it is found that the improved particle swarm algorithm outperforms the other algorithms in different scenarios. Especially in sunny days with sufficient PV power generation, the operation cost of this algorithm is 8.8% lower than the traditional particle swarm algorithm, 24% lower than the genetic algorithm, and 13.9% lower than the linear programming algorithm. The results validate the effectiveness of the improved particle swarm algorithm in reducing the daily operating cost in the grid-connected mode of household heat pump microgrid.

[Keywords] photovoltaic power generation; microgrid; optimal scheduling strategy; improved particle swarm optimization algorithm; inertia weights; learning factors

随着中国新能源政策的推进,以风电、光伏为代表的新能源逐步取代传统发电机组,开始大量接入微电网^[1]。中国北方拥有丰富的太阳能资源,但是冬季主要以煤为燃料取暖,导致了严重的环境污染。在供热过程中,寻求更为洁净的能源、降低能耗和实现供热自给是供热发展的新趋势^[2]。在此

背景下,中国北方地区“煤改电”的电价政策使谷时段的电价降至 0.165 元/kWh,而峰时段为 0.465 元/kWh^[3]。

近年来,粒子群优化算法、灰狼优化算法等群智能优化算法在微电网经济问题优化中应用广泛。例如,陈将宏等^[4]提出了一种混合策略改进的北方

收稿日期:2024-11-27 修订日期:2025-04-06

基金项目:内蒙古自治区科技攻关项目(2021GG0018);内蒙古自治区重点研发与成果转化项目(2022YFHH0019);内蒙古自治区新型重要能源综合利用技术集成攻关大平台建设项目(2023PTXM001)

第一作者:党皓严(1999—),男,汉族,陕西宝鸡人,硕士研究生。研究方向:热电微网能量管理控制策略与优化调度。E-mail:danghy1999@163.com。

* 通信作者:吴振奎(1973—),男,汉族,甘肃庄浪人,博士,教授,硕士研究生导师。研究方向:微电网协调控制和分布式发电技术。E-mail:wuzk1973@126.com。

苍鹰算法,建立日运行成本最低的微电网调度模型,将模拟退火算法中的 Metropolis 准则引入北方苍鹰算法的第二阶段位置更新中,并用其求解,实验结果表明此算法求解精度更高。高瑜等^[5]提出了一种基于改进的灰狼算法的并网交流微电网的经济优化方案。加入了非线性变化的收敛因子,建立了并网的交流微电网模型,通过仿真,验证了改进的灰狼算法的优越性。赵超等^[6]针对风-光-蓄-柴独立微电网容量优化配置问题,提出一种基于改进灰狼算法(improved grey wolf optimization, IGWO)的优化求解方法,建立以年均系统成本最小化为目标的微电网优化配置模型,并采用改进灰狼算法对该模型进行求解,获得最优电源容量配置方案。Sahoo 等^[7]提出一种无管制环境下微电网竞价策略模型,采用改进鲸鱼优化算法进行求解,并与鲸鱼优化算法、蝙蝠优化算法等进行对比,优化了整体经济成本。

粒子群优化算法作为一种基于种群的进化算法,算法中的粒子是根据个体粒子和群体的经验进行更新的^[8]。然而,在处理复杂问题时,发现它容易陷入局部最优。为此,王继东等^[9]提出了一种多智能体的混沌粒子群优化算法应用于微电网优化,引入多智能体网络代替粒子,再将混沌搜索机制引入搜索过程,避免陷于局部最优。赵晓妍等^[10]提出了一种聚集度指标引导的注意力学习粒子群优化算法,通过增加种群多样性来确保收敛精度,避免陷入局部最优。黄亚峰等^[11]提出了一种基于自适应权重粒子群优化算法的分布式光伏并网功率控制方法,该方法依据粒子群优化,控制指定区域的微电网并网功率,但是算法只能控制微电网并网的部分区域,无法达到精准控制。Wang 等^[12]基于粒子群算法求解了多场景下含风光互补微电网的优化调度,但是缺乏与其他算法的对比来佐证优越性。陈晓华等^[13]提出一种改进的粒子群算法,通过对参数改进增加求解的准确性,但是对惯性权重的调整仍然太过单一。韩顺杰等^[14]在粒子群算法中加入了 Levy 飞行策略与 Cauchy 变异策略来提升种群的多样性,但对学习因子没有优化。向开端等^[15]将粒子群算法惯性权重由定值改为非线性变化,但求解仍缺乏多样性。

基于以上分析,针对并网型户用热泵直流微电网优化调度问题,提出一种改进的分群自适应粒子群(improved particle swarm optimization, IPSO)算法,将群体中的粒子按其适应度分为寻优粒子、一般粒子和探索粒子。利用改变惯性权重使三类各司其职,增加求解的多样性,并且将对应改进的学习因

子加入该算法中,解决了传统粒子群无法很好的平衡全局寻优和局部寻优的问题,使算法求解时精度更高且具备传统粒子群(particle swarm optimization, PSO)算法求解速度快的优点。

1 户用热泵直流微电网多场景优化运行模型

1.1 户用热泵直流微电网系统结构

与传统的配电网不同,微电网通常连接到光伏(photovoltaics, PV)和电池,如图 1 所示。光伏发电将太阳能转换为直流电能。光伏发电容易受到自然环境的影响。蓄电池在微电网中起到削峰填谷的作用。

