

# 基于双鱼群算法的电力系统无功优化

杨 珺<sup>†</sup>, 吴飞业

(东北大学 信息科学与工程学院, 沈阳 110004)

**摘要:** 提出一种基于双鱼群算法的电力系统无功优化方法. 该方法以基本人工鱼群算法为基础, 增加具有捕食行为的凶猛鱼群, 重新定义鱼群的行为方式和寻优过程, 并引入逃离因子以扩大搜索空间. 采用随机尝试次数变化的动态步长以增强双鱼群算法的全局优化能力. 运用线性加权 $\alpha$ 法, 以系统有功网损最低及电压偏差水平最优为目标, 通过罚函数的形式建立无功优化模型. 在无功优化目标函数中引入动态惩罚系数以提高算法的自适应调节能力. 选取基本人工鱼群算法、改进遗传算法及所提出的双鱼群算法分别对IEEE14节点系统进行仿真实验, 结果显示双鱼群算法在计算精度、收敛稳定性等方面均有明显优势, 更切合电力系统运行的实际.

**关键词:** 双鱼群算法; 无功优化; 网损; 罚函数; 电力系统

中图分类号: TM71

文献标志码: A

## Reactive power optimization of power system based on double fish-swarm algorithm

YANG Jun<sup>†</sup>, WU Fei-Ye

(College of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110004, China)

**Abstract:** A double fish-swarm algorithm is proposed to solve reactive power optimization problems in power systems. In this paper, ferocious fish-swarm with the foraging behavior is added in the basic artificial fish-swarm algorithm. The behavior and optimizing process of fish-swarm are redefined. The escape-factor is introduced to expand the search space. For enhancing the global optimization ability of the algorithm, the dynamic step is used in the algorithm, which is changing with a try number. The objective function aims at the minimum of the active power loss and voltage deviation, and the reactive power optimization model is established by using the  $\alpha$  method and penalty function. In the reactive power optimization objective function, the dynamic penalty coefficient is introduced to improve the application ability of the algorithm. Finally, the basic artificial fish-swarm algorithm, the improved genetic algorithm, and the proposed algorithm have been applied to IEEE 14-bus system for testing the effectiveness. The simulation results show that double fish-swarm algorithm has the best optimization effect in terms of computational accuracy and convergence stability, which is much more in line with the actual operation of the power system.

**Keywords:** double fish-swarm algorithm; reactive power optimization; power loss; penalty function; power system

## 0 引言

电力系统无功优化是保证系统可靠、优质运行的有效手段,合理的无功分布可以降低系统网损和改善电压质量等<sup>[1-2]</sup>. 近年来,无功优化模型始终是无功优化领域研究的一个热点问题,建立切合实际的模型是求解无功优化问题的关键. 人们根据工程需求,建立了相应的无功优化模型,其目标函数的选择有多种考虑,如系统网损、电压质量、电压安全稳定、电力市场环境、分布式电源接入以及负荷变化等方面<sup>[3-8]</sup>.

无功优化问题本质上是一类复杂的非线性混合整数规划问题<sup>[9-10]</sup>,保证连续变量与离散变量的合理共存关系是求解该问题的重点. 处理无功优化问题的算法大致可分为两类:一类为经典算法,如线性规划法<sup>[11]</sup>、非线性规划法<sup>[12]</sup>、混合整数规划法<sup>[13]</sup>、内点法<sup>[14]</sup>等,这类方法对模型的要求较高,优化过程相对简单,对于复杂无功优化问题的处理存在较大的局限性;另一类为智能优化算法,如遗传算法<sup>[15]</sup>、模拟退火算法<sup>[16]</sup>、粒子群算法<sup>[17]</sup>、人工鱼群算法<sup>[18-21]</sup>等,智能

收稿日期: 2017-05-05; 修回日期: 2017-08-30.

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金项目(N160404010); 国家自然科学基金项目(61773099, 61433004).

责任编委: 陈家伟.

作者简介: 杨珺(1976—)男,副教授,博士,从事新能源发电及并网优化、智能控制与系统预测等研究; 吴飞业(1992—),男,硕士生,从事电力系统无功优化的研究.

<sup>†</sup>通讯作者. E-mail: yangjun@mail.neu.edu.cn

优化算法在处理复杂的无功优化问题上具有明显优势,寻优效果较好,但此类算法也存在各自的局限性,例如寻优过程复杂、收敛效率较低以及易在非全局极值点处大量聚集<sup>[22]</sup>等,这些不足都会阻碍对无功优化问题的求解。鉴于此,本文提出一种双鱼群算法以求解无功优化问题。在人工鱼群算法的基础上,提出增加具有捕食行为的凶猛鱼群,引入逃离因子并采用随机尝试次数变化的动态步长,从而提高算法的优化精度和效率。以系统网损最低及电压偏差水平最优为目标,引入动态变化的惩罚系数,建立电力系统无功综合优化模型,并通过IEEE14标准节点测试系统进行仿真,检验所提出的双鱼群算法的合理性。

