

# 基于人工鱼群算法的配电网网架优化规划

程晓荣<sup>1</sup>, 张秋亮<sup>1</sup>, 王智慧<sup>2</sup>, 赵惠兰<sup>1</sup>

(1. 华北电力大学计算机学院, 河北 保定 071003; 2. 西安电子科技大学计算机学院, 陕西 西安 710071)

**摘要:** 人工鱼群算法是一种新型的群智能随机全局优化技术。然而该算法很难得到精确的最优解, 而且算法在收敛性、计算复杂度等方面还有很大的缺陷。针对人工鱼群算法的这些不足, 引入了改进的模拟退火算法和精英选择的思想对人工鱼群算法进行改进。以网络年综合费用最小为优化目标建立了配电网网架规划的数学模型, 并利用改进后的人工鱼群算法求得该模型优化解, 通过对具体实例的仿真实验, 比较了人工鱼群算法改进前后对配电网网架规划进行优化的结果, 同时验证了该方法的可行性和有效性。

**关键词:** 配电网网架规划; 人工鱼群算法; 精英选择; 模拟退火; 优化

## Distribution network structure planning based on AFSA

CHENG Xiao-rong<sup>1</sup>, ZHANG Qiu-liang<sup>1</sup>, WANG Zhi-hui<sup>2</sup>, ZHAO Hui-lan<sup>1</sup>

(1. School of Computer, North China Electric Power University, Baoding 071003, China;

2. Computer Institute, Xidian University, Xi'an 710071, China)

**Abstract:** Artificial fish swarm algorithm(AFSA) is a stochastic global optimization technique proposed lately. But it can't find the accurate optimal solution by using it. Considering its big objection in astringency and computing complicacy, this paper introduces the reformative simulated annealing algorithm and the idea of elitist choice, which can improve on the AFSA by using them. This paper sets up a mathematical model of distribution network structure planning, of which optimal goal is to get the least general charge of year. The solution can be gotten by using the reformative AFSA. In the end, according to the simulational experiment of material instance, this paper compares the result of optimizing the distribution network structure planning by using the reformative AFSA with the result by using AFSA, and the reformative AFSA's feasibility and validity are verified.

**Key words:** distribution network structure planning; artificial fish swarm algorithm; elitist choice; simulated annealing; optimization

中图分类号: TM715 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2007)21-0034-05

## 0 引言

配电网网架优化规划可以减少停电、降低网损、提高供电质量, 是实施配电网自动化的一个重要环节。综合考虑各相关因素, 寻求总体费用最小点, 是配电网网架规划问题研究的关键<sup>[1]</sup>。网架优化是一个非常复杂的大规模组合优化问题。传统的数学规划方法能够从理论上保证规划方案的最优性, 但当网络规模增大时, 就很难求解此类复杂的组合优化问题。近年来, 从自然现象中发现并总结出的许多启发式方法如遗传算法<sup>[2]</sup>(GA)、粒子群算法<sup>[3]</sup>和禁忌搜索算法<sup>[4]</sup>等, 逐步开始应用于网架优化规划

中, 已被证明是非常有效的。但是由于遗传算法速度慢, 粒子群算法易陷入局部最优, 禁忌算法对初始值的依赖性强等原因, 限制了他们在网架规划中的应用。

人工鱼群算法 AFSA (Artificial Fish Swarm Algorithm)<sup>[5,6]</sup>是一种基于模拟鱼群行为的随机搜索优化算法, 文献[5, 6]的计算实例表明该算法具有良好的克服局部极值、取得全局极值的能力。并且该算法还具有对初值、参数选择不敏感、鲁棒性强、简单(只使用目标函数值)、易实现等诸多优点。但是该算法很难得到精确的最优解, 只能比较容易找到满意的解的域, 而且算法在收敛性、计算复杂度等方面还有很大的缺陷。针对算法的这些不足, 本文引入了改进的模拟退火算法和精英选择的思想对

