DOI:10.20033/j.1003-7241.(2026)07-0051-08

基于改进金豺算法的微电网容量优化配置模型

姜建国,王雨寒,毕洪波

(东北石油大学 电气信息工程学院,黑龙江 大庆 163318)

摘 要:针对传统金豺算法在求解微电网容量优化配置等多元非线性整数规划问题时存在的收敛速度慢、种群多样性不足及易陷入局部最优等局限性,提出一种改进的金豺优化算法。首先引入 Logistic 混沌映射,增强初始种群分布的均匀性与全局搜索能力;其次,采用分层反向学习策略动态生成反向解,在扩大搜索空间的同时避免算法早熟收敛;最后,在位置更新阶段融合模拟退火机制与变步长正切游走策略,实现搜索步长的自适应调整,从而平衡全局探索与局部开发能力。将所提算法应用于以风、光、储为基础,微型燃气轮机为补充电源的孤立微电网容量配置模型中,以系统年均总投资成本最低为目标,综合考虑缺电率、能量浪费率及风光出力占比等约束进行优化。仿真结果表明,改进算法能够有效获得更经济的容量配置方案,且微型燃气轮机在燃料成本与环保性能方面均优于柴油发电机,验证了所提改进策略在提升微电网经济性与分布式电源响应速度方面的有效性。

关键词:孤立微电网;容量优化;改进金豺算法;正切游走策略;分层反向学习;Logistic 混沌映射

中图分类号:TP18;TK91 **文献标志码**:A **文章编号**:1003-7241(2026)07-0051-08

Microgrid capacity optimization allocation model based on improved golden jackal algorithm

Jiang Jianguo, Wang Yuhan, Bi Hongbo

(Faculty of Electrical and Information Engineering, Northeast Petroleum University, Daqing 163318, Heilongjiang, China)

Abstract: In addressing the limitations of the traditional golden jackal algorithm, such as slow convergence speed, insufficient population diversity, and susceptibility to local optima when solving multivariate nonlinear integer programming problems like microgrid capacity optimization, an improved golden jackal optimization algorithm is proposed. Firstly, Logistic chaotic mapping is introduced to enhance the uniformity of the initial population distribution and strengthen global search capability. Secondly, a hierarchical opposition-based learning strategy is employed to dynamically generate opposite solutions, which expands the search space while preventing premature convergence. Finally, during the position update phase, a simulated annealing mechanism is integrated with a variable-step tangent walking strategy to achieve adaptive adjustment of the search step size, thereby balancing global exploration and local exploitation capabilities. The proposed algorithm is applied to a capacity optimization model for an isolated microgrid, which is based on wind, photovoltaic, and energy storage systems, with micro gas turbines serving as the supplementary power source. The objective is to minimize the system's total annual investment cost, while comprehensively considering constraints such as the loss of power supply probability, energy waste rate, and the proportion of renewable energy output. Simulation results demonstrate that the improved algorithm can effectively obtain a more economical capacity allocation scheme. Moreover, micro gas turbines exhibit superior performance in terms of fuel cost and environmental friendliness compared to diesel generators. This verifies the effectiveness of the proposed improvement strategies in enhancing the economic efficiency of the microgrid and the responsiveness of distributed power sources.

Keywords: isolated microgrid; capacity optimization; improved golden jackal algorithm; tangent wandering strategy; hierarchical backward learning; logistic chaotic map

孤立微电网不仅能够减少远距离输电造成的能量损失,还能降低整体建设和运营成本,为新农村电气化和边远地区电气化提供了一种经济有效的解决方案[1]。尽管在 2011 年马溪原等[2]已经建立了微电网电源优化配置的基础,但随着优化算法的不断发展,现有模型在供电可靠性、环境成本考虑等方面仍有改进空间。文献[3]针对非孤立微电网进行建模,虽然对粒子群算法(particle swarm optimization, PSO)作了多重改进,但缺乏与原始算法和其他算法的对比实验,未能验证改进策略的有效性;文献[4]虽是针对孤立微电网中的分布式电源容量进行优化配置,并且对灰狼算法(grey wolf optimizer,GWO)作出了改进,但未考虑可靠性约束;文献[5]将微型燃气轮机和柴油发电机同时作为孤立微电网的补充电源,并没有对比二者单独作为补充电源的效果;文献[6]以年均成本最低作为目标,将供电可靠性和能源浪费率作

收稿日期:2025-01-13;**录用日期**:2025-03-11

作者简介:姜建国(1966—),男,博士,教授,研究方向为电气自动化理论与应用。

引用本文:姜建国,王雨寒,毕洪波. 基于改进金豺算法的微电网容量优化配置模型[J]. 自动化技术与应用, 2026,45(7):51-57,70. (Jiang Jianguo, Wang Yuhan, Bi Hongbo. Microgrid capacity optimization allocation model based on improved golden jackal algorithm[J]. Techniques of Automation and Applications, 2026,45(7):51-57,70.)