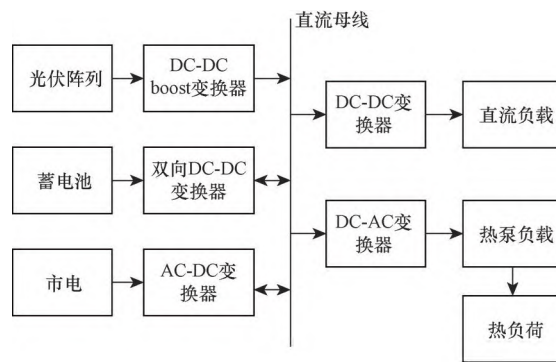


图 1 户用热泵直流微电网结构图

Fig. 1 Structure of DC microgrid for domestic heat pumps

1.2 目标函数

在具体分析系统中运行成本后,考虑微电网优化周期内的发电成本最低。本文中忽略了微电网中的线路损耗。目标函数可以定义为

$$W_{\min} = WS + WN + WC \quad (1)$$

1.2.1 发电成本

本文中微电网的发电成本为光伏发电成本,即

$$WS = \sum_{t=1}^T \lambda P_{v,t} \Delta t \quad (2)$$

式(2)中:WS 为微电网运行一个周期 Δt 内可再生能源发电的成本; $P_{v,t}$ 为光伏模块的发电量; λ 为光伏发电每千瓦时的平均发电成本。

1.2.2 购电成本

微电网在运行过程中,当电力不足时,需要从主电网购买电能以满足负荷需求,成本为

$$WN_{\text{buy}} = \sum_{t=1}^T [x \theta_{1,t} (P_{1,t} - P_{v,t}) \Delta t] \quad (3)$$

式(3)中: WN_{buy} 为微电网在一个周期 Δt 内所发电能的购买成本; $P_{1,t}$ 为 t 时刻的负载功率; $\theta_{1,t}$ 为 t 时刻的电能购买价格; x 为购买系数,当微电网内部供给不足以满足负荷需求时, $x > 0$,微电网从主电网

购买电能,以保证负载的供电。

1.2.3 售电收入与主网交互总成本

$$WN_{\text{sell}} = \sum_{t=1}^T [x\theta_{2,t}(P_{v,t} - P_{l,t})\Delta t] \quad (4)$$

$$WN = WN_{\text{buy}} + WN_{\text{sell}} \quad (5)$$

式中: WN_{sell} 为微电网在一个周期 Δt 内产生的电能销售收入; $\theta_{2,t}$ 为微电网在 t 时刻向主电网出售电能的价格; x 为微电网的售电决策变量。当微电网在 t 时刻的新能源发电功率大于负荷功率时,微电网具有充裕的电力生产。此时, $x < 0$, 微电网可以将电能出售给主电网。当 t 时刻微电网的可再生能源发电量小于负荷功率时,微电网无剩余电能可售。与主电网交互的总成本如式(5)表示,售电时由于出力已经是负号啦,算出来的值为负数。

1.2.4 储能成本

$$WC = \sum_{t=1}^T \lambda_{\text{bat},t} P_{\text{bat},t} \Delta t \quad (6)$$

式(6)中: WC 为微电网运行的一个周期内储能系统购电的成本; $\lambda_{\text{bat},t}$ 为成本系数。

1.3 约束条件

(1) 为了保护光伏器件的电源,延长它们的使用寿命,微电网的输出功率应满足关系式

$$0 \leq P_{v,t} \leq P_{v,t}^{\max} \quad (7)$$

式(7)中: $P_{v,t}$ 为光伏发电模块的输出功率; 0 和 $P_{v,t}^{\max}$ 分别为光伏发电器件输出功率的下限和上限。

(2) 为防止线路损坏和设备损坏,微电网与主电网之间的交换功率应满足关系式

$$P_{\text{pgrid},t}^{\min} \leq P_{\text{pgrid},t} \leq P_{\text{pgrid},t}^{\max} \quad (8)$$

式(8)中: $P_{\text{pgrid},t}^{\min}$ 和 $P_{\text{pgrid},t}^{\max}$ 分别为微电网和主电力网络之间的交换功率的下限和上限。

(3) 蓄电池充电状态(state of charge, SOC)约束式为

$$SOC_{\min} \leq SOC_t \leq SOC_{\max} \quad (9)$$

$$-0.25\sigma \leq SOC_t - SOC_{t+1} \leq 0.25\sigma \quad (10)$$

式(9)中: SOC_t 为 t 时刻电池的充电状态; $SOC_{\min}$ 和 $SOC_{\max}$ 分别为 SOC 的下限和上限(蓄电池的充放电速率指电池在单位时间内释放的电量,过快的充放电速率可能会影响电池的性能和寿命); σ 为单位时间内限制系数,由于在本文相应程序中一个时间点为 15 min,故 σ 值需乘以 0.25。

(4) 功率平衡约束,即在任意时刻,微网中的流入功率和流出功率应平衡,并满足关系式

$$P_{l,t} - P_{v,t} - P_{\text{bat},t} = P_{\text{pgrid},t} \quad (11)$$

式(11)中: $P_{v,t}$ 为由光伏发电模块的功率; $P_{l,t}$ 为负荷所需的功率; $P_{\text{pgrid},t}$ 为微电网与主电网之间的交换功率。当 $P_{\text{pgrid},t} > 0$ 时,意味着微电网没有足够

的功率来满足负载,需要从主电网购买电能。当 $P_{\text{pgrid},t} < 0$ 时,意味着微电网具有足够的功率来满足负载,并且具有将剩余电能出售给主电力网络的能力。当 $P_{\text{bat},t} > 0$ 时,意味着电池放电;当 $P_{\text{bat},t} < 0$ 时,意味着电池充电。

1.4 惩罚机制

1.4.1 储能充放惩罚

因为每次充电和放电都会对电池的化学成分造成一定的损耗。随着充电次数的增加,电池的容量会逐渐下降,导致电池无法有效存储电能,进而影响电池的充电效率和放电能力^[16],设置最大充放电次数为 6 次,引入充放电次数惩罚机制。

充放电次数是指荷电状态变化方向发生改变的次数。更准确地说,如果相邻的荷电状态变化量 ΔSOC_t 和 ΔSOC_{t+1} 的符号相反,则认为发生了一次充放电切换。因此,充放电次数分别定义为

$$\sum_{t=1}^{T-1} a(\Delta SOC_t \times \Delta SOC_{t+1}) \quad (12)$$

$$a_1(N - 6) \quad (13)$$

式中: a 为判别系数,判断是否发生充放电的状态变化; ΔSOC_t 和 ΔSOC_{t+1} 分别表示 t 时刻与 $t+1$ 时刻 SOC 的变化量;如果发生了切换, $a = 1$, 否则 $a = 0$; a_1 为惩罚系数; N 为总充放电次数,只有充放次数大于 6 时计算惩罚值。