该算法进行改进, 并将改进后的人工鱼群算法应用于配电网网架优化规划中, 取得了较好的效果。

## 1 配电网网架规划的数学模型

### 1.1 目标函数<sup>[3]</sup>

本文中网架优化模型以线路的规划年综合费用最小为目标函数, 包括线路投资费用、折旧维修费用和运行中的年电能损耗费用。目标函数用下式表达

$$\min f(\mathbf{X}) = \sum_{i=1}^n (C_{1i} T_i x_i + C_{2i} \tau_{\max i} \Delta P_i) \quad (1)$$

式中:  $f(\mathbf{X})$  为规划年计算费用, 即目标函数;  $\mathbf{X}$  为  $n$  维决策矢量, 即问题的解,  $\mathbf{X}=(x_1, x_2, \dots, x_n)$  代表规划问题中可选的  $n$  条线路; 等式右边的前一部分为网络投资费用, 其中,  $C_{1i} = \gamma_i + \alpha_i$ ,  $\gamma_i$  是投资回收率,  $\alpha_i$  是设备折旧维修费用率,  $T_i$  为新建线路  $i$  的投资费用,  $x_i$  是矢量  $\mathbf{X}$  的元素, 当待选线路  $i$  被选中时  $x_i=1$ , 否则  $x_i=0$ ; 后一部分为网损费用, 其中,  $C_{2i}$  是单位电价,  $\tau_{\max i}$  是最大负荷利用小时数,  $\Delta P_i$  是线路  $i$  的有功损耗。

### 1.2 约束条件

#### 1) 潮流约束

$$\mathbf{AP}=\mathbf{D} \quad (2)$$

式中:  $\mathbf{A}$  为节点关联弧矩阵;  $\mathbf{P}$  为网络潮流;  $\mathbf{D}$  为负荷需求。

#### 2) 容量约束

$$P_i \leq P_{i\max} \quad (3)$$

式中:  $P_i$  为支路潮流;  $P_{i\max}$  为支路最大允许容量。

#### 3) 电压降落限制

$$\Delta U_{\min} \leq \Delta U_1 \leq \Delta U_{\max} \quad (4)$$

#### 4) 辐射状网络结构约束

其中, 潮流约束可通过基于前推回代法的潮流计算来实现; 容量约束和辐射状约束都通过构造罚函数的方法来实现。这样, 考虑约束条件后的数学模型为

$$\min f(x) = \begin{cases} \sum_{i=1}^n (C_{1i} T_i x_i + C_{2i} \tau_{\max i} \Delta P_i) + A_1 L & \text{辐射网} \\ A_2 & \text{非辐射网} \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $A_1$  是过负荷惩罚系数;  $L$  是网络的过负荷 (即超过线路的最大允许负荷) 的部分, 其数值可以通过网络的负荷潮流求得;  $A_2$  是非辐射网惩罚值,  $A_2$

应该设置得很大以优先淘汰不可行解。

## 2 人工鱼群算法的改进

人工鱼群算法是一种基于模拟鱼群行为的优化算法。算法利用了鱼的觅食、聚群和追尾行为, 从构造单条鱼的行为做起, 通过鱼群中各个体的局部寻优, 达到全局最优。算法具有克服局部极值、取得全局极值的能力, 对搜索空间具有一定的自适应能力。但是该算法很难得到精确的最优解, 只能比较容易找到满意的解的域, 而且算法一般在优化初期具有较快的收敛性, 后期却往往收敛较慢。针对人工鱼群算法的这些不足, 本文尝试引入改进的模拟退火算法和精英选择的思想对该算法进行改进。

### 2.1 精英选择

精英选择<sup>[7]</sup>的思想源于遗传算法的精英策略。精英策略就是在算法的迭代过程中, 从上一代保留优秀的潜在解至下一代的过程, 简单地从上一代中直接拷贝相应的解至下一代是常用的方法。从遗传算法的整个选择策略来看, 精英选择是群体收敛到优化问题最优解的一种基本保障。如果下一代群体的最佳个体适应值小于当前群体最佳个体的适应值, 则将当前群体最佳个体或者适应值大于下一代最佳个体适应值的多个个体直接复制到下一代, 随机替代或替代最差的下一代群体中的相应数量的个体。