## 1 无功优化模型

### 1.1 目标函数

电力系统无功优化模型是研究无功优化问题的基础,其目标函数的选择有多种考虑,如经济性、安全性、负荷变化和分布式电源接入等。本文以保证系统的网损最低以及电压偏差最小为目标,采用线性加权 $\alpha$ 法,并通过罚函数处理状态变量,确定无功综合优化目标函数为

$$\min F = \alpha_1 P_{\text{loss}} + \alpha_2 \sum \Delta U + \lambda_u \sum_{l=1}^{N_d} \left| \frac{\Delta V_l}{V_{l,\text{max}} - V_{l,\text{min}}} \right|^2 + \lambda_q \sum_{k=1}^{N_g} \left| \frac{\Delta Q_k}{Q_{k,\text{max}} - Q_{k,\text{min}}} \right|^2. \quad (1)$$

$$\Delta V_l = \begin{cases} V_l - V_{l,\text{max}}, & V_l > V_{l,\text{max}}; \\ 0, & V_{l,\text{min}} \leq V_l \leq V_{l,\text{max}}; \\ V_{l,\text{min}} - V_l, & V_l < V_{l,\text{min}}. \end{cases} \quad (2)$$

$$\Delta Q_k = \begin{cases} Q_k - Q_{k,\text{max}}, & Q_k > Q_{k,\text{max}}; \\ 0, & Q_{k,\text{min}} \leq Q_k \leq Q_{k,\text{max}}; \\ Q_{k,\text{min}} - Q_k, & Q_k < Q_{k,\text{min}}. \end{cases} \quad (3)$$

其中: $P_{\text{loss}}$ 表示有功网损, $\sum \Delta U$ 表示节点电压偏差, $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ 分别表示 $P_{\text{loss}}$ 及 $\sum \Delta U$ 的权重系数, $\lambda_u$ 、 $\lambda_q$ 表示状态变量的越界惩罚系数, $N_d$ 、 $N_g$ 分别表示电网中负荷节点总数及发电机总数; $V_{l,\text{max}}$ 、 $V_{l,\text{min}}$ 、 $Q_{k,\text{max}}$ 、 $Q_{k,\text{min}}$ 分别表示节点 $l$ 电压、节点 $k$ 无功出力的上、下限。

### 1.2 约束条件

#### 1.2.1 功率约束方程

功率约束方程,即潮流方程为

$$\begin{cases} P_{Gi} - P_{Li} = V_i \sum_{j=1}^N V_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}), \\ Q_{Gi} + Q_{Ci} - Q_{Li} = \\ V_i \sum_{j=1}^N V_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij}). \end{cases} \quad (4)$$

其中: $i \in N$ , $N$ 为系统总节点数; $P_{Gi}$ 、 $Q_{Gi}$ 分别表示发电机节点 $i$ 有功、无功出力; $P_{Li}$ 、 $Q_{Li}$ 分别为负荷节点 $i$ 的有功和无功负荷功率; $Q_{Ci}$ 为节点 $i$ 的无功补偿容量。

#### 1.2.2 变量约束条件

状态变量的不等式约束为

$$\begin{cases} Q_{Gk,\text{min}} \leq Q_{Gk} \leq Q_{Gk,\text{max}}, \\ V_{Di,\text{min}} \leq V_{Di} \leq V_{Di,\text{max}}; \end{cases} \quad (5)$$

控制变量的不等式约束为

$$\begin{cases} V_{Gk,\text{min}} \leq V_{Gk} \leq V_{Gk,\text{max}}, \\ T_{ti,\text{min}} \leq T_{ti} \leq T_{ti,\text{max}}, \\ Q_{Cl,\text{min}} \leq Q_{Cl} \leq Q_{Cl,\text{max}}. \end{cases} \quad (6)$$

其中: $V_{Gk,\text{max}}$ 、 $V_{Gk,\text{min}}$ 、 $Q_{Cl,\text{max}}$ 、 $Q_{Cl,\text{min}}$ 、 $T_{ti,\text{max}}$ 、 $T_{ti,\text{min}}$ 分别为发电机端电压、无功补偿点容量、可调变压器的档位上、下限。

### 1.3 权重系数及惩罚系数的调整

#### 1.3.1 确定权重系数

采用线性加权 $\alpha$ 法确定 $P_{\text{loss}}$ 及 $\sum \Delta U$ 的权重系数 $\alpha_1$ 和 $\alpha_2$ 。令

$$f_{\text{loss}}^* = \min f_{\text{loss}}(x) = f_{\text{loss}}(x^{(1)}), \quad (7)$$

$$f_{\text{VD}}^* = \min f_{\text{VD}}(x) = f_{\text{VD}}(x^{(2)}). \quad (8)$$

其中: $f_{\text{loss}}(x)$ 为系统有功网损函数, $f_{\text{VD}}$ 为电压偏差函数, $x^{(1)}$ 、 $x^{(2)}$ 分别为以 $f_{\text{loss}}(x)$ 和 $f_{\text{VD}}$ 为目标的最优解。令 $\alpha_1 + \alpha_2 = 1$ ,则有

$$\alpha_1 = \frac{f_{\text{VD}}^* - f_{\text{VD}}^0}{f_{\text{loss}}^* + f_{\text{VD}}^* - f_{\text{loss}}^0 - f_{\text{VD}}^0}, \quad (9)$$

$$\alpha_2 = \frac{f_{\text{loss}}^* - f_{\text{loss}}^0}{f_{\text{loss}}^* + f_{\text{VD}}^* - f_{\text{loss}}^0 - f_{\text{VD}}^0}. \quad (10)$$