为约束条件,但未考虑环境污染成本。金豺算法(golden jackal optimization,GJO)于2022年被提出,经过多组测试函数验证,它在收敛速度和求解效果上均优于灰狼算法、粒子群算法等[7];文献[7]已将GJO用于解决多种简单工程问题,这为其应用于复杂问题提供了可能。

针对金豺算法在求解含有复杂约束的多元非线性整数优化问题时出现的收敛速度慢、容易陷入局部最优等问题,文章提出一种改进的金豺算法。通过引入分层反向学习策略、耦合模拟退火算法的变步长正切游走策略,改良算法的收敛速度和最优解,而且在实际算例中验证了其在求解该问题时的优越性。另外,在算例中设置了3种对比方案探究微型燃气轮机和柴油发电机作为微电网补充电源时的竞争力大小,仿真结果为孤立微电网的容量优化配置问题提供了一种可行的解决方案。

1 孤立微电网的数学模型

为保证孤立微电网中电能的供需平衡,该孤立微电网由风力发电机(wind generator, WT)、光伏发电(photovoltaic power generation, PV)、蓄电池(batteries, Bat)和微型燃气轮机(micro gas turbines, MT)、柴油发电机(diesel generators, DG)组成。孤立微电网结构如图1所示。

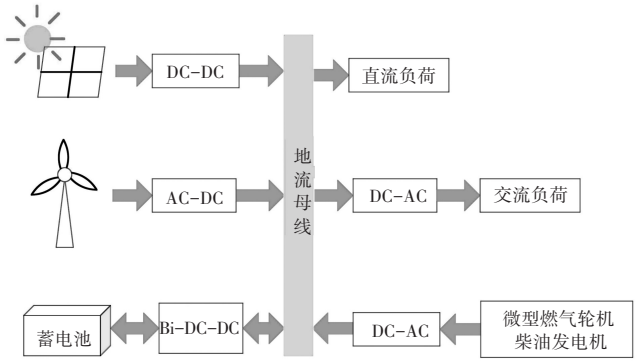


图1 孤立微电网结构图

Fig. 1 Isolated microgrid structure diagram

1.1 蓄电池等效模型

风力发电机和光伏组件的数学模型分别参考文献[8]、文献[9],在此不再赘述。

为了提高自然资源的利用率,将蓄电池作为“能量中转站”。简化模型如式(3)所示。

$$E_{bat} = E_r[1 + \delta_B(T_{bat} - T_{batr})] \tag{1}$$

式中,E_{bat}为实际可用容量;E_r为额定容量;$E_{bat}(t)$为t时刻蓄电池的电量;δ_B为环境温度容量系数;T_{bat}为实时环境温度;T_{batr}为参考温度。

蓄电池的荷电状态是蓄电池中所存储能量的相对度量,如式(2)所示[10],即

$$soc(t) = \frac{E_{bat}(t)}{E_{bat}} \tag{2}$$

当蓄电池充电时,荷电状态变化如式(3)所示。

$$soc(t+1) = \frac{soc(t)P_{ch}^{+}(t)\Delta t}{\eta_c E_{bat}} \tag{3}$$

当蓄电池放电时,荷电状态变化如式(4)所示。

$$soc(t+1) = \frac{soc(t)P_{ch}^{-}(t)\Delta t}{\eta_d E_{bat}} \tag{4}$$

式中,$P_{ch}^{+}(t)$、$P_{ch}^{-}(t)$分别是蓄电池t时刻的充放电功率;η_c、η_d分别是蓄电池的充、放电效率。

1.2 微型燃气轮机的数学模型

正常运行状态下,微型燃气轮机的工作耗量特性如式(5)所示[11]。

$$V_f = \frac{P_w(t)\cdot\Delta t}{\eta_{MT}\cdot LHV_f} \tag{5}$$

式中,$P_w(t)$为t时刻微型燃气轮机的功率;Δt为运行时间;η_{MT}为机组的发电效率;LHV_f为天然气低热值;V_f为Δt运行时间内微型燃气轮机天然气的消耗量。

因此微型燃气轮机的发电成本如式(6)所示。

$$C_w = V_f \cdot K \tag{6}$$

式中,K为天然气的单价;C_w为微型燃气轮机运行时间Δt的燃料费用。

1.3 柴油发电机的数学模型

柴油发电机同微型燃气轮机在孤立微电网中的作用一样,发电成本如式(7)所示[12]。

$$C_{fuelc} = a[p_c(t)]^2 + bp_c(t) + c \tag{7}$$

式中,C_{fuelc}为柴油发电机的燃料费用;$p_c(t)$为t时刻柴油发电机的发电功率;a、b、c均为常数。

1.4 能量流动策略

记$Pnew(t) = N_{WT}P_{WT}(t) + N_{PV}P_{PV}(t)$完整的能量流动如图2所示。

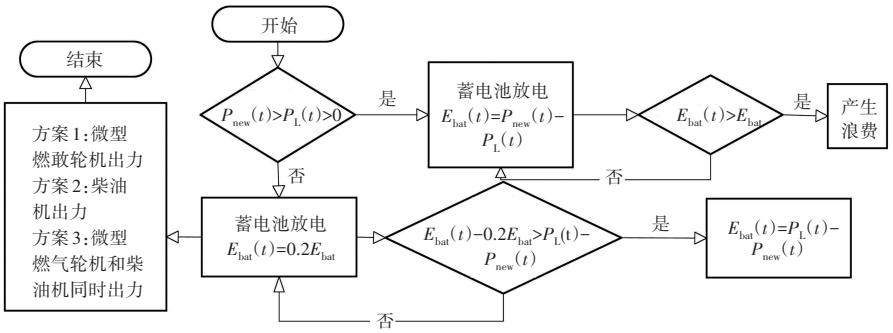


图2 能量流动策略

Fig. 2 Energy flow strategy

方案三中柴油发电机的工作状态由式(8)决定。

$$\Delta P_{\mathrm{c}} = N_{\mathrm{WT}}P_{\mathrm{WT}}(t) + N_{\mathrm{PV}}P_{\mathrm{PV}}(t) + N_{\mathrm{w}}P_{\mathrm{w}}(t) + N_{\mathrm{bat}}P_{\mathrm{bat}}(t) - P_{\mathrm{L}}(t) \tag{8}$$