1.4.2 最优适应度惩罚

由式(1)可知本次实验中 IPSO 的适应度值为系统的用电成本,故而在程序中设定粒迭代过程总是取不违反约束且适应度更小的值。为保证 IPSO 的全局寻优结果,且不影响程序正常运行引入惩罚机制对于迭代中的粒子种群提出如下规则。规则 1: 如果两次迭代的粒子都没有违反约束,则取适应度小的;规则 2: 如果迭代后的值违反约束而初值没有违反约束,则放弃此次迭代结果;规则 3: 如果迭代前违反约束而迭代后没有违反约束,则保留此次结果;规则 4: 如果两个都违反约束,则取适应度值小的。

2 传统粒子群算法

对于 D 维优化问题,群中的每个粒子代表一个候选解。每个粒子的位置在搜索开始时随机初始化,速度初始化为零。然后根据全局最佳位置(g_{best})和个体最佳位置(p_{best})更新速度^[17]。在第 k 次迭代时,群中第 k 个粒子的位置表示为 $x_i(k) = (x_{i1}^k, x_{i2}^k, \dots, x_{iD}^k)$, 其对应的速度表示为 $v_i(k) = (v_{i1}^k, v_{i2}^k, \dots, v_{iD}^k)$ 。更新后的公式可描述为

$$\begin{cases} v_{i,j}(k+1) = v_{i,j}(k) + c_1 r_1 [p_{\text{best},j}(k) - x_{i,j}(k)] + \\ c_2 r_2 [g_{\text{best},j}(k) - x_{i,j}(k)] \\ x_{i,j}(k+1) = x_{i,j}(k) + v_{i,j}(k+1), \\ i = 1, 2, \dots, N; j = 1, 2, \dots, D \end{cases} \quad (14)$$

式(14)中: i, j 表示第*i*个粒子的第*j*维; k 为当前迭代次数; c_1 与 c_2 均为加速常量,通常在区间 $(0, 2)$ 内取值; r_1 与 r_2 为两个相互独立的取值范围为 $[0, 1]$ 的随机数。

粒子群算法虽然具有收敛速度快、基本原理简单、精度高的优点,但此算法迭代到后期时,由于其搜索机制缺乏多样性,所有粒子都趋向最优解的位置,粒子的特性趋于同一性,导致容易陷入局部最优解^[18]。

3 改进的分群自适应粒子群算法

3.1 惯性权重自适应

在粒子群优化算法的更新过程中,惯性权重值的大小表示了粒子群优化算法保持上一时刻运动状态的能力。在粒子的搜索过程中,较大的搜索距离有利于粒子的全局搜索,使粒子远离当前位置。反之,较小的搜索范围有利于局部搜索,从而实现最优解的优化。

利用非线性的惯性权重值将粒子分为三类,如果每代中所有粒子的适应度值都在 $[f_{\min}, f_{\max}]$ 范围内,则将 $f_{i,k1}$ 和 $f_{i,k2}$ 作为分类的边界,其表达式为

$$\begin{cases} f_{i,k1} = f_{\min} + \frac{f_{\max} - f_{\min}}{3} \\ f_{i,k2} = f_{\min} + \frac{2(f_{\max} - f_{\min})}{3} \end{cases} \quad (15)$$

惯性配重的调整曲线如图2所示。可以清楚地看到,适应度好的粒子被看作是“寻优粒子”,对于寻优粒子,惯性权重的收敛速度最慢,减小惯性权重

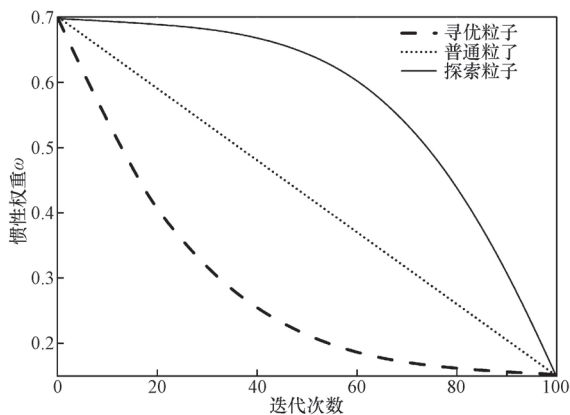


图2 惯性权重曲线

Fig. 2 Inertia weight curves

可以帮助粒子实现个体开发,充分利用局部信息。而适应度差的粒子被认为是“探索粒子”,并被激励去探索尽可能多的最优解。增加探索粒子以探索尽可能多的最优值。采用随时间线性下降的方法对普通粒子的惯性权重值进行调整。因此,对比惯性权重值线性下降的方法,采用分段式非线性函数能最大限度地根据粒子的特性调整惯性权重,提高粒子的收敛速度。其表达式为

$$\begin{cases} \omega_{i1} = \omega_{\min} + \frac{1}{1 + e^{\frac{0.5(f_{i,k1} - f_i)}{f_{i,k1} - f_{\text{best}}}}}, & f_i \leq f_{i,k1} \\ \omega_{i2} = \omega_{\max} - (\omega_{\max} - \omega_{\min}) \frac{k}{G}, & f_{i,k1} \leq f_i \leq f_{i,k2} \\ \omega_{i3} = \omega_{\max} + \frac{1}{1 + e^{-\frac{0.5(f_i - f_{i,k2})}{f_{\max} - f_{i,k2}}(k - G)}}, & f_i \geq f_{i,k2} \end{cases} \quad (16)$$

式(16)中: k 为当前迭代次数; G 为最大迭代次数; $\omega_{\max}$ 为惯性权重的上限; $\omega_{\min}$ 为惯性权重的下限;当 $\omega = \omega_{i1}$ 时,对应寻优粒子,当 $\omega = \omega_{i2}$ 时,对应普通粒子,当 $\omega = \omega_{i3}$ 时,对应探索粒子; f_i 为第*i*个粒子个体最佳位置的适应度值; $f_{\max}$ 为所有粒子的最大适应度值。

3.2 非对称学习因子

在粒子群算法中,学习因子 c_1 、 c_2 决定粒子个体经验信息和其他粒子经验信息对寻优路径的影响,反映了粒子与粒子间的信息交互^[19]。设置较大值 c_1 ,会使粒子加强局部搜索能力;反之,较大值 c_2 ,会使粒子缺乏跳出局部最优的能力导致提前收敛到局部最优值。

