

种群优化人工鱼群算法在输电网扩展规划的应用

李如琦, 王宗耀, 谢林峰, 褚金胜

(广西大学电气工程学院, 广西 南宁 530004)

摘要: 将遗传算法与人工鱼群算法有机融合, 提出一种种群优化人工鱼群算法, 采用分别对部分人工鱼个体进行选择、交叉、变异操作的策略, 调整优化人工鱼种群结构, 较好地兼顾局部搜索和全局搜索。通过与粒子群算法、基本的人工鱼群算法在 Garver-6 节点、Garver-18 节点和 Garver-24 节点系统仿真计算比较, 证明了种群优化人工鱼群算法的正确性和有效性。

关键词: 输电网扩展规划; 人工鱼群算法; 遗传操作; 种群优化

Population optimization artificial fish school algorithm applied in transmission network expansion planning

LI Ru-qi, WANG Zong-yao, XIE Lin-feng, CHU Jin-sheng

(School of Electrical Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: Combined genetic algorithm with artificial fish school algorithm organically, this paper proposes a population optimization artificial fish school algorithm. Some individual artificial fish are carried out using selection, crossover and mutation operations strategy respectively to adjust and optimize the artificial fish population structure, and gain a better balance between local search and global search. Comparing with particle swarm optimization algorithm and artificial fish school algorithm in simulation results of Garver-6-bus-system, Garver-18-bus-system and Garver-24-bus-system, the correctness and validity of population optimization artificial fish school algorithm have been testified.

Key words: power transmission network planning; artificial fish school algorithm; genetic manipulation; population optimization

中图分类号: TM715 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)23-0011-05

0 引言

输电网扩展规划的任务是在一定的规划期内负荷增长情况及电源规划方案已知的前提下, 确定相应的最佳电网结构, 在满足可靠性约束的同时力求建设费、运行费等费用最小^[1]。目前, 求解输电网规划的主要方法分为三类: 启发式方法、数学优化方法和现代启发式方法^[2]。启发式方法以直观分析为基础, 计算和应用都很方便, 但是无法保证解的最优性。数学优化方法能够从理论上保证规划方案的全局最优, 但是由于输电网扩展规划变量数很多, 约束条件复杂, 兼有离散性、非线性, 所以求解相当复杂, 特别是当网络规模增大时, 往往会出现“维数灾难”。现代启发式方法是运用计算机技术, 模仿某些自然现象的运行机制研究出的优化求解算法, 有遗传算法、禁忌搜索算法、模拟退火算法、蚁群算法、粒子群算法等, 该类算法具有对目标函数和约束函数要求宽松、跳出局部极值的能力较强、

计算效率高等突出优点, 成为近年来研究的热点, 并在应用中取得了很大成效^[3]。

人工鱼群算法^[4]是李晓磊等在本世纪初提出的一种模拟鱼群行为的随机搜索方法, 是群体智能思想的一个具体应用。它的主要特点是不需要了解问题的特殊信息, 只需要对问题进行优劣的比较, 一般整体优化过程的收敛速度较快。但它也存在一些不足: 当一部分人工鱼处于漫无目的的随机移动或人工鱼陷入局部最优时, 收敛速度将大大减慢。遗传算法是Holland教授^[5]首先提出的一类仿生型进化算法, 是一种自适应全局优化概率搜索算法, 具有多路径搜索、隐并行性、随机操作等特点。作为一种较成熟的优化算法, 遗传算法已应用于电力系统规划、运行、故障诊断、潮流计算和控制等诸多领域。本文将遗传算法和人工鱼群算法有机融合, 提出种群优化人工鱼群算法, 通过分别对部分人工鱼个体进行选择、交叉、变异等遗传操作, 在改善人工鱼个体品质的同时, 调整优化人工鱼种群结构,

综合改善局部搜索与全局搜索性能,防止算法陷入局部极值,提高运算的效率和速度。

1 输电网扩展规划的数学模型

输电网规划的目标函数往往考虑经济性要求。在考虑扩建投资和运行成本两项费用下,构造多目标规划的数学模型如下:

$$\min f = \sum_{l \in m_{L1}} k_1 x_l L_l + \sum_{l \in m_{L2}} \tau k_2 r_l P_l^2 \quad (1)$$

$$\text{st} \begin{cases} P_b = B \cdot \theta_b & (b \in m_B) \\ P_i = B_i \cdot \theta_i & (i \in m_{L2}) \\ P_i \leq P_{imax} & (i \in m_{L2}) \end{cases} \quad (2)$$