式中，N_{WT}、N_{PV}、N_{w}、N_{bat} 分别为风机、光伏、微型燃气轮机、储能的台数；$P_{\mathrm{WT}}(t)$、$P_{\mathrm{PV}}(t)$、$P_{\mathrm{bat}}(t)$ 分别为风机、光伏、储能实时功率；$P_{\mathrm{L}}(t)$ 为实时负荷。若 $\Delta P_{\mathrm{c}} < 0$，柴油发电机开始工作；若 $\Delta P_{\mathrm{c}} > 0$ 柴油发电机暂不工作。

2　孤立微电网源储容量优化模型

2.1　优化目标

孤立微电网的优化目标是通过合理规划各种设备的台数，在满足负荷需求、缺电率、自然资源浪费率、风光出力占比和储能荷电状态等条件下，使得系统年均成本最低，为此建立单目标优化函数，如式(9)所示[13]。

$$F = C_{\mathrm{annual}} + C_{\mathrm{change}} + C_{\mathrm{m}} + C_{\mathrm{fuel}} + C_{\mathrm{polluate}} - sC_{\mathrm{annual}} \tag{9}$$

式中，C_{annual} 为年均初始投资费用；C_{change} 为年均设备重置费用；C_{m} 为年均维护费用；C_{fuel} 为年均燃料费用；C_{polluate} 为年均污染处理费用；s 为残值系数。

系统年均初始投资费用如式(10)、(11)所示。

$$C_{\mathrm{annual}} = \sum_{i=1}^{5} N_i U_i \mathrm{CRF} \tag{10}$$

$$\mathrm{CRF} = \frac{r(1+r)^{Y}}{(1+r)^{Y}-1} \tag{11}$$

式中，i = 0、1、2、3、4 分别为 WT、PV、DG、Bat、MT 对应的参数；N_i 为各设备台数；U_i 为各设备的单价；CRF 表示贴现率；r 为银行利率；Y 为微电网的运行年限。

年均设备重置费用如式(12)、(13)所示。

$$C_{\mathrm{change}} = \sum_{i=1}^{5} N_i R_i \mathrm{SFF} \tag{12}$$

$$\mathrm{SFF} = \frac{r}{(1+\mathrm{r})^{Y_i}-1} \tag{13}$$

式中，R_i 为第 i 种设备的单台置换费用；SFF 为偿债因子；Y_i 为各设备的使用年限。

年均设备运行维护费用如式(14)所示。

$$C_{\mathrm{m}} = \sum_{i=1}^{5} N_i K_i \tag{14}$$

式中，K_i 是每台设备的年均运行维护成本。

燃料费用如式(15)所示。

$$C_{\mathrm{fuel}} = C_{\mathrm{fuelc}} + C_{\mathrm{w}} \tag{15}$$

式中，C_{fuelc}、C_{w} 分别为柴油发电机、微型燃气轮机的燃料费用；污染处理费用如式(16)所示[14]。

$$C_{\mathrm{polluate}} = \int_0^T \sum_{j=1}^{3} V_j k_j^{\mathrm{c}} P_{\mathrm{c}}(t)\,\mathrm{d}t + \int_0^T \sum_{j=1}^{3} V_j k_j^{\mathrm{w}} P_{\mathrm{w}}(t)\,\mathrm{d}t \tag{16}$$

式中，V_j 为每千克第 j 种污染气体排放治理成本，k_j^{c} 为柴油发电机第 j 种污染气体排放系数；k_j^{w} 为 MT 的第 j 种污染气体的排放系数，T 为柴油发电机，微型燃气轮机的运行时间。分布式电源的污染气体排放系数和污染治理成本如表 1 所示。

表 1　污染气体排放系数和治理成本[4-5]

Tab. 1　Pollutant gas emission factors and treatment costs[4-5]

污染类型	治理成本/(元·kg^{-1})	DG 污染物排放系数/(g·kWh^{-1})	MT 污染物排放系数/(g·kWh^{-1})
CO_2	0.007 6	232.04	513.24
SO_2	0.770 0	0.46	0
NO_X	1.530 0	4.33	0

2.2　约束条件

在进行孤立微电网的容量优化配置时，必须要考虑功率平衡约束、储能充放电约束等条件。

1）分布式电源、蓄电池受占地面积和实际负荷需求的影响，必须进行最大台数约束，如式(17)所示[15]。

$$0 \leqslant N_i \leqslant N_{i,\max} \tag{17}$$

2）电力系统的正常运行，必须要满足功率平衡约束，如式(18)所示[16]。

$$P_{\mathrm{L}}(t) + P_{\mathrm{ch}}(t) + P_{\mathrm{watse}}(t) = P_{\mathrm{WT}}(t) + P_{\mathrm{PV}}(t) + P_{\mathrm{w}}(t) + P_{\mathrm{c}}(t) + P_{\mathrm{loss}}(t) \tag{18}$$

