DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2026.2.208 **中图分类号**：TM619 **文献标志码**：A

基于改进免疫粒子群算法的混合储能容量优化

李练兵[1](中国电源学会会员)，王兰超[2]，景睿雄[2]，肖亚泽[1]，杨少波[3]
(1.河北工业大学电气工程学院，天津 300130；2.河北工业大学人工智能与数据科学学院，天津 300130；3.国网河北省电力有限公司电力科学研究院，石家庄 050000)

摘要：为了提高微电网运行的经济性和稳定性，需要根据气象信息和负荷信息对微电网的容量进行合理优化。为此，建立分布式电源的数学模型，根据系统的约束条件和运行策略，以分布式电源的数量作为优化变量，以总成本最低为目标函数，利用改进的免疫粒子群优化算法对微电网的容量进行优化。首先，利用正态分布进行初始化，增加种群多样性。然后，利用非线性惯性因子、自适应惯性权重和混沌扰动算子提高算法的收敛速度和收敛精度。实验结果表明，所提方法具有合理性，可以有效降低投资成本，为微电网的容量优化提供参考价值。

关键词：微电网；容量优化；改进免疫粒子群优化算法；经济性

Capacity Optimization of Hybrid Energy Storage Based on Improved Immune Particle Swarm Optimization Algorithm

LI Lianbing[1], *Member*, *CPSS*, WANG Lanchao[2], JING Ruixiong[2], XIAO Yaze[1], YANG Shaobo[3]
(1. School of Electrical Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China; 2. School of Artificial Intelligence, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China; 3. Electric Power Research Institute, State Grid Hebei Electric Power Co., Ltd., Shijiazhuang 050000, China)

Abstract: To improve the economy and stability of microgrid operation, it is necessary to optimize the capacity of microgrid reasonably according to the meteorological information and load information. Under this background, a mathematical model of distributed power sources is established. According to the constraint conditions and operation strategy for the system, the number of distributed power sources is taken as an optimization variable, and the minimum total cost is taken as an objective function. The improved immune particle swarm optimization algorithm is used to optimize the capacity of microgrid. First, normal distribution is used for initialization, so as to increase the population diversity. Then, the nonlinear inertia factor, adaptive inertia weight and chaotic disturbance operator are used to improve the convergence speed and accuracy of the algorithm. Experimental results show that the proposed method is reasonable and can effectively reduce the investment cost, providing a reference value for the capacity optimization of microgrid.

Keywords: Microgrid; capacity optimization; improved immune particle swarm optimization algorithm; economy

随着社会的发展，传统化石燃料的消耗量不断增加，对于诸如风能、光能等新能源的开发和利用有着重要的意义。受环境因素的影响，风力发电和光伏发电具有随机性和间歇性的特点，大规模的新能源发电系统接入电网，对电网的抗冲击能力、电能质量、电网调度等方面提出了更高的要求。利用储能技术可以提高新能源发电的稳定性，因此合理地配置系统的容量，维持系统的功率平衡，不仅可

收稿日期：2023-06-05；**修回日期**：2023-07-25，2023-09-03；
录用日期：2023-11-01；**网络首发日期**：2024-01-03
基金项目：国网河北能源技术服务有限公司科技专项资助项目(TSS2021-08)
The work is supported by the Science and Technology Project of State Grid Hebei Energy Technology Service Co., Ltd. under the grant TSS2021-08

以降低发电系统的投入费用，而且对于电网运行的经济性和可靠性具有重要意义。

目前，国内外学者对于微电网的容量配置问题进行了大量研究。文献[1]将超级电容和蓄电池引入风光互补发电系统中，利用容量优化软件和遗传算法相结合进行分级优化；文献[2]将电网视作 1 个额定容量为某一值的电厂，以年等值投资费用为优化目标，采用遗传粒子群算法求解恒定容量下发电单元最优容量配置；文献[3]将和声搜索和模拟退火 2 种算法结合，为偏远地区设计了分布式能源发电和储能的混合动力系统；文献[4]研究了需求响应利用率对减小发电损失的影响，确定了最优配置，降低了总成本。上述方法可以在一定程度上提高微网投资和运行的经济性，但是对于模型建立的准确性及求解的快速性有进一步提升的空间。

本文以某地区的气象信息和负荷信息作为系统的输入，建立分布式电源的数学模型，根据系统的约束条件和运行策略，以分布式电源的数量作为优化变量，以总成本最低作为目标函数，利用改进的免疫粒子群算法对微电网的容量进行优化。针对免疫粒子群算法收敛速度慢，易陷入局部最优等缺点，利用正态分布进行初始化，增加种群多样性。然后，利用非线性惯性因子、自适应惯性权重和混沌扰动算子提高算法的收敛速度和收敛精度。本文旨在提高微电网投资运行的经济性，为微电网的规划建设提供参考。