### 2.2 改进的模拟退火算法

模拟退火算法 SA (Simulated Annealing)<sup>[9]</sup>是一种随机寻优算法, 其出发点是基于物理退火过程与组合优化之间的相似性<sup>[8]</sup>。SA 还是一种串行优化算法, 具有较强的局部搜索能力, 并能使搜索过程避免陷入局部最优解。但 SA 不适合整个搜索空间, 不能使搜索过程很快进入最有希望的搜索区域, 从而使 SA 算法优化过程较长。为了提高运行的效率, 我们采用低温时 SA, 并对其进行了改进。改进思路是: 在低温下, 对模型扰动进行某种约束, 边扰动边逐步减小模型扰动空间, 快速逼近最优解, 从而提高新模型被接受的机率。改进的具体做法是: 采用较低的初始温度, SA 算法的退火计划, 模型作局部随机扰动—扰动在当前模型周围进行, 目的是在锁定最优解空间后, 使其搜索空间变得较小, 以此来提高模型接受效率。SA 的退火计划将作适当地回火升温, 这样, 如果过程当前模型没有跳出局部极小值, 适当的升温可以使当前模型再一次跳出局部极小值区间, 而使最终解更可靠。退火温度的改进与模型扰动方式的改进, 两者密切相关。改进后的模拟退火算法演变为几乎是概率 1 保优的状

态更新,使得 Metropolis 抽样过程将实现很强的趋化性局部搜索。

### 2.3 基于精英选择算法和改进模拟退火算法的人工鱼群算法

基于本文前面所叙述的思想,利用精英选择的思想可以有效找到精确解,而改进的模拟退火算法具有很强的局部寻优能力,并且能很快收敛。利用这两种算法的优势与人工鱼群算法有机地结合起来。首先,根据精英选择算法的思想,在人工鱼个体进行觅食行为的过程中,人工鱼当前状态为  $X_i$ ,在其可见域内随机选择一个状态  $X_j$ ,当该状态食物浓度大于当前状态时,则向该方向前进一步;反之,则重新随机选择状态  $X_j$ ,判断是否满足前进条件;反复几次后,如果仍不满足前进条件,则随机移动一步,并且用前一个状态得到的最优值替换掉该状态的值;再利用改进后的模拟退火方法局部搜索,对最优解状态的人工鱼个体进行“精确搜索”局部优化,最终得到最佳的近似精确极值。基于精英选择思想和改进模拟退火算法的人工鱼群算法的流程图如图 1 所示。

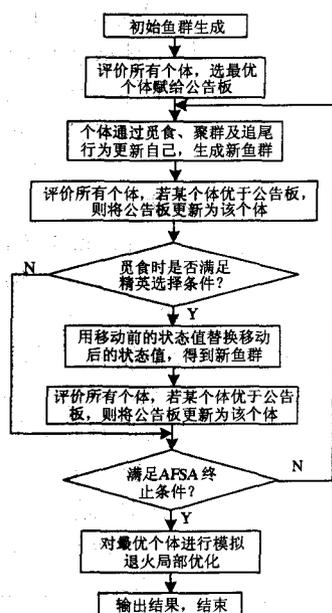


图 1 算法流程图

Fig.1 Flow chart of algorithm

算法的整体步骤如下:

(1) 初始化: 设定人工鱼群的群体规模  $n$ , 最大迭代次数  $max$ , 人工鱼的可视域  $Visual$ , 人工鱼的最大移动步长  $Step$ , 拥挤度因子  $\delta$ , 人工鱼每次移动时最大的试探次数  $Trynumber$ , 退火初始温度  $t_0$ , 温度冷却系数  $c$ , 退火最大迭代次数  $K_{max}$  等参

数。

(2) 在执行觅食行为的过程中, 如果反复试探, 找不到比当前位置更优的解, 则随机向前移动一步, 并且遵循精英选择的原则。

(3) 对满意最优解域进行局部优化: 利用改进后的模拟退火优化算法, 对解进一步局部优化, 产生高精度最终解。

### 3 基于改进人工鱼群算法的配电网网架优化规划

本文中提出的配电网网架规划的数学模型是一个多约束多变量的数学规划模型。问题的规模对于一般计算机求解将显得过大, 在这里采用人工鱼群算法<sup>[5]</sup>的思想, 先分析简化模型得到子系统, 然后对子系统和总模型进行多次模拟运行, 通过算法求解得到配电网网架规划数学模型的最优解。