式中，$P_{\mathrm{L}}(t)$ 为负荷功率；$P_{\mathrm{waste}}(t)$ 为浪费功率，为非负值；$P_{\mathrm{loss}}(t)$ 为缺失功率，为非负值；$P_{\mathrm{ch}}(t)$ 为蓄电池的充放电功率。

对于该微电网而言，还需要满足式(19)所示的缺电率约束、能量浪费约束。

$$\begin{cases} P_{\mathrm{watse}}(t) = 0, & P_{\mathrm{loss}}(t) > 0 \\ P_{\mathrm{watse}}(t) > 0, & P_{\mathrm{loss}}(t) = 0 \end{cases} \tag{19}$$

3）为了保证储能系统的正常运行，储能需要满足式(20)所示的充放电功率约束、式(21)所示的荷电状态约束。

$$|P_{\mathrm{ch}}(t)| \leqslant \frac{\eta E_{\mathrm{bat}}}{\Delta t} \tag{20}$$

$$\mathrm{soc}_{\min} \leqslant \mathrm{soc}(t) \leqslant \mathrm{soc}_{\max} \tag{21}$$

式中，η 为充放电效率；$\mathrm{soc}_{\max}$、$\mathrm{soc}_{\min}$、分别表示储能装置荷电状态的上、下限。

4）当风力发电、光伏发电、微型燃气轮机、柴油发电机和储能放电均不能满足负荷的用电需求时，此时出现缺电现象。t 时刻的功率缺额如式(22)所示。

$$P_{\mathrm{loss}}(t) = P_{\mathrm{L}}(t) - [P_{\mathrm{WT}}(t) + P_{\mathrm{PV}}(t) + P_{\mathrm{w}}(t) + P_{\mathrm{c}}(t) - P_{\mathrm{ch}}(t)] \tag{22}$$

全年缺电量如式(23)

$$E_{\mathrm{loss}} = \int_0^{\mathrm{T}} P_{\mathrm{loss}}(t)\,\mathrm{d}t \tag{23}$$

全年负荷量如式(24)

$$E_{\mathrm{L}} = \sum_{t=1}^{8\,760} E_{\mathrm{L}}(t) \tag{24}$$

因此全年缺电率如式(25)

$$f_{\mathrm{LPSP}} = E_{\mathrm{loss}}/E_{\mathrm{L}} \tag{25}$$

微电网为保证负荷正常运行，需要满足缺电率约束，如式(26)所示。

$$f_{\mathrm{LPSP}} \leqslant f_{\mathrm{LPSP}}^{\max} \tag{26}$$

式中，$f_{\mathrm{LPSP}}^{\max}$ 表示微电网可以允许的最大负荷缺电率。

5）能量浪费约束[17]。当孤立微电网中的负荷和蓄电

池无法消纳自然资源产生的能量时,将产生功率浪费。因此微电网 t 时刻的功率浪费如式(27)所示。

$$P_{\text{watse}}(t) = P_{\text{WT}}(t) + P_{\text{PV}}(t) - P_{\text{ch}}(t) - P_{\text{L}}(t) \tag{27}$$

浪费总功率与系统全年总负荷的比值为能源浪费率,如式(28)所示。

$$f_{\text{EWR}} = \sum_{t=1}^{8\,760} P_{\text{waste}}(t) / \sum_{t=1}^{8\,760} P_{\text{L}}(t) \tag{28}$$

微电网要满足一定的能源利用率,如式(29)所示。

$$f_{\text{EWR}} \leqslant f_{\text{EWR}}^{\max} \tag{29}$$

式中,$f_{\text{EWR}}^{\max}$ 表示系统可接受的最大能量浪费率。

6)风光出力约束。为了提高风光资源的利用率必须对风光出力进行约束,如式(30)、(31)所示。

$$f_{\text{new}} = \sum_{t=1}^{8760} (N_{\text{WT}} P_{\text{WT}}(t) + N_{\text{PV}} P_{\text{PV}}(t)) \tag{30}$$

$$f_{\text{new}} \geqslant f_{\text{newmin}} \tag{31}$$

式中,f_{newmin} 是风光出力最小占比

基于以上分析可知,孤立微电网分布式源储的容量规划问题是一个含有复杂约束的多元非线性整数优化问题,因此采用改进的金豺优化算法(improved golden jackal optimization,IGJO)进行求解。

3 改进的金豺算法求解模型

3.1 改进的金豺优化算法

1) 将 Logistic 混沌映射用于初始化种群,以提高算法的全局搜索能力,如式(32)所示[18]。

$$x_{k+1} = \mu x_k (1 - x_k) \tag{32}$$

式中,x_k 为第 k 次迭代的状态值,$x_k \notin \{0, 0.25, 0.5, 0.75, 1.00\}$,$\mu \in [0,4]$。

2) 采用分层反向学习策略增加种群的多样性,通过设置概率层可以灵活调整反向学习的强度和频率,使得算法可以自适应地调整反向学习策略。该算法的概率层参数如式(33)所示,各层的反向因子如式(34)所示,然后按照式(35)求解反向值[19]。

$$\boldsymbol{p}_{\text{rob}} = [0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5] \tag{33}$$

$$\boldsymbol{f}_{\text{actor}} = [1.1, 1.3, 1.5, 1.7, 1.9] \tag{34}$$

$$\boldsymbol{v}_{\text{alue}}' = (\max(\boldsymbol{v}_{\text{alue}}) - \boldsymbol{v}_{\text{alue}}) \cdot \boldsymbol{f}_{\text{actor}} \tag{35}$$