其中: $f_{\text{loss}}^0 = f_{\text{loss}}(x^{(2)})$ , $f_{\text{VD}}^0 = f_{\text{VD}}(x^{(1)})$ 。

#### 1.3.2 引入动态调整惩罚系数

采用综合多目标函数时,常以罚函数形式表示约束条件。本文引入动态取值方法,用迭代次数对惩罚系数进行调整, $\lambda_u$ 与 $\lambda_q$ 分别按下式进行动态取值:

$$\lambda_u = \frac{k + K}{K - k + 1}, \quad (11)$$

$$\lambda_q = \frac{k^2}{k + K}, \quad (12)$$

其中  $k$ 、 $K$  分别表示双鱼群算法的当前及最大迭代数。

采用这种动态取值方式的优点是:在双鱼群算法寻优前期,网损  $P_{\text{loss}}$  在目标函数中所占比值较大,而惩罚系数取值较小,可以促进鱼群向  $P_{\text{loss}}$  取值较小的区域移动以加快收敛速度;在双鱼群算法寻优后期,电压与无功越限函数值变差,惩罚系数取值增大,从而更易满足越限要求,提高算法寻优的效率和精度。

## 2 双鱼群算法

为了克服基本鱼群算法(AFSA)<sup>[18]</sup>后期收敛速率较小、寻优效率较低、易在非全局极值点处大量聚集等缺点<sup>[22]</sup>,本文在AFSA的基础上,提出双鱼群算法:引入具有捕食行为的凶猛鱼群,重新定义鱼群的行为方式和寻优过程,并引入逃离因子以扩大搜索空间,采用随尝试次数变化的动态步长,以改善算法的优化效果。

### 2.1 鱼群划分及相关定义

双鱼群算法将鱼群分为两类:凶猛鱼群和小型鱼群。小型鱼群以浮游生物为食,凶猛鱼群以小型鱼及浮游生物为食,这样,凶猛鱼群与小型鱼群之间既存在竞争关系又存在捕食关系。将这种关系运用到算法寻优过程中,能最大化地避免非全局极值点,提高双鱼群算法的优化效率和精度。

小型鱼个体为所需求解问题中欲寻优变量的集合,其状态可表示为向量  $X = [X_1, X_2, \dots, X_k]$ ,其中  $X_i (i = 1, 2, \dots, k)$  为生成小型鱼个体中欲寻优的变量;凶猛鱼个体也为所需求解问题中欲寻优变量的集合,其状态可表示为向量  $W = [W_1, W_2, \dots, W_k]$ ,其中  $W_j (j = 1, 2, \dots, k)$  为生成凶猛鱼个体中欲寻优的变量。

小型鱼个体和凶猛鱼个体的感知范围分别为  $\text{Visual}_s$ 、 $\text{Visual}_b$ ,移动步长分别为  $\text{Step}_s$ 、 $\text{Step}_b$ ,拥挤度因子分别为  $\delta_s$ 、 $\delta_b$ ,尝试总数分别为  $\text{Total}_s$ 、 $\text{Total}_b$ ,当前尝试次数分别为  $t_s$ 、 $t_b$ ,当前迭代数为  $k$ ,最大迭代数为  $K$ 。

### 2.2 小型鱼群行为方式

1) 将小型鱼群行为方式重新划分为觅食、追尾、觅食聚群和防护聚群4种行为方式。

2) 觅食、追尾和觅食聚群的行为方式。这3种行为方式与AFSA中的觅食、追尾以及聚群行为一致,优化过程的动作公式不变。

3) 防护聚群行为。该行为以躲避凶猛鱼群为目的,引入逃离因子  $\lambda$ ,使小型鱼群进行该行为时尽可

能地聚集在距离凶猛鱼群较远的安全位置,即

$$X_{\text{safe}} = \frac{(X_{i1} + X_{i2} + \dots + X_{in}) \times \lambda}{n}. \quad (13)$$

其中:  $X_{\text{safe}}$  为小型鱼个体聚群的安全位置;  $\lambda = (n + p)/n$ ,  $p$  为小型鱼个体感知范围内凶猛鱼个体总数;  $n$  为小型鱼个体当前感知范围内小型鱼个体总数。

按下式执行防护聚群行为:

$$X_{s1} = X_i + \frac{\text{rand}(\cdot) \times \text{Step}_s \times \delta_s \times (X_{\text{safe}} - X_i)}{\|X_{\text{safe}} - X_i\|}. \quad (14)$$

其中:  $X_i$  为小型鱼个体  $i$  当前位置,  $X_{s1}$  为小型鱼个体进行防护聚群行为后的位置,  $\text{rand}(\cdot)$  表示产生  $(0,1)$  间的随机数。