对于适应度较好的寻优粒子,应选择较大值 c_1 和较小值 c_2 ,以加强粒子的搜索能力。第*k*次迭代时的自适应加速系数计算公式为

$$\begin{cases} c_1 = c_{1i} + k(c_{1e} - c_{1i})/G \\ c_2 = c_{2i} + k(c_{2e} - c_{2i})/G \end{cases} \quad (17)$$

式(17)中: k 为当前迭代次数; G 为最大迭代次数; c_{1i} 、 c_{2i} 分别为 c_1 、 c_2 的初值; c_{1e} 、 c_{2e} 分别为 c_1 、 c_2 的终值。当 $c_{1i} \neq c_{2e}$,且 $c_{2i} \neq c_{1e}$ 时,即为非对称学习因子。

对于普通粒子,在第*k*次迭代时采用自适应加速系数控制。对于适应度较差的粒子,应选择较小值 c_1 和较大值 c_2 ,以将粒子推离当前位置。第*k*次迭代时的自适应加速系数计算公式为

$$\begin{cases} c_1 = c_{1e} + k(c_{1i} - c_{1e})/G \\ c_2 = c_{2e} + k(c_{2i} - c_{2e})/G \end{cases} \quad (18)$$

3.3 多场景户用热泵直流微电网运行模型的求解算法

在这一部分中,IPSO被开发来解决经济调度。IPSO的流程如图3所示。基于IPSO方法的日运行

经济优化的具体实现步骤如下。

(1)输入蒙西农牧地区光伏发电数据、热泵负荷、分时电价信息。

(2)初始化 IPSO 方法的参数,主要包括种群的粒子大小 m 、最大迭代次数 G 、学习因子 ($c_{1i}, c_{2i}, c_{1e}, c_{2e}$)、参数的范围 ($\omega_{\max}, \omega_{\min}, v_{\min}, v_{\max}$) 等。

(3)根据目标函数,使用等式(1)计算粒子的适应度。在本文中的适应度值是每个粒子对应的微电网的电能消耗成本。

(4)根据方程更新 IPSO 方法的惯性权重和加速度系数。根据式(15)~式(18)的结果更新粒子速度和位置。随后,需要判断粒子是否满足约束条件,若有粒子超出限制,则随机生成范围内新的粒子。

(5)重新计算粒子的适应度值并再次更新个体最优值和全局最优值。方法与步骤(3)和步骤(4)相同。

(6)引入惩罚机制,确保得到的适应度值总是最小的。

(7)重复步骤(4)~步骤(6),直到满足结束条件。如果达到终止条件,则结束并输出最优解。最优解为用户用热泵直流微电网系统的最优经济功率调度。

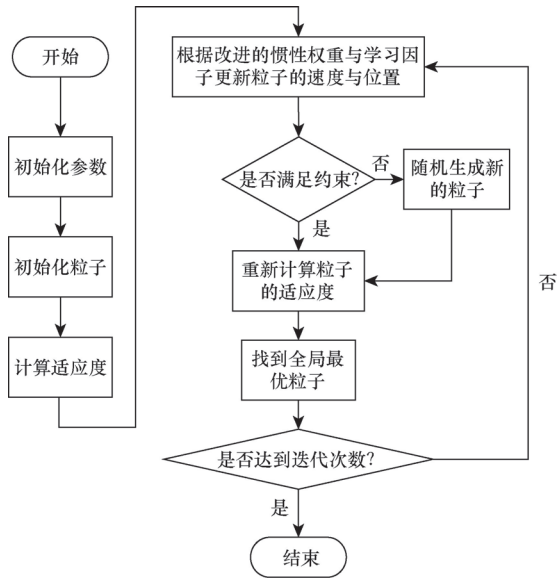


图3 改进的分群自适应粒子群算法的流程
Fig. 3 Flow of the improved swarming adaptive particle swarm algorithm

4 场景描述及结果分析

4.1 系统参数

选取内蒙古西部地区冬季典型日光伏发电数据、热泵电负荷、分时电价数据,微电网配置参数如表1、表2所示。

表1 内蒙古西部分时电价

Table 1 Inner Mongolia west hourly tariff		
时间	购电价格/元	售电价格/元
00:00—08:00	0.165	0.282 9
08:00—18:00	0.465	0.282 9
18:00—24:00	0.165	0.282 9

表2 微网配置参数

Table 2 Microgrid configuration parameters			
微电网	光伏 PV	电池容量	最大载荷
装机容量	5 kW	6 kWh	4.5 kW

微网运行周期取1 d,单位调度时间为15 min。对比 IPSO、PSO、遗传算法 (genetic algorithm, GA)。为了对比结果的广泛性,基于 Python 第三方库 PuLP,依次建立主网、光伏及蓄电池的模型,组合为微电网系统线性优化 LP(linear programming)调度模型。

4.2 场景介绍

场景1 晴天太阳辐照强度大,约束与电网交互功率为5 kW。

蓄电池参与调度,微网与主网之间的能量交换有上限。为了提高运行安全性,考虑了微网与主电网之间交换功率的上限。在场景1中,微电网与主电网之间的功率交换的上限被设置为5 kW。一个周期内三种算法的适应度对比如图4所示,为了更好地观察各个部分的出力情况,特选取负载含峰谷的时段如图5所示,电池 SOC 值曲线如图6所示,负载、光伏、蓄电池与主网功率曲线如图7所示。

通过对图7的分析,可以看出,光伏在早上06:00开始发电,至08:30—12:00 光伏输出显著增加,此时负载处于谷值状态,开始向电网出售电能。到12:00 点后,负荷达到一次峰值,此时光伏发电充足,几乎完全抵消了用电负荷,购电需求微乎其微。值得注意的是,当蓄电池 SOC 达到0.9时,充电过程会自动停止。此外,在晴朗天气条件下,尽管蓄电池