人工鱼群算法就是应用人工鱼自治体的模式来定义实体, 让他们在问题空间中自主地活动, 从而达到解决问题的目的, 它是一种“邻域搜索”框架。算法从一个(一组)初始解出发在算法参数的控制下通过邻域函数产生若干邻域解, 按接受准则更新当前状态, 然后按参数修改准则调节控制参数, 如此重复以上搜索过程直至算法终止准则满足, 最终得到问题的优化解。搜索方式、邻域函数、状态更新方式、算法参数及其修改方式、算法收敛准则是该算法的核心。

利用改进后的人工鱼群算法来求解配电网网架规划问题, 可按以下步骤进行:

(1) 输入原始数据, 获取节点信息和支路信息, 获得控制变量的个数及各自的取值范围, 获取人工鱼群的群体规模  $N$ , 最大迭代次数  $G_{enmax}$ , 人工鱼的可见域  $Visual$ , 人工鱼的移动步长最大值  $Step$ , 拥挤度因子  $\delta$ , 安全度系数  $A_q$ , 退火初始温度  $t_0$ , 温度冷却系数  $c$ , 退火最大迭代次数  $K_{max}$  等参数。

(2) 当前迭代次数  $G_{en}=0$ , 利用随机数发生器在控制变量可行域内随机生成  $N$  个人工鱼个体, 形成初始鱼群。人工鱼个体的控制变量取值序列为

$$X=[T_{t1}, T_{t2}, \dots, T_{tN}, V_{G1}, V_{G2}, \dots, V_{GN}, Q_{c1},$$

$Q_{c2}, \dots, Q_{cN}]$ , 每个个体按以下方法产生:

① 生成  $N_t+N_g+N_c$  个(设共为  $K$  个)  $[0, 1]$  区间内的随机数, 并根据式(6)计算出控制变量值:

$$X_k = \text{Random}(X_{kmax} - X_{kmin}) + X_{kmin} \quad (6)$$

式中:  $X_k(k=1, 2, \dots, K)$  为控制变量;  $\text{Random}(X_{kmax} - X_{kmin})$  为  $[X_{kmin}, X_{kmax}]$  区间的随机数;  $X_{kmin}$ ,

$X_{kmax}$  为各控制变量的上限及下限。

② 根据各控制变量的取值进行潮流计算, 若收敛, 则保留初始人工鱼个体, 否则转本步①。

③ 已生成  $N$  个人工鱼, 转步骤(3), 否则转本步①。

(3) 计算初始鱼群各个人工鱼个体当前位置的食物浓度值, 并比较大小, 取  $FC$  为最大值者进入公告板, 保存其状态及  $FC$  值。

(4) 各人工鱼分别模拟执行①追尾行为; ②聚群行为; 选择行动后  $FC$  值较大者的行为实际执行, 缺省行为方式为觅食行为。在执行觅食行为的过程中, 如果反复试探, 找不到比当前位置更优的解, 则随机向前移动一步, 并且遵循精英选择的原则。

(5) 各人工鱼每行动一次后, 检验自身状态与公告板状态, 如果优于公告板状态, 则以自身状态取代之。

(6) 中止条件判断: 判断  $G_{en}$  是否已达到预置的最大迭代次数  $G_{enmax}$ , 若是, 则输出计算结果 (即公告板的值), 否则  $G_{en}=G_{en+1}$ , 转步骤(4)。

#### 4 仿真实验

为了便于比较, 本文引用文献[8]中的算例来验证改进后的人工鱼群算法在配电网网架优化规划中应用的可行性和优越性。算例为 16 条支路 10 个节点, 初始网架如图 2 所示, 图中虚线表示待选线路, 实线表示已架线路。