### 2.3 凶猛鱼群行为方式

1) 将凶猛鱼群行为方式重新划分为捕食、追踪和聚群行为。

2) 捕食行为。凶猛鱼个体进行捕食行为时,直接由当前位置跳到小型鱼群中心位置进行捕食,默认小型鱼群中心为凶猛鱼个体的捕食点,即

$$X_{\text{bu}} = \frac{(X_{i1} + X_{i2} + \dots + X_{im})}{m}. \quad (15)$$

其中:  $m$  为凶猛鱼个体感知范围内小型鱼个体总数,  $X_{\text{bu}}$  为凶猛鱼个体捕食点。于是有

$$W_{b1} = X_{\text{bu}}, \quad (16)$$

其中:  $X_{\text{bu}}$  为凶猛鱼个体捕食点,  $W_{b1}$  为凶猛鱼个体执行捕食行为后的位置。

3) 追踪行为。凶猛鱼个体朝着附近小型鱼群体中心位置前进,以便达到食物浓度最大点,并按下式进行追踪行为:

$$W_{b2} = W_i + \frac{\text{rand}(\cdot) \times \text{Step}_b \times \delta_b \times (X_{\text{core}} - W_i)}{\|X_{\text{core}} - W_i\|}. \quad (17)$$

其中:  $W_i$  为凶猛鱼个体当前状态,  $W_{b2}$  为凶猛鱼个体进行追踪行为后的状态。

4) 聚群行为。凶猛鱼个体进行聚群寻找食物,朝着附近凶猛鱼群中心位置前进,有

$$W_{\text{core}} = \frac{(W_1 + W_2 + \dots + W_r)}{r}. \quad (18)$$

其中:  $r$  为凶猛鱼个体当前视野范围内凶猛鱼个体总数,  $W_{\text{core}}$  为凶猛鱼个体当前范围凶猛鱼群中心位置。

聚群行为按下式执行:

$$W_{b3} = W_i + \frac{\text{rand}(\cdot) \times \text{Step}_b \times \delta_b \times (W_{\text{core}} - W_i)}{\|W_{\text{core}} - W_i\|}. \quad (19)$$

其中:  $W_i$  表示凶猛鱼个体当前值,  $W_{b3}$  表示凶猛鱼个体进行聚群行为后的值。

### 2.4 动态步长的选择方式

本文采用随尝试次数变化的动态步长,以小型鱼群执行防护聚群行为为例,说明动态步长的选择方式.

执行防护聚群行为前的小型鱼个体状态及食物浓度分别用  $X$ 、 $FC$  表示,执行防护聚群行为后的小型鱼个体状态及食物浓度分别为  $X_{s1}$ 、 $FC_{s1}$ ,小型鱼群食物浓度变化精度为  $\beta_s$ ,则执行防护聚群行为后的食物浓度变化率为

$$\Delta FC = |FC_{s1} - FC|. \quad (20)$$

按下式确定小型鱼群下一次执行防护聚群行为的移动步长:

$$\text{Step}_{s\_next} = \begin{cases} \text{Step}_s, \Delta FC > \beta_s; \\ \frac{\text{Step}_s}{\sqrt{t_s}}, \Delta FC \leq \beta_s. \end{cases} \quad (21)$$

同理,可确定小型鱼群及凶猛鱼群执行各个行为的动态步长,采用随尝试次数变化的动态步长,可以提高算法的寻优精度并加快其收敛速度.

### 3 双鱼群算法无功优化步骤

将所提出的双鱼群算法运用到无功优化领域,图1给出了双鱼群算法无功优化流程.

**Step 1:** 输入待优化系统的初始状态数据: 各节点信息、支路信息、发电机信息、变压器信息及无功补偿装置信息.

初始化双鱼群算法参数: 小型鱼群体参数以及凶猛鱼群体参数.

**Step 2:** 生成小型鱼个体及凶猛鱼个体. 按下式生成小型鱼个体变量数值:

$$X_i = X_{imin} + \text{rand}(\cdot) \times (X_{imax} - X_{imin}), \quad (22)$$

其中  $X_{imax}$ 、 $X_{imin}$  分别表示控制变量  $X_i$  可变取值的上、下限.

采用  $P$ - $Q$  分解法,对当前产生的小型鱼个体中各控制变量的取值进行潮流检验,若满足潮流收敛,则保存该小型鱼个体,重复 **Step 2**,直至生成  $N_s$  条小型鱼个体.

同理,按小型鱼个体的形成方式,形成  $N_b$  条凶猛鱼个体.

**Step 3:** 初始化公告板. 令人工鱼个体的食物浓度函数为  $FC = 1/F$ ,计算网络初始数据条件下的  $FC$  值,计算  $N_s$  条小型鱼个体以及  $N_b$  条凶猛鱼个体初始状态下的  $FC$  值,选出  $FC$  值最大的鱼个体,并分别记录到公告板  $Y_s$ 、 $Y_b$ .