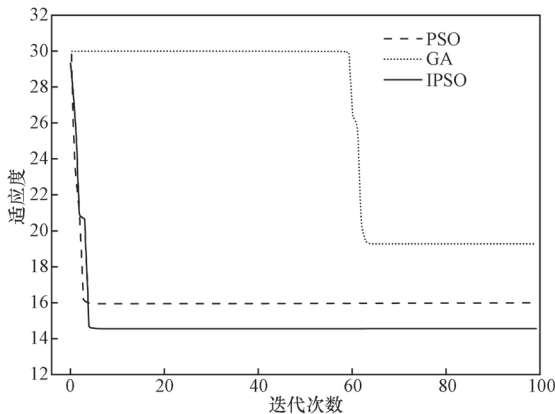


图4 场景1中的算法适应度对比
Fig. 4 Comparison of algorithm adaptation in scene 1

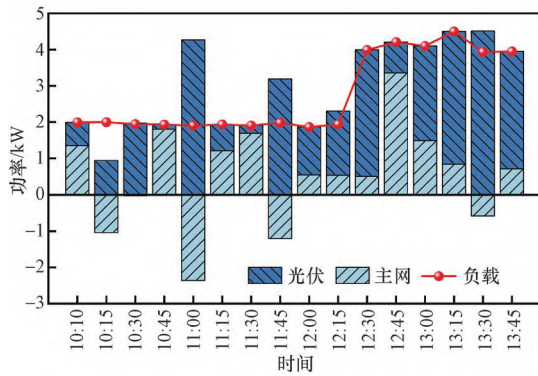


图5 场景1中部分时间负载、光伏和主网的功率图

Fig. 5 Power diagram of load, PV, and main grid in scene 1 part time

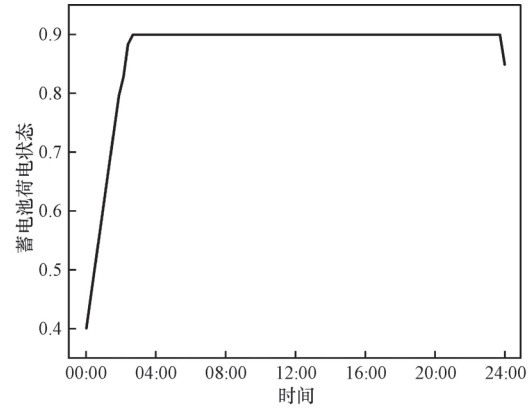


图6 场景1中电池的SOC值曲线

Fig. 6 SOC value curve of the battery in scene 1

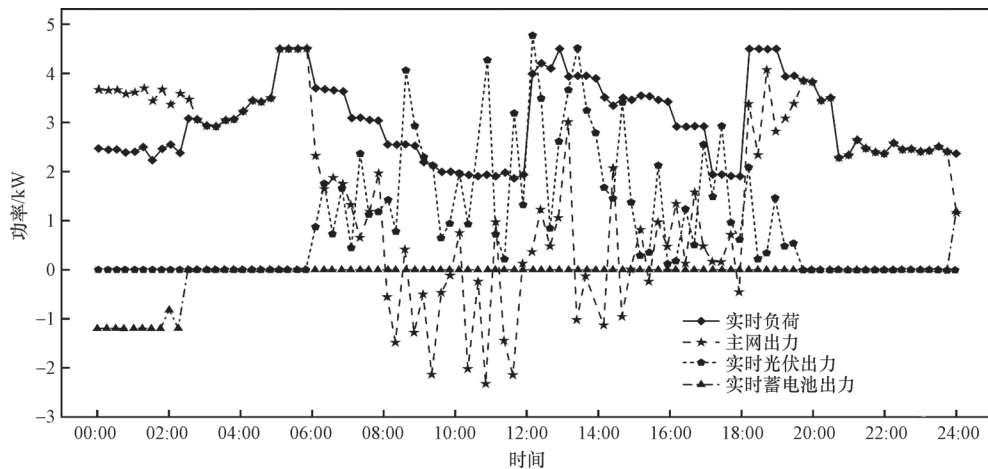


图7 场景1中负载、光伏、蓄电池和主网的功率曲线

Fig. 7 Power curves of load, PV, battery and main grid in scene 1

未直接参与电力调度,但其存在能够有效防止停电等突发情况的发生。

场景2 阴天太阳辐射度小,电池不参与调度,约束与电网交互功率为5 kW。

在阴天光伏发电量少,的情况下电池不参与调度,微网与主电网的功率交换上限5 kW。一个周期内三种算法的适应度对比如图8所示,选取负载需求含峰谷值变化时段如图9所示,负载、光伏、主网功率曲线如图10所示。

通过观察图5与图9可以看出,在不同天气条件下,负载出现突变时该算法均能够满足负载要求,虽然图5中10:15时出现短暂供电不足且电网为负值的状态但是随后马上进行调节满足了负载,对成本的影响微乎其微,其余时段都能满足供电。展示了其良好的适应性。

通过对图10的分析,可以明确观察到光伏系统在早上09:45左右开始发电。在12:00—19:00,光伏发电量不足,此时光伏与主网协同工作,以保证电力负荷的稳定运行。19:00以后,主网独立承担