1　系统的结构及出力模型分析

1.1　系统结构

风光储发电系统基本结构如图 1 所示，主要包括风力发电机组、光伏阵列、储能装置。风力发电机组和光伏阵列将风能和光能转变成电能，通过相应的控制策略汇入直流母线[5]。储能装置具有能量调节作用，当风、光发电量大于负荷时，储能装置进行充电，减少能源浪费；当风、光发电量小于负荷时，储能装置进行放电，以满足用电需求。直流母线可以通过变流器并入电网或用于交流负载的供电。

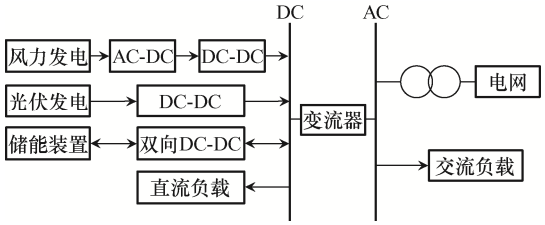


图 1　风光储发电系统基本结构

Fig. 1 Basic structure of wind-PV-energy storage power generation system

1.2　出力模型分析

分布式电源主要由风力发电机、光伏板、蓄电池及柴油发电机组成。风力发电机的输出功率与风速及风力发电机的额定功率有关；光伏板的输出功率与光照、温度及光伏的额定功率有关[6]；蓄电池可以用于平滑风光功率及削峰填谷；柴油发电机可以预防风电及蓄电池供电不足，其输出功率主要与耗油量有关。

2　系统容量优化模型

2.1　目标函数

系统容量优化的目标是在满足各种约束条件下，合理配置风力发电机、光伏板、蓄电池和柴油发电机的数量，使系统投资总成本最低。

设定发电系统风力发电机数量为 N_{wt}，光伏板数量为 N_{pv}，蓄电池数量为 N_{bat}，柴油发动机数量为 N_{dg}，记为

$$\boldsymbol{X}=\left[N_{\mathrm{wt}}\quad N_{\mathrm{pv}}\quad N_{\mathrm{bat}}\quad N_{\mathrm{dg}}\right]^{\mathrm{T}} \tag{1}$$

本文投资总成本包括各分布式电源的年均初始投资成本、运行维护成本、燃油成本和污染治理成本，因此，目标函数为

$$\min C=C_{\mathrm{o}}+C_{\mathrm{m}}+C_{\mathrm{f}}+C_{\mathrm{p}}+C_{\mathrm{w}} \tag{2}$$

式中：C 为投资总成本；C_{o} 为年均初始投资成本；C_{m} 为运行维护成本；C_{f} 为燃油成本；C_{p} 为污染治理成本；C_{w} 为能源浪费惩罚成本。

系统的年均初始投资成本为

$$C_{\mathrm{o}}=(N_{\mathrm{wt}}M_{\mathrm{wt}}+N_{\mathrm{pv}}M_{\mathrm{pv}}+N_{\mathrm{bat}}M_{\mathrm{bat}}+N_{\mathrm{dg}}M_{\mathrm{dg}})f_{\mathrm{cr}} \tag{3}$$

$$f_{\mathrm{cr}}=\frac{r(1+r)^{y}}{(1+r)^{y}-1} \tag{4}$$

式中：M_{wt}、M_{pv}、M_{bat}、M_{dg} 分别为风力发电机、光伏板、蓄电池、柴油发电机的单价；f_{cr} 为折旧系数；r 为折旧率；y 为使用年限[7]。

系统的运行维护成本为

$$C_{\mathrm{m}}=C_{\mathrm{m,wt}}t_{\mathrm{wt}}+C_{\mathrm{m,pv}}t_{\mathrm{pv}}+C_{\mathrm{m,bat}}t_{\mathrm{bat}}+C_{\mathrm{m,dg}}t_{\mathrm{dg}} \tag{5}$$

式中：$C_{\mathrm{m,wt}}$、$C_{\mathrm{m,pv}}$、$C_{\mathrm{m,bat}}$、$C_{\mathrm{m,dg}}$ 分别为单位时间内风力发电机、光伏板、蓄电池、柴油发电机的运行维护费用；t_{wt}、t_{pv}、t_{bat}、t_{dg} 分别为发电机、光伏板、蓄电池、柴油发电机的运行时间。

系统的燃油成本为

$$C_{\mathrm{f}}=\sum_{i=1}^{n}k_{\mathrm{f}}P_{\mathrm{DIE}}(t)\Delta t \tag{6}$$

式中：n 为柴油发电机工作时间段；k_{f} 为柴油发电机燃料费用系数；$P_{\mathrm{DIE}}(t)$为柴油发电机在 t 时间内的发电功率。

系统的污染治理成本[8]为

$$C_{\mathrm{p}}=\sum_{i=1}^{m}k_{\mathrm{p1}}k_{\mathrm{p2}}P_{\mathrm{DIE}}(t)\Delta t \tag{7}$$