**Step 4:** 小型鱼群开始行动,通过下式获得第  $i$  条

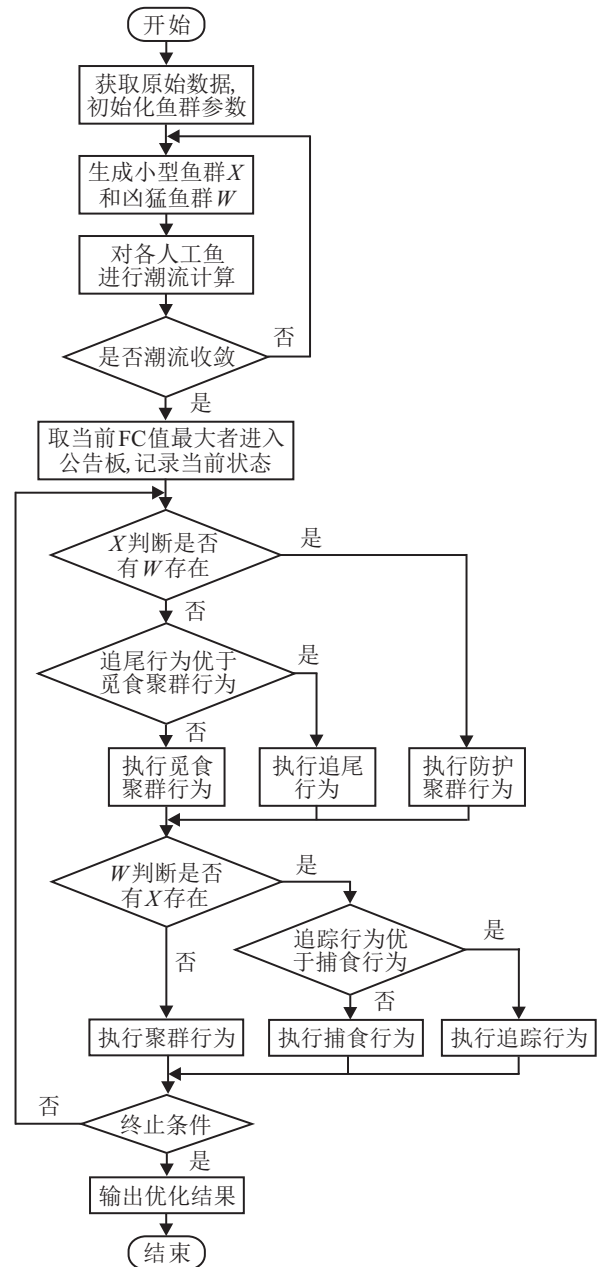


图1 双鱼群算法无功优化流程

小型鱼个体  $X_i$  与凶猛鱼个体  $W_j$  之间的距离:

$$D_{ij} = \|X_i - W_j\|. \quad (23)$$

若  $D_{ij} \leq \text{Visual}_s$ ,则小型鱼个体进行防护聚群行为. 判断执行防护聚群行为后小型鱼个体中控制变量的取值是否满足约束条件和潮流收敛,若同时满足,则记录当前小型鱼个体状态及其对应的  $FC$  值,更新公告板  $Y_s$ ; 否则重新执行 **Step 4**.

若  $D_{ij} > \text{Visual}_s$ ,则小型鱼个体进行觅食聚群行为和追尾行为. 判断执行觅食聚群行为和追尾行为后小型鱼个体中控制变量的取值是否满足约束条件和潮流收敛,若同时满足,则记录当前小型鱼个体状态及其对应的  $FC$  值,更新公告板  $Y_s$ ; 否则重新执行 **Step 4**.

判断小型鱼群是否行动完毕,即若  $t_s \leq Total_s$ , 则重新执行 Step 4; 否则执行 Step 5.

Step 5: 凶猛鱼群开始行动,通过下式获得第  $i$  条凶猛鱼个体  $W_i$  与小型鱼个体  $X_j$  之间的距离:

$$L_{ij} = \|W_i - X_j\|. \quad (24)$$

若  $L_{ij} \leq Visual_b$ , 则凶猛鱼个体进行捕食行为和追踪行为. 判断执行捕食行为和追踪行为后凶猛鱼个体中控制变量的取值是否满足约束条件和潮流收敛,若同时满足,则记录当前凶猛鱼个体状态及其对应的FC值,更新公告板  $Y_b$ ; 否则重新执行 Step 5.

若  $L_{ij} > Visual_b$ , 则执行聚群行为. 判断是否满足约束条件和潮流收敛,若满足约束条件,则记录并更新公告板  $Y_b$ ; 否则,重新执行 Step 5.

判断凶猛鱼群是否行动完毕,即若  $t_b \leq Total_b$ , 则重新执行 Step 5; 否则执行 Step 6.

Step 6: 终止条件判断. 若  $k < K$ , 则  $k = k + 1$ , 执行 Step 4; 若  $k \geq K$ , 则优化程序结束,输出优化结果.

### 4 算例分析

本文采用 Matlab 软件编写基于双鱼群算法电力系统无功优化程序,对典型 IEEE14 节点系统进行仿真实验,并将结果与 AFSA 以及改进遗传算法 (IGA)<sup>[15]</sup> 的结果进行比较,图2为IEEE14节点系统接线图.