式中,$\boldsymbol{p}_{\text{rob}}$ 是进行反向值计算的概率矩阵;$\boldsymbol{f}_{\text{actor}}$ 是反向因子矩阵;$\boldsymbol{v}_{\text{alue}}$ 是当前取值矩阵;$\max(\boldsymbol{v}_{\text{alue}})$ 是 $\boldsymbol{v}_{\text{alue}}$ 的取值上界;$\boldsymbol{v}_{\text{alue}}'$ 是依据分层反向学习策略更新后的值的矩阵。

3) 算法进行位置更新时引入变步长正切游走策略。算法在搜索阶段时给予其较大的搜索空间以扩大搜索范围,并且给予其较大的步长以提高搜索速度,如式(36)所示;在包围猎物阶段给予其小步长、小范围使其进行精细搜索,如式(37)所示。根据模拟退火算法和目标函数动态求解步长,最终确定出最优步长[20-21]。

$$Y'(t+1) = Y(t+1) + s_0 \times \tan\alpha \tag{36}$$

$$Y'(t+1) = Y(t+1) + s_1 \times \tan\beta \tag{37}$$

式中,s_0 是搜索猎物阶段用到的步长;s_1 是包围猎物阶段用到的步长;α、β 用于确定搜索范围,均是随机数。因此 IGJO 算法流程图如图 3 所示。

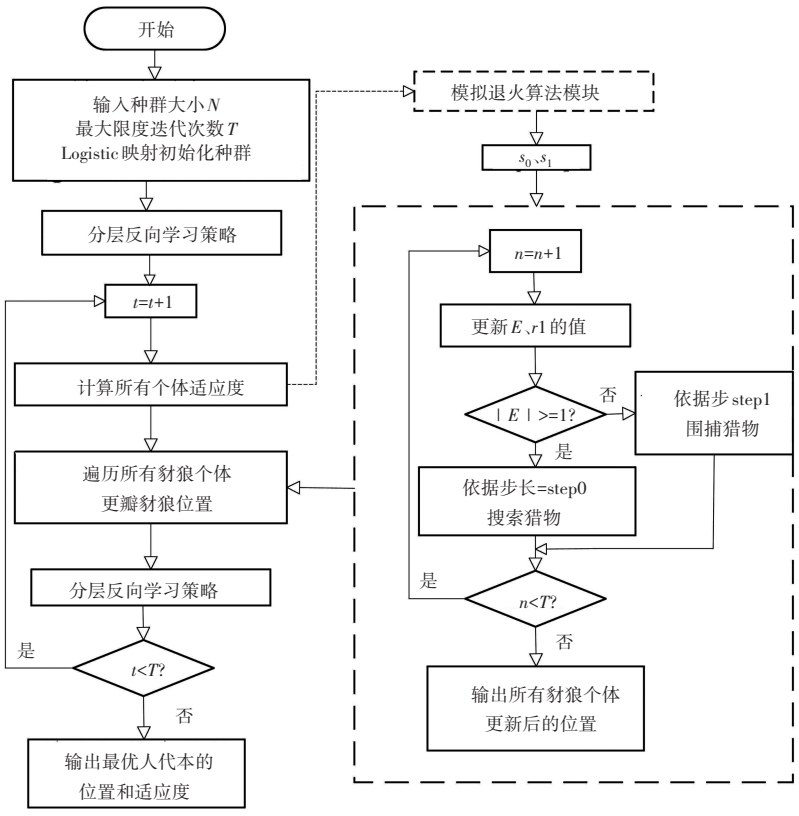


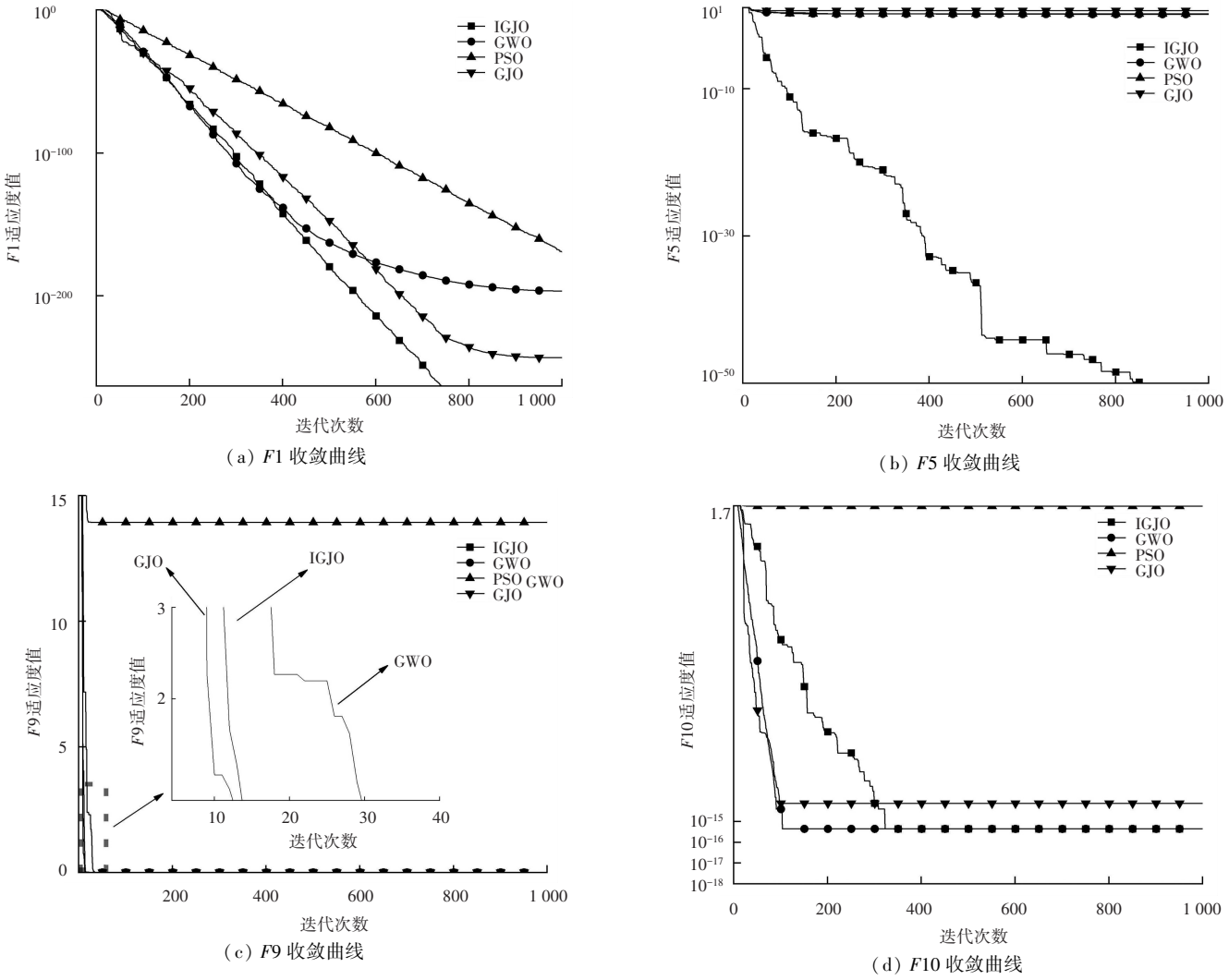
图 3 IGJO 算法流程图

Fig. 3 Flowchart of IGJO algorithm