式中：m 为污染物的种类；k_{p1} 为污染治理系数；k_{p2} 为污染物排放系数。

系统的能源浪费惩罚成本为

$$C_{\mathrm{w}}=\int_{0}^{T}K_{\mathrm{waste}}P_{\mathrm{waste}}(t)\mathrm{d}t \tag{8}$$

式中：K_{waste} 为能量浪费惩罚系数；$P_{\mathrm{waste}}(t)$为 t 时刻功率盈余。

2.2 约束条件

2.2.1 安装数量的约束

在实际工程应用中，应当考虑投资成本、场地面积、投资收益等各方面的因素[9]，该约束条件设置为

$$\begin{cases}0<N_{\mathrm{wt}}\leqslant N_{\mathrm{wtmax}}\\0<N_{\mathrm{pv}}\leqslant N_{\mathrm{pvmax}}\\0<N_{\mathrm{bat}}\leqslant N_{\mathrm{batmax}}\\0<N_{\mathrm{dg}}\leqslant N_{\mathrm{dgmax}}\end{cases} \tag{9}$$

式中：N_{wtmax}、N_{pvmax}、N_{batmax}、N_{dgmax} 分别为风力发电机、光伏板、蓄电池、柴油发电机的最大装机容量。

2.2.2 蓄电池容量及充放电功率约束

为了更好地发挥电池的性能，延长电池的使用寿命，应当对蓄电池荷电状态 SOC(state of charge)及充放电功率进行约束，该约束条件设置[10]为

$$S_{\mathrm{OC,min}}\leqslant S_{\mathrm{OC}}(t)\leqslant S_{\mathrm{OC,max}} \tag{10}$$

$$\begin{cases}P_{\mathrm{cmin}}\leqslant P_{\mathrm{c}}(t)\leqslant P_{\mathrm{cmax}}\\P_{\mathrm{dmin}}\leqslant P_{\mathrm{d}}(t)\leqslant P_{\mathrm{dmax}}\end{cases} \tag{11}$$

式中：$S_{\mathrm{OC}}(t)$为 t 时刻电池容量；$S_{\mathrm{OC,min}}$、$S_{\mathrm{OC,max}}$ 分别为蓄电池容量下限、上限；P_{cmin}、P_{cmax} 和 P_{dmin}、P_{dmax} 分别为电池最小、最大充电功率和最小、最大放电功率。

2.2.3 柴油机出力约束

柴油机具有爬坡功率，并且在低载运行时，能量利用率比较低，因此将柴油机功率及爬坡约束限制为

$$P_{\mathrm{DGmin}}\leqslant P_{\mathrm{DG}}(t)\leqslant P_{\mathrm{DGmax}} \tag{12}$$

$$|P_{\mathrm{DG}}(t)-P_{\mathrm{DG}}(t-1)|\leqslant R_{\mathrm{Dmax}} \tag{13}$$

式中：$P_{\mathrm{DG}}(t)$为柴油机在 t 时刻的实际输出功率；P_{DGmin}、P_{DGmax} 分别为柴油机输出功率的下限、上限；R_{Dmax} 为柴油机最大爬坡功率。

2.2.4 功率平衡约束

在任意时刻，微电网的输出功率应当等于负载消耗的总功率，设置该约束条件[11]为

$$P_{\mathrm{ref}}=P_{\mathrm{wd}}(t)+P_{\mathrm{pv}}(t)+P_{\mathrm{bat}}(t)+P_{\mathrm{dg}}(t) \tag{14}$$

式中：P_{ref} 为 t 时刻负载消耗的总功率；$P_{\mathrm{wd}}(t)$、$P_{\mathrm{pv}}(t)$、$P_{\mathrm{bat}}(t)$、$P_{\mathrm{dg}}(t)$分别为 t 时刻风力发电机、光伏板、蓄电池、柴油发电机的输出功率。

2.3 运行策略

为了保证系统的平稳运行，同时降低投资成本，需要对微电网的运行策略进行合理规划。当风光发电功率大于负载消耗的总功率时，蓄电池将进行充电，消纳多余的能量。当风光发电功率小于负载消耗的总功率时，若 $S_{\mathrm{OC}}>S_{\mathrm{OC,min}}$，则再判断风光储发电是否大于负荷，若是，则由蓄电池持续放电，否则由柴油机和蓄电池共同放电；若 $S_{\mathrm{OC}}\leqslant S_{\mathrm{OC,min}}$，则由柴油机发电[12]。微电网能量调度策略流程如