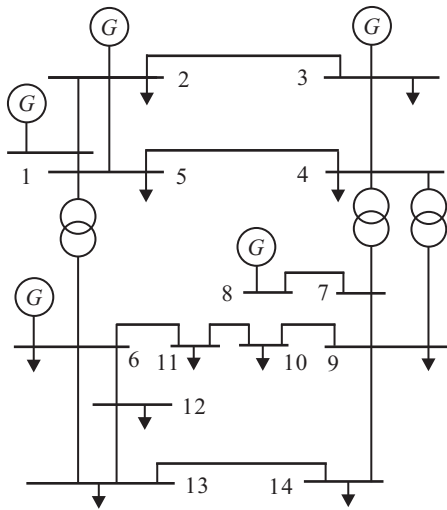


图2 IEEE14节点测试系统

#### 1) 双鱼群算法参数设置.

小型鱼规模  $N_s = 100$ , 感知范围  $Visual_s = 0.025$ , 移动步长  $Step_s = 0.005$ , 拥挤度因子  $\delta_s = 0.618$ , 尝试总数  $Total_s = 30$ ; 凶猛鱼规模  $N_b = 50$ , 凶猛鱼感知范围  $Visual_b = 0.034$ , 移动步长  $Step_b = 0.008$ , 拥挤度因子  $\delta_b = 0.326$ , 尝试总数  $Total_b = 20$ ; 最大迭代次数  $K = 100$ ,  $\lambda_u$ (固定) = 5,  $\lambda_q$ (固定) = 3.

#### 2) 计算结果.

分别采用 AFSA、IGA 及双鱼群算法对 IEEE14 节点测试系统进行 20 次无功优化计算,且双鱼群算法中分别选取固定惩罚系数和动态惩罚系数,并对 20 次平均值计算有功损耗下降率和电压偏差下降率,其有功网损计算结果见表 1, 电压偏差计算结果见表 2.

表 1 有功网损计算结果

$P_{loss}$	初始潮流	AFSA	IGA	双鱼群(固定)	双鱼群(动态)
最小值 /pu	0.1585	0.1501	0.1489	0.1483	0.1479
最大值 /pu	0.1585	0.1557	0.1550	0.1541	0.1533
平均值 /pu	0.1585	0.1526	0.1515	0.1503	0.1491
下降率 /%	0	3.7223	4.4164	5.1735	5.9306

表 2 电压偏差计算结果

电压偏差	初始潮流	AFSA	IGA	双鱼群(固定)	双鱼群(动态)
平均值 /pu	0.358	0.2316	0.2056	0.1905	0.1803
下降率 /%	0	35.31	42.56	46.79	49.63

通过对表 1、表 2 的数据分析可知,采用双鱼群算法进行无功优化后,最大、最小及平均有功网损均较 AFSA、IGA 有较为明显的降低,节点电压也有了明显的改善. 4 种情况下,系统有功网损分别下降了 3.7223%、4.4164%、5.1735% 和 5.9306%, 系统的平均电压偏差分别下降了 35.31%、42.56%、46.79% 和 49.63%. 通过优化数据可以看出,双鱼群算法及动态惩罚系数的引入可以有效地降低系统的有功损耗,并提高系统的电压质量,体现出双鱼群算法较强的寻优能力及收敛能力,使优化结果更加精确.

图 3 为双鱼群算法(动态惩罚系数)与 AFSA、IGA 的无功优化效果比较曲线. 由曲线可见:在迭代计算前期(20 次以前),DFSA 和 IGA 收敛特性均好于 AFSA; 随着寻优过程的不断深入,DFSA 约在 30 次迭代计算后,稳定于最优解附近,而 AFSA 和 IGA 则需约 40 次迭代后,曲线才基本稳定. 从曲线的收敛点可以看出:DFSA 的优化效果好于 AFSA 和 IGA,且收敛速度较快,可以更快地搜索到 IEEE14 节点系统的有功损耗最低点,保证了系统的稳定运行,体现了双鱼群算法的优越性.

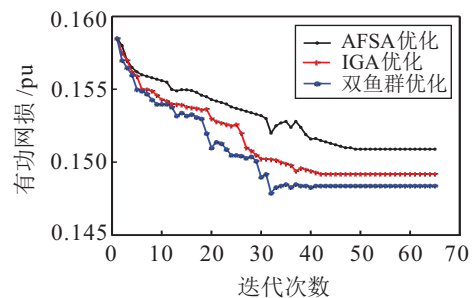


图3 无功优化效果

经算法优化后系统各控制变量取值见表 3, 各节点电压幅值变化见图 4. 通过分析可知, 经双鱼群算法(动态)优化后的系统, 各变量取值均符合约束条件, 且发电机变量取值要高于 AFSA 和 IGA 优化后的系统, 保证系统电压维持在较高水平, 改善了系统的电压质量. 经 3 种算法优化后的 IEEE14 标准节点测试系统, 各节点电压幅值也均在限定范围内, 且经双鱼群算法优化后的节点电压幅值曲线较 AFSA、IGA 更加平稳, 基本稳定在额定电压附近, 且电压偏差较低, 提高了系统的安全性和可靠性.