该实验分别运用改进前后的人工鱼群算法对配电网网架规划进行优化, 结果见图 3 和表 1, 将所得结果与文献[3, 10]中粒子群算法、遗传算法所得结果进行比较, 如表 1 所示。实验用 Matlab7.0 编写的仿真程序, 在 AMD 2300 Hz CPU、512 MB DDR 内存的计算机上运行。在实验中, 算法的参数选择分别为: 人工鱼群体规模  $N=50$ , 移动步长  $STEP=0.3$ , 人工鱼的可见域  $VISUAL=1.8$ , 拥挤度因子  $\delta=0.618$ , 安全系数  $A_q=0.9$ , 温度冷却系数  $c=0.85$ , 退火初始温度  $t_0=50$ , 退火最大迭代次数  $K_{max}=15$ 。其中,  $\delta$  越大人工鱼摆脱局部极值的能力就越强, 但收敛的速度会有些减缓, 这主要因为人工鱼在逼近极值的同时, 会因避免过分拥挤而随机走开, 或者受其它人工鱼的排斥作用, 不能精确逼近极值点。 $\delta$  的引入避免了人工鱼过度拥挤而陷入局部极值, 另一方面, 该参数会使得位于极值点附近的人工鱼之间存在相互排斥的影响, 而难以向极值点精确逼近。所以, 本文设定  $\delta$  为 0.618。

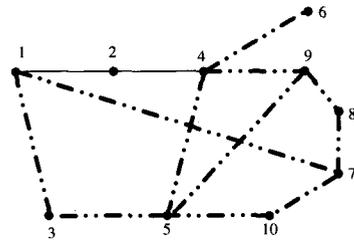


图 2 10 节点系统的初始网架图

Fig.2 Initial network of 10-bus

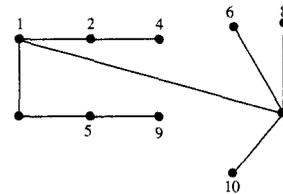


图 3 优化网架图

Fig.3 Optimal network

表 1 IAFSA 同基本 AFSA,GA,PSO 的结果比较

Tab.1 Results comparison of IAFSA,basic AFSA, GA and PSO

算法名称	年综合费用/万元	搜索时间/s
遗传算法 (GA)	107.39	190
粒子群算法 (PSO)	102.35	67.5
基本人工鱼群算法	103.24	73.6
改进的人工鱼群算法	100.37	59.3

实验表明, 使用改进的人工鱼群算法比用基本人工鱼群算法、粒子群算法、遗传算法所得到的结果更优, 而且收敛的稳定性明显提高。改进的人工鱼群算法能很快找到最优解, 且解的精度有很大的提高, 时间复杂度明显降低。

在本文中, 参数的选取可根据实际情况采用试探法。由于从操作参数的意义和优化结果来看它们相互之间比较独立的, 所以可以先假定其他参数固定不变, 研究单一参数的最佳选取值, 然后综合。

#### 5 结论

人工鱼群算法是一种基于模拟鱼群行为的随机搜索优化算法, 是一种全局性优化算法, 使用于求解大规模的组合优化问题。针对 AFSA 在实际应用中出现的问题, 提出了基于精英选择算法和改进模拟退火算法的人工鱼群算法, 改进后的 AFSA 不仅保持了基本 AFSA 简单、易实现的特点, 而且提高了算法的运行效率和求解质量。本文以网络年费用最小为优化目标, 利用改进后的人工鱼群算法对配电网网架进行优化规划。算例表明基于改进人工鱼群