图 2 所示。

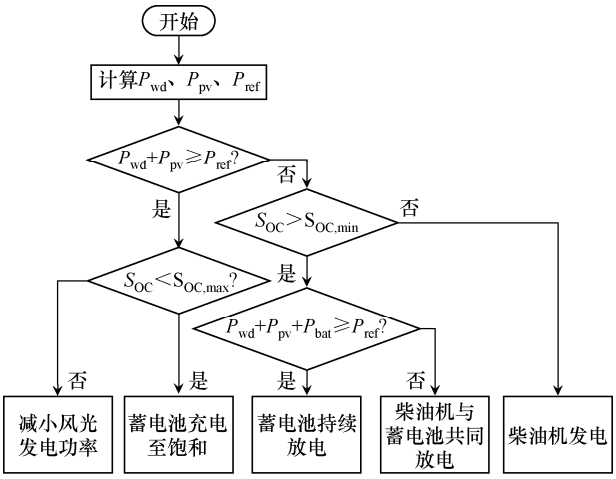


图 2　微电网能量调度流程

Fig. 2 Energy scheduling process of microgrid

3　改进的免疫粒子群算法

3.1　免疫粒子群算法

3.1.1　经典粒子群算法

粒子群算法是通过模仿鸟群觅食行为而发展起来的 1 种算法[13-15]，在多峰值函数的全局寻优问题方面具有广泛应用。若在 1 个 D 维的空间中一共有 N 个粒子，第 i 个粒子表示为 D 维向量 $\boldsymbol{X}_i=(X_{i1}\ X_{i2}\ \cdots\ X_{iD})$，$i=1, 2, \cdots, N$。第 i 个粒子的速度也是 1 个 D 维向量，记为 $\boldsymbol{V}_i=(V_{i1}\ \ V_{i2}\ \cdots\ V_{iD})$，$i=1, 2, \cdots, N$。在第 k 代的第 i 个粒子向第 k+1 代进化时，粒子速度与位置迭代公式[16]为

$$V_{ij}(k+1)=\omega V_{ij}(k)+c_1r_1[P_{ij}(k)-X_{ij}(k)]+c_2r_2[P_{gj}(k)-X_{ij}(k)] \tag{15}$$

$$X_{ij}(k+1)=X_{ij}(k)+V_{ij}(k+1) \tag{16}$$

式中：j 为空间维数；V_{ij} 为粒子速度；ω 为惯性权重；c_1、c_2 为学习因子；r_1、r_2 为随机常数，其值介于(0, 1)之间；P_{ij} 为第 i 个粒子的个体最优解；P_{gj} 为全局最优解；X_{ij} 为粒子的位置。

3.1.2　免疫粒子群算法

随着迭代次数的增加，粒子群算法中种群的多样性会减小，这就会使系统过早收敛，陷入局部最优，因此粒子群算法不能完全收敛至全局最优。为了克服粒子群算法的不足，将免疫算法引入到改进的粒子群算法中。利用免疫算法中自我调节和免疫记忆特性，丰富粒子多样性，提高算法的收敛精度。免疫算法将目标函数对应为入侵生命体的抗原，将问题的解对应于免疫系统产生的抗体[17]。在免疫系统中，部分抗体作为记忆细胞保留下来，当机体再次受到同类抗原的攻击时，记忆细胞会第一时间做出反应并产生对应的抗体[18]，利用抗原和抗体的亲和力强度及浓度进行筛选，只保留优质粒子，确保快速收敛至全局最优。由于初始化位置会影响到算法的求解速度和精度，并且由于学习因子和惯性权重都是定值，因此难以兼顾个体最优和全局最优。在迭代后期，种群中的粒子就会因为缺乏种群多样性而陷入局部最优。所以免疫粒子群算法在求解的稳定性、准确性及快速性方面有很大的改进空间。

3.2　改进的免疫粒子群算法

改进的免疫粒子群算法首先利用正态分布产生更加随机的初始解，有助于避免陷入局部最优解。其次对学习因子和惯性权重进行改进，来平衡粒子的局部最优值和全局最优值，提高收敛速度和收敛精度。最后加入混沌扰动算子，使得粒子在搜索过程中有一定的随机性，从而跳出局部最优解，提高算法的准确性。

3.2.1　正态分布

种群初始化是智能算法在初步阶段的重要环节，初始化位置的优劣可以直接影响到算法的求解速度和精度，正态分布是 1 种连续分布，可以产生连续的随机数，因此可以产生更加随机的初始解，有助于避免陷入局部最优解。本文使用正态分布初始化粒子种群，其函数的随机变量 X 服从数学期望为 μ、方差为 σ 的概率分布，概率密度函数为

$$f(x)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma}\mathrm{e}^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \tag{17}$$