表 3 节点电压计算结果

变量名称	初始潮流	AFSA	IGA	双鱼群(动态)
$V_{G1}$	1.060	1.060 6	1.065 3	1.070 6
$V_{G2}$	1.045	1.041 4	1.062 2	1.064 4
$V_{G3}$	1.010	1.031 4	1.043 5	1.047 4
$V_{G6}$	1.070	1.061 3	1.070 3	1.071 6
$V_{G8}$	1.090	1.082 0	1.084 1	1.092 2
$T_{4,7}$	0.978	0.979 1	1.025 7	1.049 3
$T_{4,9}$	0.969	1.002 7	1.015 5	1.019 8
$T_{5,6}$	0.932	1.011 5	1.012 4	1.012 7
$Q_{C9}$	0	0.233 6	0.241 4	0.263 9

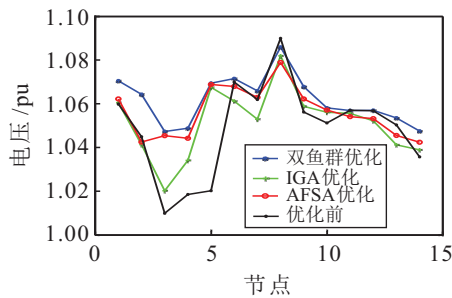


图 4 优化前后节点电压比较

通过上述分析可知, 经双鱼群算法进行无功优化后, 系统的各个指标性能均优于基本人工鱼群算法及改进遗传算法的优化效果, 且该算法表现出较高的寻优效率和精度, 用双鱼群算法处理电力系统无功优化问题可以有效地降低系统的有功损耗并提高系统的电压质量, 从而表明本文方法计算结果是正确和合理的.

## 5 结 论

本文提出了一种基于双鱼群算法的电力系统无功优化方法, 在原 AFSA 中引入具有捕食行为的凶猛鱼群, 重新定义鱼群行为方式及寻优过程, 并采用随尝试次数变化的动态步长, 改善了算法的优化效果. 运用线性加权和法中的  $\alpha$  法, 以网损最低及电压质量最好为目标, 采用罚函数的形式构造了综合无功优化目标函数, 并选取动态惩罚系数以提高无功优化精度. 通过对 IEEE14 节点标准测试系统的仿真结果

进行分析, 得出以下结论:

1) 与基本鱼群算法相比, 凶猛鱼群的加入, 以及捕食行为和逃离因子的引入, 扩大了搜索空间, 使双鱼群算法能更准确、高效地寻找全局最优值, 避免陷入非全局极值点, 提高了算法寻优的收敛速度和精度.

2) 在无功综合优化目标函数中引入动态惩罚系数, 提高了算法在无功优化过程中的调节适用能力, 加快了群体向网损最低区域及电压偏差最小区域的移动速度, 使寻优结果既满足越限要求, 又能高效地收敛到最优值区域, 较大地提高了算法的寻优效率和准确度.

3) 双鱼群算法能大幅度降低系统的有功损耗, 同时保持系统良好的电压水平. 经算例验证, 其优化效果优于所比较的 AFSA、IGA, 可有效地应用于电力系统无功优化.

## 参考文献(References)

[1] 侯煦光. 电力系统最优规划[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1991.  
(Hou X G. Optimal planning in power system[M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 1991.)

[2] 程浩忠, 吴浩. 电力系统无功与电压稳定性[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.  
(Cheng H Z, Wu H. Reactive power and voltage stability of power system[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2004.)

[3] 周冬旭, 李晓明. 面向电力市场的含风电机组配电网无功优化模型及其求解算法[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(4): 24-29.  
(Zhou D X, Li X M. Reactive power optimization model and its algorithms for distribution system with wind farm in electricity market [J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(4): 24-29.)

[4] 李智欢, 李银红, 段献忠. 无功优化多目标模型转换方法的等值线分析[J]. 电工技术学报, 2012, 27(6): 153-160.  
(Li Z H, Li Y H, Duan X Z. Analysis of objective-converting methods in multi-objective reactive power optimization using contour lines[J]. Trans of China Electrotechnical Society, 2012, 27(6): 153-160.)

[5] 刘文学, 梁军, 负志皓, 等. 基于可信理论的多目标模糊机会约束无功优化[J]. 电工技术学报, 2015, 30(21): 82-89.  
(Liu W X, Liang J, Yun Z H, et al. Multi-objective fuzzy chance constrained optimal reactive power flow based on credibility theory[J]. Trans of China Electrotechnical Society, 2015, 30(21): 82-89.)

[6] 程杉, 陈民铀, 黄蕙宸. 含分布式发电的配电网多目标无功优化策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(10): 45-50.