3.2 算法性能比较

用单目标函数的常用测试函数测试 IGJO 的性能,并与 GJO、GWO 和 PSO 作比较,结果如图 4 所示。单峰测试函数 $F1$:Sphere 函数、$F5$:Rosenbrock 函数;多峰测试函数 $F9$:Rastrigin 函数、$F10$:Ackley 函数。

收敛曲线清晰展示了各算法的收敛速度。图 4(a)~4(c)显示,IGJO 比 GJO、GWO 和 PSO 收敛速度更快,且在最少迭代次数内找到最优解。此外,IGJO 求解 $F1$、$F5$ 和 $F9$ 的结果也优于其他 3 种算法。在计算具有大量局部最优解的 $F10$ 问题时,尽管 IGJO 的迭代次数较多,但其最优解与 GWO 相当,且优于 GJO 和 PSO。综上所述,Logistic 混沌映射初始化、分层反向学习策略和变步长正切游走策略的引入大体上有效提升了 IGJO 的性能。



(a) $F1$ 收敛曲线　(b) $F5$ 收敛曲线

(c) $F9$ 收敛曲线　(d) $F10$ 收敛曲线

图 4　IGJO、GJO、GWO、PSO 比较结果

Fig. 4　Comparison results of IGJO, GJO, GWO, PSO

3.3 基于 IGJO 容量优化配置流程

将风力发电机、光伏组件、柴油发电机、蓄电池、微型燃气轮机的台数作为单目标优化问题的决策变量,即 $y=(N_{WT},N_{PV},N_{DE},N_{Bat},N_{MT})$。在满足缺电率、浪费率等约束的条件下用 IGJO 算法迭代求解,得到年均总投资费用最低的方案。算法的主要步骤如下。