3.2.2　学习因子

学习因子 c_1、c_2 分别表示向个体最优和全局最优靠近的权重，其中 c_1 控制了粒子向自己历史最优位置的移动程度，即粒子的局部搜索能力；c_2 控制

了粒子向全局最优位置的移动程度，即粒子的全局搜索能力[19]。种群迭代前期，个体经验信息的意义大于全局经验信息意义，种群迭代后期则相反。因此，应当保证迭代前期 c_1 较大，迭代后期 c_2 较大。本文设计的学习因子可表示为

$$c_1(k)=c_1^{\max}+(c_1^{\max}-c_1^{\min})\left[\left(\frac{k}{k_{\max}}\right)^2-\frac{2k}{k_{\max}}\right] \tag{18}$$

$$c_2(k)=c_2^{\max}+(c_2^{\max}-c_2^{\min})\left[\left(\frac{k}{k_{\max}}\right)^2-\frac{2k}{k_{\max}}\right] \tag{19}$$

式中：$c_1(k)$、$c_2(k)$分别为学习因子 c_1、c_2 迭代至第 k 次的取值；$c_1^{\max}$、$c_1^{\min}$、$c_2^{\max}$、$c_2^{\min}$ 分别为学习因子 c_1、c_2 的最大值、最小值；$k_{\max}$ 为最大迭代次数。

3.2.3 惯性权重

粒子群算法中的惯性权重是控制粒子速度变化的 1 个参数，当惯性权重较大时，粒子的速度变化较快，可以快速搜索到新的解，但容易陷入局部最优解。当惯性权重较小时，粒子的速度变化较慢，可以保持全局搜索能力，避免陷入局部最优解，但搜索速度较慢[20]。因此，为了提高粒子的寻优能力，前期的惯性权重应当较大，后期应当较小。本文设计的惯性权重可表示为

$$\omega_i(k)=\begin{cases}\omega_{\min}+(\omega_{\max}-\omega_{\min})\dfrac{f_{\max}^k-f(x_i^k)}{f_{\max}^k-f_{\text{average}}^k} \\ \qquad f(x_i^k)\geqslant f_{\text{average}}^k \\ \omega_{\max} \qquad f(x_i^k)<f_{\text{average}}^k\end{cases} \tag{20}$$

式中：$\omega_{\min}$ 为最小惯性系数，一般取 0.4；$\omega_{\max}$ 为最大惯性系数，一般取 0.9；f_{average}^k 为第 k 次迭代时所有粒子的平均适应度；$f(x_i^k)$ 为第 k 次迭代时第 i 个粒子的适应度；$f_{\max}^k=\max\{f(x_1^k),f(x_2^k),\cdots,f(x_n^k)\}$，即第 k 次迭代时所有粒子的最大适应度。

3.2.4 混沌扰动算子

加入扰动算子可以帮助算法跳出局部最优解，从而更好地探索全局最优解。扰动算子可以通过随机数或其他方法引入随机性，使得粒子在搜索过程中有一定的随机性，从而跳出局部最优解[21]，提高算法的精度和性能。因此，在加入混沌扰动算子之后，粒子位置更新公式为

$$X_{ij}(k+1)=X_{ij}(k)+V_{ij}(k+1)+\Delta V_{ij}(k+1) \tag{21}$$

$$\Delta V_{ij}(k+1)=\begin{cases}x_n/\alpha & x_n\in[0,\alpha) \\ (1-x_n)/(1-\alpha) & x_n\in[\alpha,1)\end{cases} \tag{22}$$