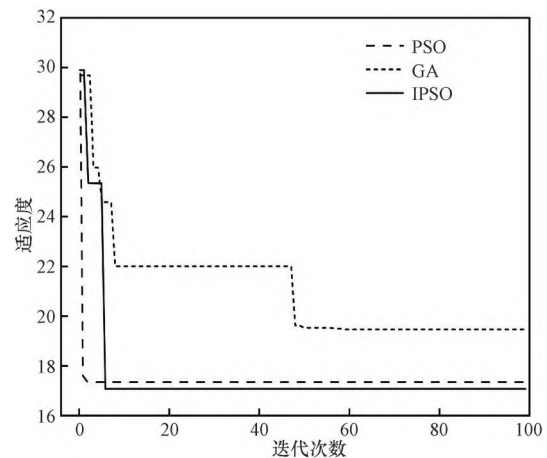


图8 场景2中的算法适应度对比

Fig. 8 Comparison of algorithm adaptation in scene 2

供电任务。

场景3 阴天太阳辐射度小,电池参与调度,约束与电网交互功率为5 kW。

在阴天光伏发电量少,的情况下电池参与调度,微网与主电网的功率交换上限5 kW。一个周期内

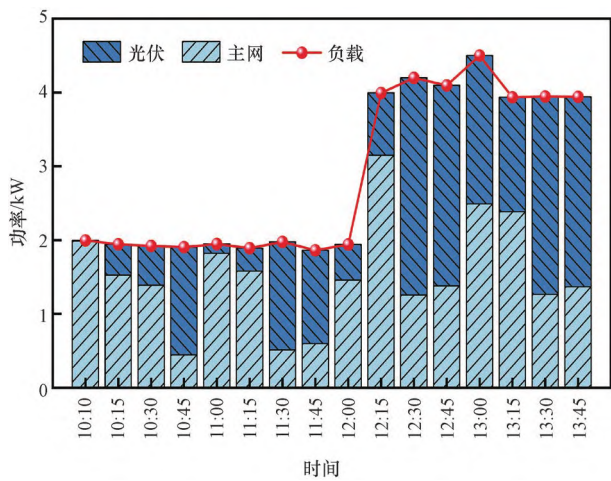


图9 场景2中部分时间负载、光伏和主网的功率图

Fig. 9 Power diagram of load, PV, and main grid in scene 2 part time

三种算法的适应度对比如图 11 所示, 电池 SOC 值曲线如图 12 所示, 负载、光伏、蓄电池与主网功率曲线如图 13 所示, 选取负载需求含峰谷值变化时段如图 14 所示。

观察图 4、图 8、图 11, 可看出 IPSO 具有更好的跳出局部最优的能力, 且求解精度更高。

通过对图 12 与图 13 的分析, 可以观察到在低电价时段, 蓄电池开始充电, 并于早上 02: 15 左右充满电。约在 09: 45, 光伏开始发电, 12: 00 后高电价时段电力负荷达到一次峰值, 此时蓄电池开始释放电能。光伏发电、蓄电池和主电网共同确保了负荷的正常运行, 蓄电池在 18: 00 后的又一次负荷峰值时仍然出力有效发挥了削峰填谷的作用。在 19: 00 之后, 光伏发电的输出量显著降低, 20: 00 后主网独立承担负荷需求。