其中:目标函数第一部分为网络建设投资费用, k_1 为单位长度线路造价; x_i 为第*i*条线路新建回路数; L_i 为第*i*条线路的长度; m_{L1} 为新建线路集合。目标函数第二部分为年网络损耗费用, τ 为第*i*条线路的年损耗小时数; k_2 为单位电价; r_i 为第*i*条线路的电阻; P_b 为电网节点的注入有功功率列向量; B 为正常运行方式下电网节点电纳矩阵; θ_b 为正常运行方式下电网节点电压相角列向量; P_i 为正常运行方式下电网第*i*条线路输送的有功功率; B_i 为正常运行方式下电网第*i*支路电纳; θ_i 为正常运行方式下电网第*i*支路两端相角差; m_{L2} 为所有线路集合。

约束式组(2)中第一项和第二项是采用直流潮流法来求解网络潮流的计算公式, m_B 为电网节点总数。第三项为支路过负荷约束, P_{imax} 表示电网各支路允许通过的最大有功功率。

2 人工鱼群算法

人工鱼群算法是根据生物界的鱼往往能自行或尾随其他鱼找到营养物质多的地方这一特点,通过构造人工鱼来模仿鱼群的觅食、聚群、追尾及随机行为,从而实现寻优。

2.1 人工鱼模型的相关定义

人工鱼个体的状态 $X = (X_1, X_2, \dots, X_n)$, 其中 $X_i (i=1, 2, \dots, n)$ 为寻优变量, 人工鱼当前所在的食物浓度为 $y = f(X)$, $d_{ij} = \|X_i - X_j\|$ 表示人工鱼个体之间的距离, $Visual$ 表示人工鱼的视野范围, $Step$ 表示人工鱼移动步长的最大值, δ 表示拥挤度因子。

2.2 人工鱼的行为描述

觅食行为: 设人工鱼当前状态为 X_i , 在其视野范围内(即 $d_{ij} \leq Visual$) 随机选择一个状态 X_j , 当该状态的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 $Trynumber$ 次后, 如果仍不满足前进条件, 则随机移动一步, 在视野范围内随机选择一个状态 X_j , 目的就是想扩大搜索范围。

聚群行为: 设人工鱼当前状态为 X_i , 在其视野范围内的伙伴数目为 nf , N 为人工鱼总数, 如果 $nf/N < \delta$, 则表明伙伴中心位置 X_c 不太拥挤, 同时, 如果中心位置的食物浓度又大于当前状态的食物浓度则人工鱼向 X_c 位置前进一步; 否则执行觅食行为。

追尾行为: 设人工鱼当前状态为 X_i , 探索其视野范围内最优的一个伙伴 X_{max} , 如果其视野范围内的伙伴数目 nf 满足 $nf/N < \delta$, 同时, 如果 X_{max} 位置的食物浓度又大于当前状态的食物浓度, 则人工鱼向 X_{max} 位置前进一步; 否则执行觅食行为。

公告板: 算法中设置一个公告板, 用以记录最优人工鱼个体位置及该位置的食物浓度值。每条人工鱼的位置状态更新后就将自身当前状态与公告板进行比较, 如果优于公告板上记录的状态则取而代之。

移动策略: 对人工鱼当前所处的环境进行评价, 即模拟执行聚群、追尾行为, 然后选择食物浓度值较高的行为来执行, 缺省行为方式为觅食行为。

3 种群优化人工鱼群算法

人工鱼群算法具有简单、高效、易实现等优点, 但随着优化问题复杂程度和规模的不断扩大, 人们发现该算法也存在一些不足: (1) 当寻优的域较大或处于变化平坦的区域时, 收敛于全局的最优解速度减慢、搜索性能劣化; (2) 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^[6]。针对以上缺点, 文献[7]提出带变异算子的人工鱼群算法, 使收敛速度明显加快, 取得了较好的效果。其改进方法为: 当公告板中的最优人工鱼个体在连续多个迭代过程中没有改变或变化极小时, 则保留历史最优人工鱼个体状态, 将其它人工鱼按一定的概率对小部分维进行变异操作。

与文献[7]做法不同, 本文对人工鱼群算法的改进, 不仅仅针对以上这些缺点, 而是立足于人工鱼群算法与遗传算法的有机融合和优势互补, 同时引

入遗传算法的选择、交叉、变异算子, 分别对部分人工鱼个体进行选择、交叉、变异操作, 在改善人工鱼个体品质的同时, 增加和维持人工鱼种群的多样性, 使一部分人工鱼进行局部搜索, 一部分人工鱼跳出局部极值, 进入其他空间领域搜索新的局部极值, 综合改善局部搜索与全局搜索性能。具体做法为: (1) 引入选择算子, 采取精英保存策略, 实行稳态复制, 直接将选择出来的多个最优个体复制到下一代群体中; (2) 在剩余的人工鱼个体中, 随机抽出一定数目的人工鱼个体, 进行交叉操作; (3) 交叉操作后, 再从剩余的人工鱼个体中随机抽出一定数目的人工鱼个体, 进行变异操作。