式中，α 为扰动算子，取 0.5。x_n 的取值不能与 α 相同，否则将演化成周期系统。

改进的免疫粒子群算法容量优化配置流程如图 3 所示。

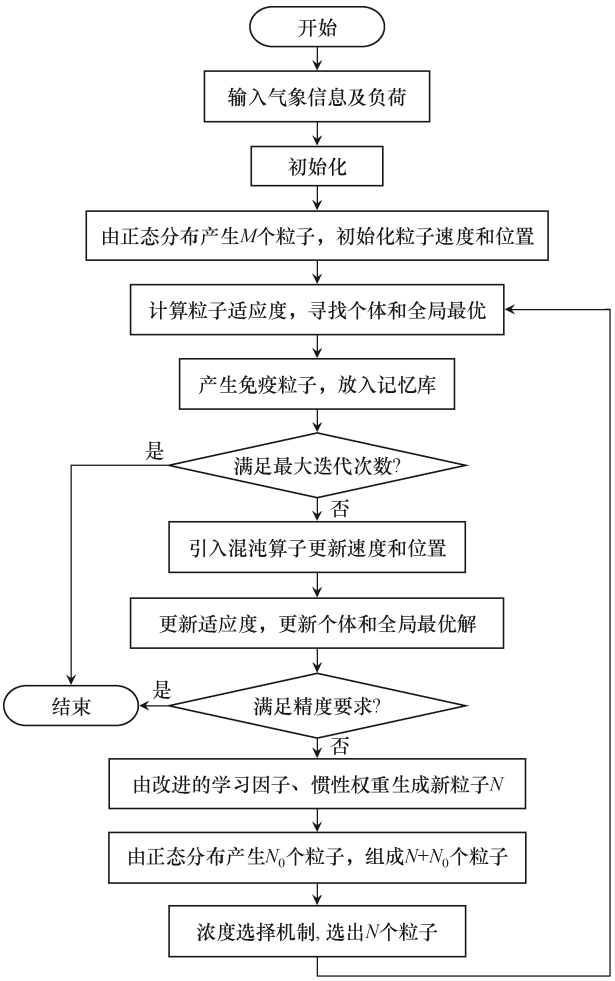


图 3 改进的免疫粒子群优化算法控制流程

Fig. 3 Flow chart of control of improved immune particle swarm optimization algorithm

4 算例分析

4.1 基础数据及参数设置

选择中国北方某地区作为研究对象，以该地的气象数据和用电量为基础，绘制出该地区全年的逐

时风速、温度、光照、负荷数据分别如图 4 所示。该地区全年用电总负荷约为 9.64×10^5 kWh，数据采样间隔为 1 h，根据全年数据进行解算，采用改进的免疫粒子群算法对微电网进行容量优化。

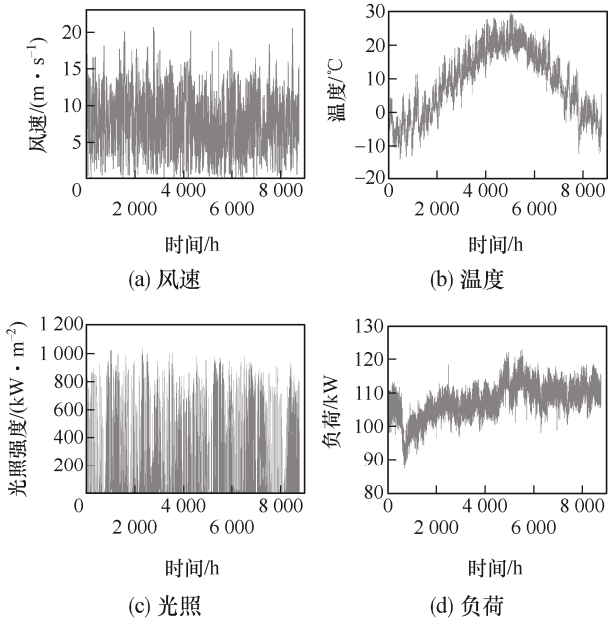


图 4　全年逐时风速、温度、光照、负荷

Fig. 4 Hourly wind speed, temperature, light and load throughout one year

本文选取的各分布式电源的参数及相关费用见表 1，蓄电池初始电量 $S_{OC}(0)$=0.5，其 SOC 值必须在[0.1, 0.9]之间，柴油发电机在运行过程中会产生 CO_2、SO_2、NO_X 等污染气体，其排放系数及污染治理费用[22]见表 2。

表 1　各分布式电源参数及相关费用

Tab. 1 Parameters and related costs of each distributed power source

电源类型	功率成本系数/(元·kWh^{-1})	运维成本系数/(元·kWh^{-1})	燃油成本系数/(元·kWh^{-1})	使用年限/年
风力发电机(10 kW)	4 500	0.045	0	20
光伏板(1 kW)	4 300	0.018	0	20
蓄电池(1.2 kWh)	583	0.008	0	5
柴油发电机(20 kW)	6 200	0.211	1.83	10

表 2　污染气体排放及治理费用

Tab. 2 Pollution gas emission and treatment costs

气体种类	污染物排放系数/(g·kWh^{-1})	污染治理费用系数/(元·kg^{-1})
CO_2	649.000	0.210
SO_2	0.206	14.842
NO_X	9.890	62.964

4.2 优化结果与分析

根据本文建立的数学模型、目标函数、约束条件，通过对该地区风速、温度、光照、负荷的获取，分别利用粒子群算法、免疫粒子群算法和本文所提改进的免疫粒子群算法对微电网的容量进行优化。为了使结果更具代表性，每种算法运行 10 次并取平均值。设置种群数量为 50，最大迭代次数为 100，标准粒子群算法的学习因子 c_1=c_2=2，惯性权重 ω=0.6，免疫粒子群算法及改进的免疫粒子群算法的学习因子 $c_1^{\max}=2$，$c_1^{\min}=1$，$c_2^{\max}=1$，$c_2^{\min}=2$，惯性权重 $\omega_{\max}$=0.9，$\omega_{\min}$=0.4。3 种算法迭代寻优结果曲线如图 5 所示，容量配置结果见表 3。