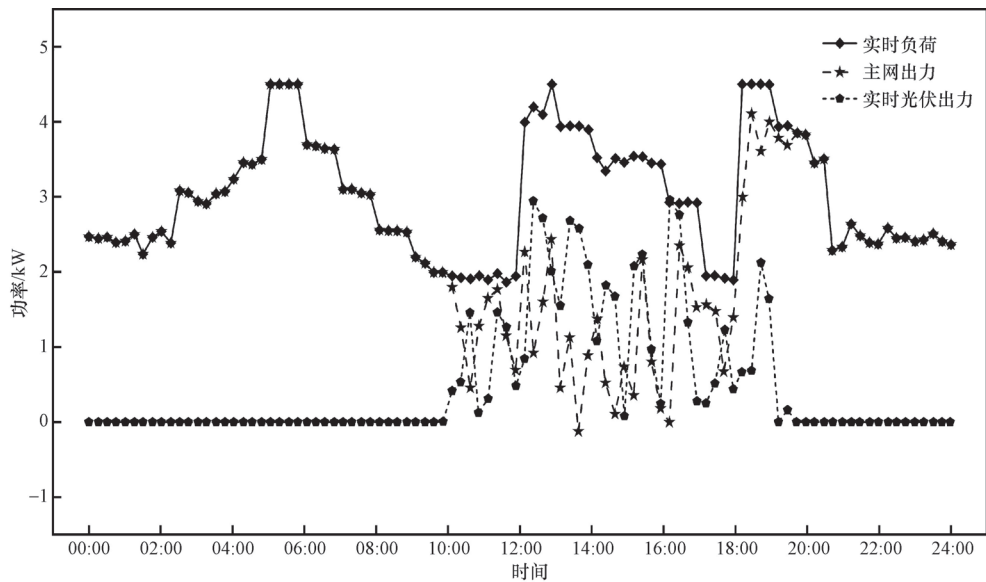


图 10 场景2中负载、光伏和主网的功率曲线

Fig. 10 Power curves of load, PV and main grid in scenario 2

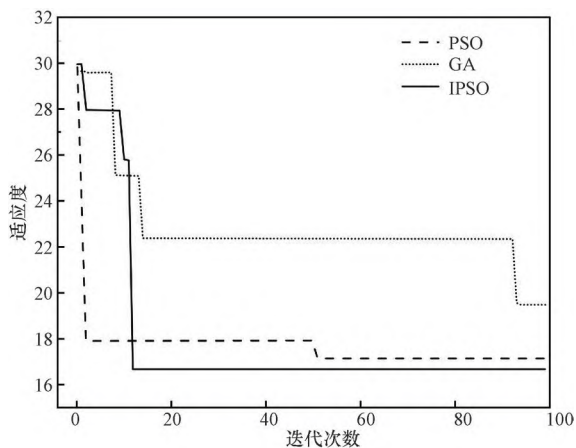


图 11 场景3中的算法适应度对比图

Fig. 11 Comparison of algorithm adaptation in scene 3

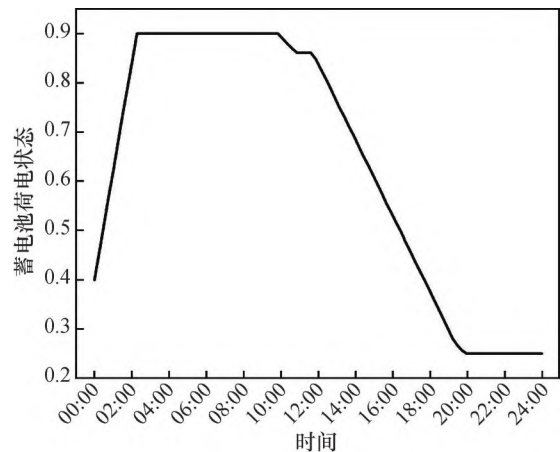


图 12 场景3中电池的 SOC 值曲线

Fig. 12 SOC value curve of the battery in scene 3

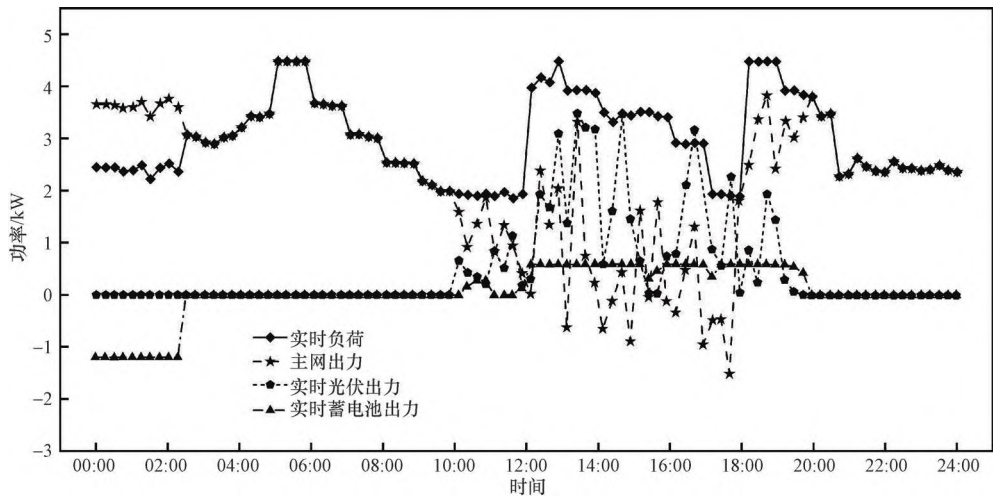


图 13 场景 3 中负载、光伏、蓄电池和主网的功率曲线

Fig. 13 Power curves of load, PV, battery and main grid in scene 3

从图 14 可以看出负载变大时蓄电池出力增加实现削峰填谷。

以日运行成本最低为优化目标,建立了多场景下的户用热泵微电网协调运行模型。该模型不仅考虑了发电成本、放电成本、购电成本和销售收入,还考虑了充放电约束和功率平衡约束。同时,给出了相应的基于改进粒子群优化算法的模型求解算法。各种场景下各个优化算法的结果如表 3 所示。

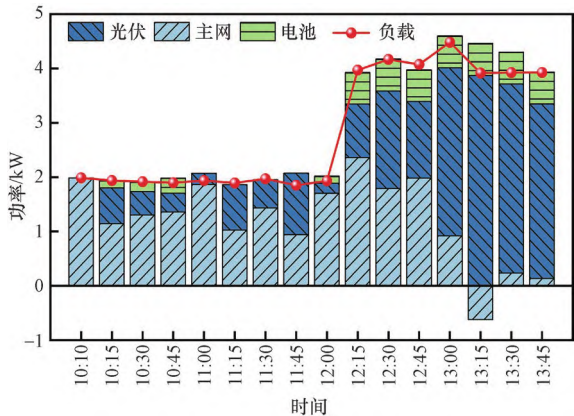


图 14 场景 3 中部分时间负载、光伏、蓄电池和主网的功率图

Fig. 14 Power diagram of load, PV, battery and main grid in scene 3 part time

表 3 各种场景下各个算法的日运行成本

Table 3 Daily running cost of each algorithm in various scenarios

优化算法	日运行成本/元			
	IPSO	PSO	GA	LP
无光伏	20.461 5	20.461 5	20.461 5	20.461 5
场景一	14.667 7	16.084 2	19.295 7	17.035 3
场景二	17.081 7	17.347 5	19.466 5	17.997 3
场景三	16.677 1	17.139 8	19.480 0	17.243 0

4.3 结果分析

通过分析图 5 与图 9,观察表 3,对比场景 1 和场景 2,结果表明,在不同天气条件下,该算法均能够满足负载要求,显示了其良好的适应性。在晴天,光伏发电降低购电成本,而在阴天,尽管光伏发电能力减弱,系统仍能有效满足负载需求,显示出 IPSO 算法在多变环境下的稳定性和可靠性。

结合图 14 对比场景 3 和场景 2 可以看出,蓄电池参与调度的微网整体用电成本下降。这是因为电池可以起到削峰填谷的作用。当负载较大或电价较高时,电池放电以满足负载需求和经济性要求。当电价较低时,电池存储电能,以满足负载较大或电价较高时的电能应用。

最后,场景 1 与场景 3 的比较揭示了蒙西地区在“煤改电”政策下的电价优势。在保护蓄电池寿命的前提下,晴天光伏发电量充足时电池几乎不参与调度更加能保证经济性。

5 结论

本文提出了一种新且有效的改进粒子群算法,成功应用于复杂的经济调度问题。IPSO 算法通过自动调整惯性权重和学习因子等参数,实现了在进化过程中的自适应优化。经过对三种不同场景的广泛测试,结果表明 IPSO 算法在解决经济调度问题时,能够提供更优的解,尤其在收敛速度和结果精确性方面显著优于传统的三种算法。

此外,实验结果还显示,光伏微电网在户用热泵用电方面显著降低了用电成本。在晴天,光伏用户一日可节约电费高达 5.8 元,而阴天也能节约 3.4 元。这一结果反映了 IPSO 算法在经济调度中的实用价值。