1) 输入全年的逐时风速、光照强度、温度和负荷的数据。

2) 确定种群个数、最大迭代次数、IGJO 和模拟退火算法的相关参数。

3) 利用混沌映射初始化,生成初始种群,即各设备的台数,再利用分层反向学习策略,生成初始种群的反向种群。

4) 根据目标函数计算种群的适应度,并且检查缺电率、浪费率和风光出力约束,确定最优个体和次优个体。

5) 依据适应度值,利用模拟退火算法求解最优迭代步长。

6) 利用变步长正切游走策略更新个体位置即调整各个决策变量的值。

7) 利用分层反向学习策略生成本次迭代产生的最优种群的反向种群。

8) 若迭代至最大迭代次数,输出最优个体即最优 y 值;否则返回第 4)步。

4 算例分析

4.1 系统参数及算例求解

以地理位置在26°12′0″N,80°10′3″W的偏远地区一年的气象数据和当地居民一年实际用电量为基础进行容量优化配置[22]。各分布式电源的参数如表2所示。以MT作为补充能源,分别采用GJO、IGJO、GWO、PSO求解该单目标优化问题,种群个体数为50,算法迭代50次[23-24]。经算法求解得到算例收敛曲线如图5所示。不同求解算法下的容量规划结果如表3所示。从图5可以看出,IGJO算法的收敛速度优于GJO、GWO和PSO,使得年均总成本分别下降了2.7%、8.8%和14.4%。据此,IGJO算法在微电网需求响应和容量优化配置方面表现出高效性。

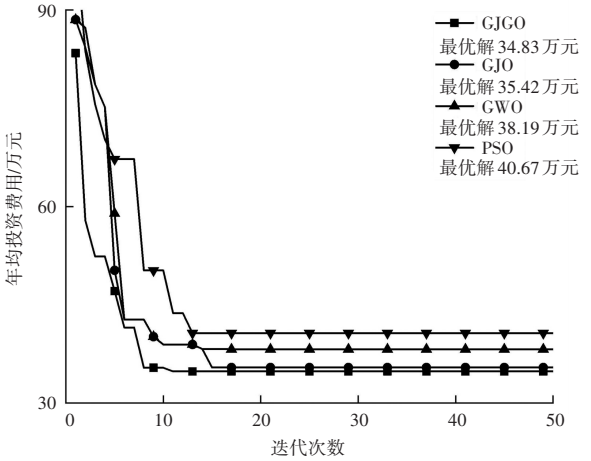


图5 算例收敛曲线

Fig. 5 Convergence curve of scheme

表2 分布式电源、储能各项成本[22]

Tab. 2 Costs ofdistributed power, energy storage

电源类型	单机容量	单台设备投资费用/万元	年均维护费用元/(kW·a^{-1})	使用年限/a
WT	10 kW	7.6	5.7	10
PV	0.3 kW	0.24	14.3	10
DG	5.5 kW	0.55	9.8	10
Bat	4.8 kWh	1.6	7	5
MT	30 kW	1.2	3.7	20

表3 容量规划结果

Tab. 3 Capacity planning results

算法	WT/台	PV/台	Bat/台	MT/台	年均投资费用/万元
IGJO	199	470	399	5	34.83
GJO	207	375	401	7	35.42
GWO	163	403	423	8	38.19
PSO	172	461	409	9	40.67