由于同时引入了选择、交叉、变异算子, 从而较好地融合了遗传算法的各种优点。本文在改进过程中也发现, 在选择、交叉、变异三种操作中, 交叉操作的效果最为明显。为较好地保存人工鱼群算法的诸多优点, 增加人工鱼个体的多样性, 本文保留了相当数目的人工鱼个体不进行交叉和变异操作。为了优化人工鱼种群结构, 本文合理选取和调整各种操作的人工鱼个体数目, 并在操作中发现, 各种操作的数目控制在一定范围时, 其效果最佳。如交叉操作的数目为4~8对时, 算法的收敛速度最快。通过调整和优化人工鱼种群结构, 较好地兼顾了局部搜索与全局搜索, 使搜索效率与搜索效果达到某种平衡。

4 种群优化人工鱼群算法在输电网规划中的应用

4.1 构造食物浓度函数

食物浓度函数既要体现出电网规划的目标, 即投资和运行费用最小。另外还要满足网络方案的约束条件, 即各线路在正常运行条件下不出现过负荷, 网络不出现解列的现象。因此, 综合以上要求, 再根据前述规划模型, 可构造食物浓度函数如下:

$$F = \begin{cases} \sum_{i \in m_{L1}} k_1 x_i L_i + \sum_{i \in m_{L2}} i k_2 r_i P_i^2 + \\ U(\sum_{i \in m_{L2}} \max(|P_i| - P_{i \max}, 0)) & \text{网络连通} \\ W & \text{网络不连通} \end{cases} \quad (3)$$

网络连通时, F 由新建线路投资、网损和过负荷惩罚3项组成, U 为过负荷惩罚因子。网络不连通时, 则直接给 F 赋一个很大的罚值 W 。

4.2 计算过程

算法设计如下: ①输入输电网相关数据, 根据网络可架线路确定人工鱼条数、最大迭代次数、

视野、步长等; ②随机生成各人工鱼个体, 形成初始鱼群, 鱼群中每条人工鱼代表一个初始方案; ③用直流潮流法计算各自代表网络方案的潮流, 根据潮流计算得到的网损以及由基本建设费用得到的食物浓度函数值, 取最优个体, 并将对应的食物浓度函数值记入公告板; ④各人工鱼分别模拟觅食行为、追尾行为后, 选择食物浓度小的行为实际执行, 省缺行为方式为聚群行为; ⑤各人工鱼执行一次后, 检验自身状态和食物浓度, 并与公告板记录的值进行比较, 如果优于公告板记录的值, 则取而代之; ⑥选出多条最优人工鱼个体, 直接复制到下一代; ⑦在剩余的人工鱼个体中随机选取部分个体, 以最优个体为父本执行交叉操作, 计算新产生的各个体的食物浓度, 与公告板中的值进行比较, 如果比公告板中的值小, 则取而代之, 同时将新个体取代旧个体; ⑧再从剩余的人工鱼个体中随机选取少量个体执行变异操作, 计算各新形成人工鱼的食物浓度, 如果优于公告板中的值, 则以自身值取而代之; 变异操作后剩余的人工鱼个体直接进入下一代; ⑨判断是否达到最大迭代次数, 如达到则输出结果, 否则转步骤③; ⑩输出规划结果。

5 算例分析

本文采用IEEE Garver6节点系统和Garver18节点作为测试算例。计算中取功率基准值100 MW, 单位电价为0.3 元/kWh, 为简化计算, 各线路年损耗小时数均取2 000 h。另外在计算中考虑到资金的时间价值, 需按文献[8]中的公式将新建线路投资费用现值折算成等年值。具体公式如下:

$$A = P \cdot \frac{i \cdot (i + 1)^n}{(1 + i)^n - 1} \quad (4)$$

其中: A 为新建线路每年等额投资; P 为新建线路总投资现值; i 为现金贴现率, 取 10%; n 为支付年限, 取 15 年。用种群优化人工鱼群算法对该系统进行了规划计算。

5.1 IEEE Garver6 节点系统算例

应用Matlab软件, 对Garver6节点分别用种群优化人工鱼群算法、基本人工鱼群算法和粒子群算法编程, 粒子群算法采用文献[9]的改进粒子群算法。如图1所示。