参 考 文 献

- [1] Takano H, Hayashi R, Asano H, et al. Optimal sizing of battery energy storage systems considering cooperative operation with micro-grid components[J]. *Energies*, 2021, 14(21): 7442.
- [2] 赵晴云, 马若婧, 周璐芸, 等. 北方农村清洁供暖先行区农业废弃物的生物质能潜力及减排效应评估[J]. *农业资源与环境学报*, 2023, 40(3): 667-679, 745.
- Zhao Qingyun, Ma Ruojing, Zhou Luyun, et al. Biomass energy potential and emission reduction effect assessment of agricultural waste in pilot areas of clean heating in rural northern China[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2023, 40(3): 667-679, 745.
- [3] 黄山, 吴振奎, 张自雷, 等. 户用热泵供暖直流微电网控制策略研究[J]. *新能源系统与设备*, 2022(18): 72-75.
- Huang Shan, Wu Zhenkui, Zhang Zilei, et al. Research on DC microgrid control strategy for household heat pump heating[J]. *New Energy Systems and Equipment*, 2022(18): 72-75.
- [4] 陈将宏, 王曦沐, 李伟亮, 等. 采用改进北方苍鹰算法的微电网优化调度研究[J]. *重庆理工大学学报(自然科学)*, 2024, 38(1): 281-289.
- Chen Jianghong, Wang Ximu, Li Weiliang, et al. Optimal scheduling study of microgrids using improved northern eagle algorithm[J]. *Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science)*, 2024, 38(1): 281-289.
- [5] 高瑜, 黄森, 陈刘鑫, 等. 基于改进灰狼算法的并网交流微电网经济优化调度[J]. *科学技术与工程*, 2020, 20(28): 11605-11611.
- Gao Yu, Huang Sen, Chen Liuxin, et al. Economic optimal scheduling of grid-connected AC microgrids based on improved gray wolf algorithm[J]. *Science Technology and Engineering*, 2020, 20(28): 11605-11611.
- [6] 赵超, 王斌, 孙志新, 等. 基于改进灰狼算法的独立微电网容量优化配置[J]. *太阳能学报*, 2022, 43(1): 256-262.
- Zhao Chao, Wang Bin, Sun Zhixin, et al. Optimal allocation of standalone microgrid capacity based on improved gray wolf algorithm[J]. *Journal of Solar Energy*, 2022, 43(1): 256-262.
- [7] Sahoo A, Hota P K. Impact of energy storage system and distributed energy resources on bidding strategy of micro-grid in deregulated environment[J]. *Journal of Energy Storage*, 2021, 43: 103230.
- [8] 陈喆, 杜龙, 陈愈芳, 等. 基于简化粒子群优化算法的可再生微电网随机优化调度策略研究[J]. *光学与光电技术*, 2024, 22(3): 135-141.
- Chen Zhe, Du Long, Chen Yufang, et al. Study on stochastic optimal scheduling strategy for renewable microgrid based on simplified particle swarm optimization algorithm[J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2024, 22(3): 135-141.
- [9] 王继东, 宋启明, 李继方. 基于多智能体混沌粒子群算法的微电网优化运行[J]. *可再生能源*, 2022, 40(4): 513-519.
- Wang Jidong, Song Qiming, Li Jifang. Optimized operation of microgrids based on multi-intelligence chaotic particle swarm algorithm[J]. *Renewable Energy*, 2022, 40(4): 513-519.
- [10] 赵晓妍, 宋威. 聚集度指标引导的注意力学习粒子群优化算法[J]. *计算机科学与探索*, 2023, 17(8): 1852-1866.
- Zhao Xiaoyan, Song Wei. Attention learning particle swarm optimization algorithm guided by aggregation metrics[J]. *Frontiers of Computer Science and Technology*, 2023, 17(8): 1852-1866.
- [11] 黄亚峰, 刘思驿, 庞松岭, 等. 基于自适应权重 PSO 算法的分布式光伏并网极限容量计算[J]. *广东电力*, 2020, 33(4): 30-34.
- Huang Yafeng, Liu Siyi, Pang Songling, et al. Distributed photovoltaic grid-connected limit capacity calculation based on adaptive weight PSO algorithm[J]. *Guangdong Power*, 2020, 33(4): 30-34.
- [12] Wang H, Wu X, Sun K, et al. Economic dispatch optimization of a microgrid with wind-photovoltaic-load-storage in multiple scenarios[J]. *Energies*, 2023, 16: 3955.
- [13] 陈晓华, 吴杰康, 陈盛语, 等. 基于改进粒子群算法的微电网经济运行优化方法[J]. *黑龙江电力*, 2023, 45(1): 23-29.
- Chen Xiaohua, Wu Jiekang, Chen Shengyu, et al. A microgrid economic operation optimization method based on improved particle swarm algorithm[J]. *Heilongjiang Power*, 2023, 45(1): 23-29.
- [14] 韩顺杰, 于渲铎, 李东奇, 等. 基于改进量子粒子群算法的新能源汽车换电站优化布局[J]. *科学技术与工程*, 2024, 24(27): 11720-11725.
- Han Shunjie, Yu Xuanduo, Li Dongqi, et al. Optimized layout of new energy vehicle battery swap stations based on improved quantum particle swarm optimization algorithm[J]. *Science Technology and Engineering*, 2024, 24(27): 11720-11725.
- [15] 向开瑞, 王辉, 彭婷婷, 等. 含混合储能的风光储系统容量优化配置[J]. *科学技术与工程*, 2023, 23(31): 13415-13422.
- Xiang Kaiduan, Wang Hui, Peng Tingting, et al. Capacity optimization configuration of wind-solar-storage system with hybrid energy storage[J]. *Science Technology and Engineering*, 2023, 23(31): 13415-13422.
- [16] 丁佳均, 胡秦然, 吴在军, 等. 低温环境下考虑电池寿命的微电网优化调度[J]. *中国电机工程学报*, 2024, 44(10): 3815-3823.
- Ding Jiayun, Hu Qinran, Wu Zaijun, et al. Optimal scheduling of microgrid considering battery lifetime in low-temperature environment[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2024, 44(10): 3815-3823.
- [17] 周鹤宁. 基于改进粒子群算法的微电网优化调度[D]. 沈阳: 沈阳工程学院, 2021.
- Zhou Hening. Optimal scheduling of microgrids based on improved particle swarm algorithm[D]. Shenyang: Shenyang Engineering University, 2021.
- [18] 赵雅洁, 薛田良, 张磊, 等. 考虑户用分布式光伏的负荷聚合商自建储能的容量配置[J]. *现代电子技术*, 2024, 47(8): 131-137.
- Zhao Yajie, Xue Tianliang, Zhang Lei, et al. Considering capacity allocation for self-built energy storage by load aggregators for residential distributed PV[J]. *Modern Electronic Technology*, 2024, 47(8): 131-137.
- [19] 马铭江, 熊智, 王融, 等. 集群无人机协同导航构型优选方法[J]. *电光与控制*, 2024, 31(5): 83-88.
- Ma Mingjiang, Xiong Zhi, Wang Rong, et al. Cluster UAV collaborative navigation configuration optimization methods[J]. *Electronics Optics & Control*, 2024, 31(5): 83-88.