4.2 容量配置方案对比分析

为了比较微型燃气轮机与柴油发电机作为孤立微电网补充电源的经济性,设立了3种方案并采用IGJO算法对其进行求解,不同方案下的容量配置结果如表4所示。

若采用柴油发电机替代微型燃气轮机,年均投资费用将上升17.6%。基于方案1绘制4个季节的典型日出力分布图,具体如图6所示。

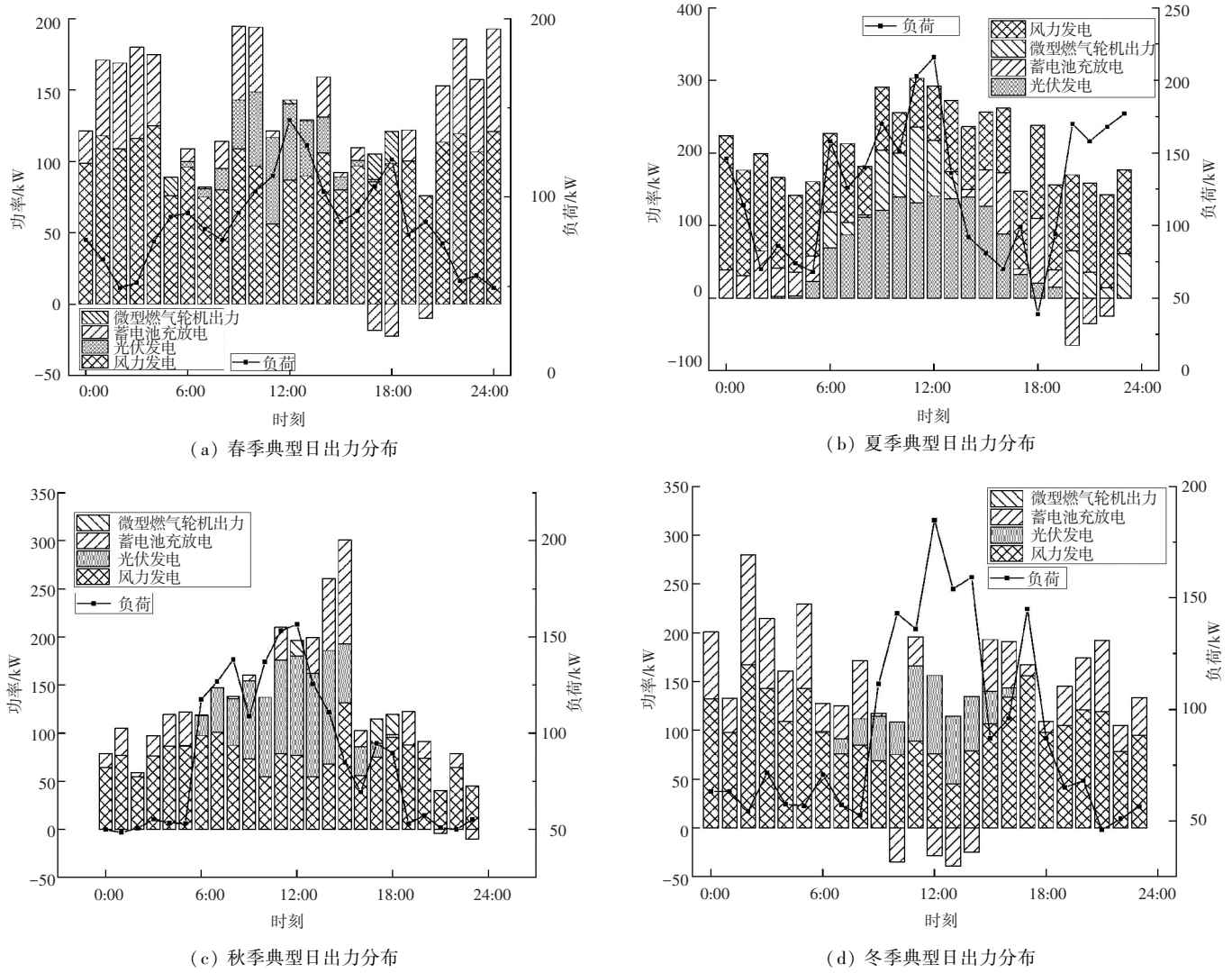
表4 3种方案的容量规划结果

Tab. 4 Capacity planning results for the three scenarios

方案	WT/台	PV/台	Bat/台	MT/台	DG/台	年均燃料/万元	年均投资费用/万元
1	199	470	399	5	0	1.227	34.83
2	173	532	381	0	41	3.018	40.97
3	201	441	379	4	6	1.655	36.46

考虑到算例所在地区的风光资源具有明显的季节性,如图6所示,夏季和秋季的太阳能资源丰富,而冬季和春季则有充足的风能资源。基于这些特点,风能成为春季和冬季的主要能源来源。在这两个季节,负荷相对于夏季更为稳定。在负荷低谷时段,蓄电池进行充电;而在高峰期,蓄电池则进行放电。一个日调度周期结束后,蓄电池仍然有余量可供下一个日调度周期使用。如图6(b)所示,由于夏季平均负荷是年平均负荷的1.5倍,可能会出现新能源发电无法完全满足负荷需求的情况,此时微型燃气轮机将会投入运行。而在图6(c)中,秋季负荷在年平均负荷附近波动,大部分时间可以通过新能源发电和蓄电池调度来满足负荷需求,因此微型燃气轮机的使用量比夏季少得

多。考虑到风光资源的不确定性以及蓄电池的放电下限为 0.2,若蓄电池初始电量为 0,那么它将需要长时间地充电以达到最低放电能量要求,这也是蓄电池放电主要发生在后半周期的原因。综上所述,在考虑到风光资源季节性变化的情况下,有效利用微型燃气轮机和蓄电池系统可以应对负荷需求波动的挑战。



(a) 春季典型日出力分布　(b) 夏季典型日出力分布

(c) 秋季典型日出力分布　(d) 冬季典型日出力分布

图 6　方案 1 典型日出力分布

Fig. 6　Typical daily output distribution for scheme 1

5　结论

以孤立微电网中补充电源的类型选择为切入点,构建了一个以年均总投资成本最小化为目标的风-光-微-储容量优化配置模型,并采用改进的金豺算法对该模型进行求解。研究得出以下主要结论。

1) 算法改进。引入 Logistic 混沌映射初始化、分层反向学习策略和变步长正切游走策略,显著提高了金豺优化算法的收敛速度,同时也获得了更优的求解结果。

2) IGJO 算法的优越性。与 GWO、PSO 和 GJO 算法相比,改进的金豺优化算法(IGJO)在微电网容量优化配置问题中表现出更高的经济效益。IGJO 算法不仅降低了投资成本,而且提高了分布式电源的响应速度,显示出其在微电网优化配置中的应用潜力。

3) 补充电源的选择。在成本评价标准的基础上,微型燃气轮机因其较低的燃料价格和较少的污染气体排放量,相较于柴油发电机,更适合作为孤立微电网的补充电源。这一结果为孤立微电网的可持续发展提供参考。

参考文献

[1] Venkataramanan G, Marnay C. A larger role for microgrids[J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2008, 6(3):78-82.
[2] 马溪原, 吴耀文, 方华亮,等. 采用改进细菌觅食算法的风/光/储混合微电网电源优化配置[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(25):17-25.
[3] 潘军, 卢彦杉, 何彬彬,等. 计及风、光出力不确定性的微电网经济调度研究[J]. 电工电能新技术, 2024, 43(2):56-64.
[4] 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.
[5] 黄冬梅, 吕嘉欣, 时帅, 等. 计及需求响应的海岛微电网群优化运行研究[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(9):88-98.
[6] 张长云, 黄景光, 李振兴, 等. 极地环境含风氢储混合微电网容量优化配置[J]. 电力工程技术, 2022, 41(1):108-116.

(下转第 70 页)