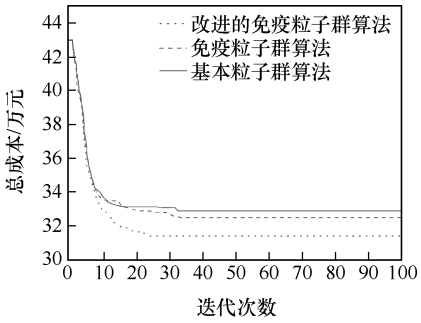


图 5　3 种算法寻优迭代曲线

Fig. 5 Iteration curves for optimization of three algorithms

表 3　3 种算法容量配置结果

Tab. 3 Capacity configuration results of three algorithms

优化算法	风力发电机/台	光伏板/块	蓄电池/块	柴油发电机/台	总成本/元
基本粒子群算法	14	167	56	20	335 346
免疫粒子群算法	15	169	78	17	332 135
改进的免疫粒子群算法	17	154	57	16	316 698

由图 5 可知，3 种算法都可以寻优找到系统的最优容量，改进免疫粒子群算法相对于其他 2 种算法具有更大的优势，主要体现在收敛速度更快、求解精度更高，最终寻优的总成本最低。在迭代第 25 次左右，改进的免疫粒子群算法就找到了最优值，其他算法需要在迭代 35 次左右才能收敛。由于在初始化阶段加入了正态分布，得到了相比于原随机初始化更好的种群，减少了适应度差的粒子。改进的学习因子和惯性权重可以更好地平衡局部最优和全局最优解，提高收敛速度。在迭代后期，采用混沌扰动因子，使粒子具有随机性，能够更快地找到全局最优解。

由表 3 可知，改进的免疫粒子群算法优化配置结果为：风力发电机装机容量 170 kW，光伏板装机容量 154 kW，蓄电池容量 68.4 kWh，柴油机 16 台，此时总成本最低，为 316 698 元。相比于基本粒子群算法成本降低了 5.6%，相比于免疫粒子群算法成本降低了 4.6%。

5 结语

针对微电网的容量优化问题，采用改进的免疫粒子群算法，根据气象信息和负荷信息建立分布式电源的数学模型，在不同的约束条件和调度策略下，以分布式电源的数量为变量，以投资总成本最低为优化目标。改进的免疫粒子群算法采用正态分布初始化、非线性学习因子、自适应惯性权重、混沌扰动算子以提高算法的收敛速度和收敛精度。实验结果证明了本文模型的正确性和准确性，并且可以有效提高微电网的经济性，降低投资运行成本，对微电网的投资开发建设具有一定的参考价值。

参考文献：

[1] 于东霞, 张建华, 王晓燕, 等. 并网型风光储互补发电系统容量优化配置[J]. 电力系统及其自动化学报, 2019, 31(10): 59-65.
Yu Dongxia, Zhang Jianhua, Wang Xiaoyan, et al. Optimal capacity configuration of grid-connected wind-PV-storage hybrid power generation system [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2019, 31(10): 59-65. (in Chinese)

[2] 吴克河, 周欢, 刘吉臻. 大规模并网型风光储发电单元容量优化配置方法[J]. 太阳能学报, 2015, 36(12): 2946-2953.
Wu Kehe, Zhou Huan, Liu Jizhen. Capacity allocation optimization method of large scale grid connected wind-PV-battery generation unit [J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2015, 36(12): 2946-2953. (in Chinese)

[3] Du Guangqian, Bekhrad K, Azarikhah P, et al. A hybrid algorithm based optimization on modeling of grid independent biodiesel-based hybrid solar/wind systems [J]. Renewable Energy, 2018, 122: 551-560.

[4] Amrollahi M H, Bathaee S M T. Techno-economic optimization of hybrid photovoltaic/wind generation together with energy storage system in a stand-alone micro-grid subjected to demand response [J]. Applied Energy, 2017, 202: 66-77.

[5] Gupta N. A review on the inclusion of wind generation in power system studies [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 59: 530-543.

[6] 陈景文, 肖妍, 莫瑞瑞, 等. 考虑光伏校正的微电网储能容量优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(10): 59-66.
Chen Jingwen, Xiao Yan, Mo Ruirui, et al. Optimized allocation of microgrid energy storage capacity considering photovoltaic correction [J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(10): 59-66. (in Chinese)

[7] 侯鹏飞, 杨跃文, 徐海东. 同相供电系统混合补偿容量优化分析与设计[J]. 电源学报, 2023, 21(2): 116-128.
Hou Pengfei, Yang Yuewen, Xu Haidong. Optimal analysis and design of hybrid compensation capacity of co-phase power supply system [J]. Journal of Power Supply, 2023, 21(2): 116-128. (in Chinese)

[8] 何思敏, 李伟, 刘立, 等. 基于随机规划的风光柴储容量配比优化方法[J]. 水电与新能源, 2023, 37(2): 74-78.
He Simin, Li Wei, Liu Li, et al. Optimization method for capacity ratio of wind-solar-diesel storage system based on stochastic programming [J]. Hydropower and New Energy, 2023, 37(2): 74-78. (in Chinese)

[9] Jiang Quanyuan, Hong Haisheng. Wavelet-based capacity configuration and coordinated control of hybrid energy storage system for smoothing out wind power fluctuations [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(2):

1363-1372.