- (Cheng S, Chen M Y, Hang Y C. Multi-objective reactive power optimization of distribution system penetrated with distributed generation[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(10): 45-50.)
- [7] 吕忠, 周强, 蔡雨昌. 含分布式电源的DEIWO算法配电网无功优化[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(4): 69-73.  
(Lv Z, Zhou Q, Cai Y C. Reactive power optimization in distribution network with distributed generation on DEIWO algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(4): 69-73.)
- [8] 韩平平, 张佳琪, 张晓安. 电力市场下含双馈电机风电场的电力系统无功优化[J]. 电网技术, 2017, 41(1): 172-177.  
(Han P P, Zhang J Q, Zhang X A. Reactive power optimization for power system containing DFIG wind farm in electricity market environment[J]. Power System Technology, 2017, 41(1): 172-177.)
- [9] 程新功, 厉吉文, 曹立霞, 等. 基于电网分区的多目标分布式并行无功优化研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(22): 12-18.  
(Cheng X G, Li J W, Cao L X, et al. Multi-objective distributed parallel reactive power optimization based on subarea division of the power systems[J]. Proc of the CSEE, 2013, 33(22): 12-18.)
- [10] 刘明波, 谢敏, 赵维兴. 大电网最优潮流计算[M]. 北京: 科学出版社, 2010.  
(Liu M B, Xie M, Zhao W X. The optimal power flow calculation of large power grid[M]. Beijing: Science Press, 2010.)
- [11] 李玉龙, 宗伟, 秦立军. 电力系统无功优化线性规划问题中线性步长的动态调整策略[J]. 电网技术, 2006, 30(18): 40-44.  
(Li Y L, Zong W, Qin L J. A new strategy of dynamically adjusting step size in linear programming model for power system reactive power optimization[J]. Power Systems Technology, 2006, 30(18): 40-44.)
- [12] Momoh J A, Adapa R, El-Hawary M E. A review of selected optimal power flow literature to 1993, I: Nonlinear and quadratic programming approaches[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1999, 14(1): 96-104.
- [13] 刘一兵, 吴文传, 张伯明, 等. 基于混合整数二阶锥规划的三相有源配电网无功优化[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(15): 58-64.  
(Liu Y B, Wu W C, Zhang B M, et al. Reactive power optimization for three-phase distribution networks with distributed generators based on mixed integer second-order cone programming[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(15): 58-64.)
- [14] 李佳, 刘天琪, 李兴源, 等. 改进粒子群-禁忌搜索算法在多目标无功优化中的应用[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(8): 71-77.  
(Li J, Liu T Q, Li X Y, et al. Application of improved particle swarm-tabu search algorithm in multi-objective reactive power optimization[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(8): 71-77.)
- [15] 崔挺, 孙元章, 徐箭, 等. 基于改进小生境遗传算法的电力系统无功优化[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(19): 43-50.  
(Cui T, Sun Y Z, Xu J, et al. Reactive power optimization of power system based on improved niche genetic algorithm[J]. Proc of the CSEE, 2011, 31(19): 43-50.)
- [16] 刘斌, 姜囡, 井元伟. 基于模拟退火算法的电力系统输电阻塞成本控制[J]. 控制与决策, 2010, 25(8): 1184-1188.  
(Liu B, Jiang N, Jing Y W. Cost control of transmission congestion management in electricity systems based on simulated annealing algorithm[J]. Control and Decision, 2010, 25(8): 1184-1188.)
- [17] 韩敏, 何泳. 基于高斯混沌变异和精英学习的自适应多目标粒子群算法[J]. 控制与决策, 2016, 31(8): 1372-1378.  
(Han M, He Y. Adaptive multi-objective particle swarm optimization with Gaussian chaotic mutation and elite learning[J]. Control and Decision, 2016, 31(8): 1372-1378.)
- [18] 李晓磊. 一种新型的智能优化算法——人工鱼群算法[D]. 杭州: 浙江大学信息科学与工程学院, 2003.  
(Li X L. A new intelligent optimization method—Artificial fish swarm algorithm[D]. Hangzhou: School of Information Science and Engineering, Zhejiang University, 2003.)
- [19] 马建伟, 张国立. 人工鱼群神经网络在电力系统短期负荷预测中的应用[J]. 电网技术, 2005, 29(11): 36-39.  
(Ma J W, Zhang G L. Application of artificial fish-swarm neural network in short-term load forecasting of power system[J]. Power System Technology, 2005, 29(11): 36-39.)
- [20] 聂宏展, 王毕元, 孙金红, 等. 基于混沌人工鱼群算法的输电网规划方法[J]. 电网技术, 2010, 34(12): 109-113.  
(Nie H Z, Wang B Y, Sun J H, et al. Transmission network planning based on chaotic artificial fish swarm algorithm[J]. Power System Technology, 2010, 34(12): 109-113.)
- [21] 唐剑东, 熊信银. 基于人工鱼群算法的电力系统无功优化[J]. 继电器, 2004, 32(19): 9-12.  
(Tang J D, Xiong X Y. Reactive power optimization of power system based on artificial fish-swarm algorithm[J]. Relay, 2004, 32(19): 9-12.)
- [22] 郑华, 刘伟, 张粒子, 等. 基于改进人工鱼群算法的电网可用传输能力计算[J]. 电网技术, 2008, 32(10): 84-88.  
(Zheng H, Liu W, Zhang L Z, et al. Available transfer capability calculation based on modified artificial fish school algorithm[J]. Power System Technology, 2008, 32(10): 84-88.)