算法的配电网网架优化规划方法是可行和有效的。

### 参考文献

- [1] 郭永基.电力系统可靠性原理和应用[M].北京:清华大学出版社,1986.  
GUO Yong-ji . The Theory and Application of Reliability in Power System [M]. Beijing: Tsinghua University Press,1986 .
- [2] Miranda V, Ranito J V, Proenca L M. Genetic Algorithms in Optimal Multistage Distribution Network Planning[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1994,9(4): 1927-1933.
- [3] 张宪,苑津莎,杨薛明,等.基于粒子群算法的配电网网架规划[J].华北电力大学学报,2006,33(3): 14-17.  
ZHANG Xian,YUAN Jin-sha,YANG Xue-ming, et al.Distribution Network Planning Based on Particle Swarm Optimization[J]. Journal of North China Electric Power University, 2006,33(3):14-17.
- [4] WEN Fu-shuan,Chang C S.Transmission Network Optimal Planning Using the Tabu Search Method[J]. Electric Power Systems Research,1997,42(2):153-163.
- [5] 李晓磊,邵之江,钱积新.一种基于动物自治体的寻优模式:鱼群算法[J].系统工程理论与实践,2002,22: 32-38.  
LI Xiao-lei, SHAO Zhi-jiang, Qian Ji-xin. An Optimizing Method Based on Autonomous Animats: Fish-swarm Algorithm [J].Systems Engineering Theory & Practice, 2002, 22:32-38.
- [6] 李晓磊,钱积新.基于分解协调的人工鱼群优化算法研究[J].电路与系统学报,2003,8(1): 1-6.  
LI Xiao-lei,Qian Ji-xin. Studies on Artificial Fish-swarm Optimization Algorithm Based on Decomposition and Coordination Techniques[J].Journal of Circuits and Systems, 2003,8(1): 1-6.
- [7] Aleksandra B D. Elite Genetic Algorithms with Adaptive Mutations for Solving Continuous Optimization Problems: Application to Modeling of the Optical Constants of Solids[J]. Optics Communications, 1998,151: 147-159.
- [8] 陈华根,李丽华,许惠平,等.改进的非常快速模拟退火算法[J].同济大学学报,2006,34(8): 1121-1125.  
CHEN Hua-gen,LI Li-hua,HU Hui-ping,et al. Modified Very Fast Simulated Annealing Algorithm[J]. Journal of Tongji University, 2006,34(8): 1121-1125.
- [9] 张梅凤,邵诚,甘勇,等.基于变异算子与模拟退火混合的人工鱼群优化算法[J].电子学报,2006,(8):1381-1385.  
ZHANG Mei-feng, SHAO Cheng, GAN Yong, et al.Hybrid Artificial Fish Swarm Optimization Algorithm Based on Mutation Operator and Simulated Annealing[J]. Acta Electronica Sinica,2006,(8): 1381-1385.
- [10] 周玲,王兴念,丁晓群,等.基因禁忌组合算法在配电网网架优化规划中的应用[J].电网技术,1999,23(9): 35-42.  
ZHANG Ling, WANG Xing-nian, DING Xiao-qun, et al. Application of Genetic Algorithm/Tabu Search Combination Algorithm in Distribution Network Structure Planning[J]. Power System Technology, 1999,23(9): 35-42.

收稿日期:2007-05-09; 修回日期:2007-07-05

作者简介:

程晓荣(1963-),女,博士,教授,硕士生导师,主要从事电力线通信和计算机网络的研究与教学工作;

张秋亮(1980-),男,硕士研究生,主要研究方向为计算机网络;E-mail:wisdom306@163.com

王智慧(1980-),女,硕士研究生,主要研究方向为图形图像处理与网络安全。

(上接第33页 continued from page 33)

- [25] YANG Ya-hong, ZHAO Fu-qing, YAO Yun-ping, et al. A PSO and Simulated Annealing Hybrid algorithm to Task Allocation Problem for Harmonic Manufacturing system[A].In: Proceedings of the 6th World Congress on Control and Automation[C]. Dalian(China):2006.67-71.
- [26] 许诺,黄民翔.原对偶内点法与定界法在无功优化中的应用[J].电力系统及其自动化学报,2000,12(3): 26-30.  
XU Nuo,HUANG Min-xiang.Application of Primal-dual Interior Point Method and Branch-bound Method Inreactive Power Optimization[J].Proceedings of the

EPSCA,2000,12(3): 26-30.

收稿日期:2007-03-27; 修回日期:2007-05-22

作者简介:

吴秀华(1970-),女,副教授,博士研究生,主要研究方向为电力系统自动化节能控制,多媒体仿真技术的应用;E-mail:wuxih70@126.com

朴在林(1955-),男,教授,博士生导师,主要研究方向为电力网络规划及其自动化、电网节能控制等。