[10] Zhao Jingyi, Yuan Xiaofang. Multi-objective optimization of stand-alone hybrid PV-wind-diesel-battery system using improved fruit fly optimization algorithm [J]. Soft Computing, 2016, 20(7): 2841-2853.

[11] Zhang Lei, Tang Yi, Yang Shunfeng, et al. Decoupled power control for a modular-multilevel-converter-based hybrid AC-DC grid integrated with hybrid energy storage [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(4): 2926-2934.

[12] Shen Yongpeng, Li Yuanfeng, Tang Yaohua, et al. An energy management strategy based on fuzzy logic for hybrid energy storage system in electric vehicles [J]. IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering, 2022, 17(1): 53-60.

[13] 方奇文, 刘海鹏, 王蒙, 等. 基于改进离散粒子群算法的风光储容量优化配置[J]. 陕西理工大学学报(自然科学版), 2022, 38(5): 23-31.
Fang Qiwen, Liu Haipeng, Wang Meng, et al. Optimal configuration of wind-solar-storage capacity based on improved discrete particle swarm algorithm [J]. Journal of Shaanxi University of Technology (Natural Science Edution), 2022, 38(5): 23-31. (in Chinese)

[14] 张枫鑫, 叶远茂. 基于改进型粒子群优化算法的非对称级联开关电容多电平逆变器[J]. 电源学报, 2024, 22(6): 51-59.
Zhang Fengxin, Ye Yuanmao. Asymmetric cascaded switched capacitor multi-level inverter based on improved particle swarm optimization algorithm [J]. Journal of Power Supply, 2024, 22(6): 51-59. (in Chinese)

[15] 王仁明, 杨婕, 刘闻仲, 等. 基于改进粒子群算法的 Boost 变换器分数阶 PID 控制设计[J]. 电源学报, 2025, 23(4): 1-9.
Wang Renming, Yang Jie, Liu Wenzhong, et al. Design of fractional-order PID control of Boost converter based on improved particle swarm optimization algorithm [J]. Journal of Power Supply, 2025, 23(4): 1-9. (in Chinese)

[16] Cai Jianghui, Wei Huiling, Yang Haifeng, et al. A novel clustering algorithm based on DPC and PSO [J]. IEEE Access, 2020, 8: 88200-88214.

[17] Wu Tiezhou, Shi Xiao, Liao Li, et al. A capacity configuration control strategy to alleviate power fluctuation of hybrid energy storage system based on improved particle swarm optimization [J]. Energies, 2019, 12(4): 642.

[18] 杨国华, 朱向芬, 马玉娟, 等. 基于改进粒子群算法的混合储能系统容量优化[J]. 电测与仪表, 2015, 52(23): 1-5, 10.
Yang Guohua, Zhu Xiangfen, Ma Yujuan, et al. Capacity optimization of hybrid energy storage based on improved PSO algorithm [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2015, 52(23): 1-5, 10. (in Chinese)

[19] Feng Junhong, Zhang Jie, Zhu Xiaoshu, et al. A novel chaos optimization algorithm [J]. Multimedia Tools and Applications, 2017, 76(16): 17405-17436.

[20] Zhang Yagang, Chen Bing, Zhao Yuan, et al. Wind speed prediction of IPSO-BP neural network based on Lorenz disturbance [J]. IEEE Access, 2018, 6: 53168-53179.

[21] Goudarzi A, Fahad S, Ni Jiahua, et al. A sequential hybridization of ETLBO and IPSO for solving reserve-constrained combined heat, power and economic dispatch problem [J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2022, 16(10): 1930-1949.

[22] Mousavi Y, Alfi A, Kucukdemiral I B. Enhanced fractional chaotic whale optimization algorithm for parameter identification of isolated wind-diesel power systems [J]. IEEE Access, 2020, 8: 140862-140875.



李练兵

作者简介：

李练兵(1972—)，男，中国电源学会会员，博士，教授。研究方向：电力电子。E-mail：lilianbing@hebut.edu.cn。

王兰超(1998—)，男，通信作者，硕士研究生。研究方向：电力电子。E-mail：1914704842@qq.com。

景睿雄(1999—)，男，硕士研究生。研究方向：新能源发电技术。E-mail：1039682098@qq.com。

肖亚泽(1998—)，男，硕士研究生。研究方向：电力电子。E-mail：1771277369@qq.com。

杨少波(1987—)，男，硕士，高级工程师。研究方向：储能技术。E-mail：691218283@qq.com。

(责任编辑：郭凯凯)