算法参数设置如下: 人工鱼取35条, 视野取2, 觅食时最大尝试收索次数取20, 拥挤度取0.618。上述三种算法都能达到标准算例的全局最优解, 所对应的年架线投资为1 913.3 万元, 年网损运行费用为2 451.2 万元, 其架线方案见表1。

表1 Garver6节点规划方案

Tab.1 Planning scheme of Garver-6 - bus system

路径号	架线回数
2-6	4
3-5	1
4-6	3
5-6	1

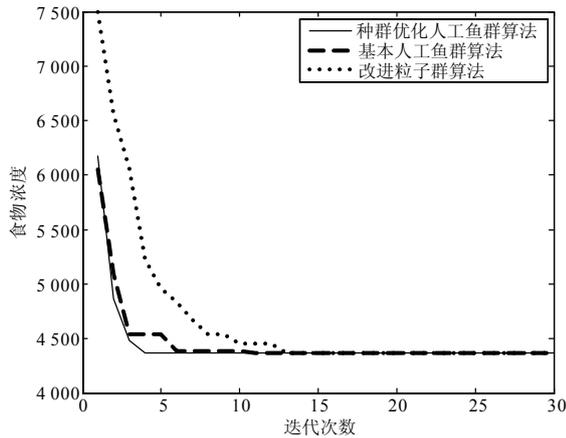


图1 Garver6节点三种算法结果对比

Fig.1 Simulation results comparison of three algorithms on Garver-6-bus-system

5.2 IEEE Garver18 节点系统算例

应用Matlab软件，对Garver18节点同样取三种算法的收敛曲线对比（如图2），人工鱼取60条，视野取4，觅食时最大尝试收索次数取30，拥挤度取0.618。三种算法都能达到标准算例的全局最优解，所对应的年架线投资为10 619 万元，其架线方案见表2。

表2 Garver18节点规划方案

Tab.2 Planning scheme of Garver-18 - bus system

路径号	架线回数	路径号	架线回数
1-11	1	8-9	1
4-16	1	9-10	2
5-12	1	14-15	1
6-13	1	16-17	2
6-14	2	17-18	1
7-8	1		

5.3 IEEE Garver24 节点系统算例

应用 Matlab 软件，对 Garver24 节点同样取三种算法的收敛曲线对比（如图 3），人工鱼取 70 条，视野取 5，觅食时最大尝试收索次数取 30，拥挤度取 0.618。上述三种算法都能达到标准算例的全局最优解，其中种群优化人工鱼群算法的优势更加明显，基本人工鱼群算法的稳定性却变差，有时会陷入局

部最优。其架线方案见表 3。

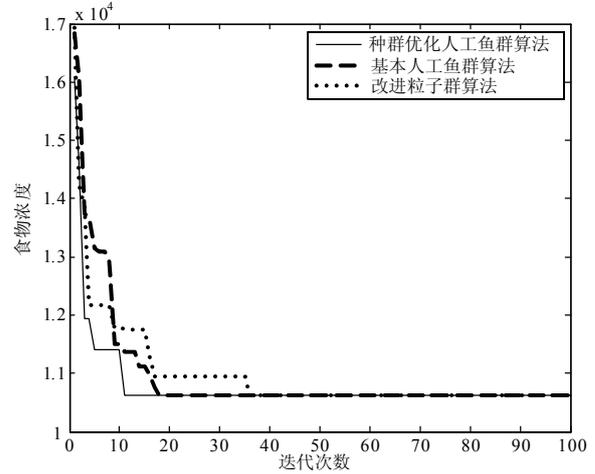


图2 Garver18节点三种算法结果对比

Fig.2 Simulation results comparison of three algorithms on Garver-18-bus-system

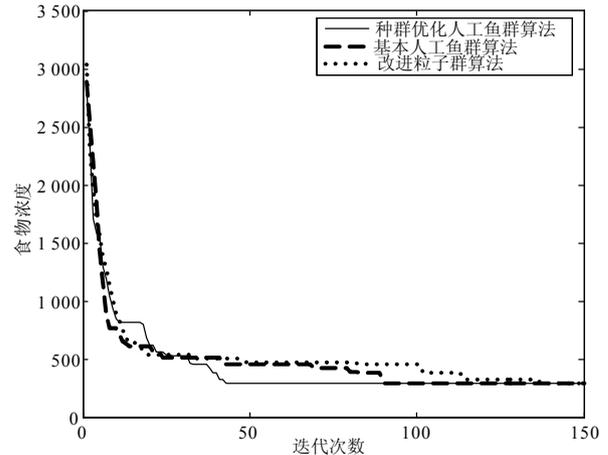


图3 Garver24节点三种算法结果对比

Fig.3 Simulation results comparison of three algorithms on Garver-24-bus-system

表3 Garver24节点规划方案

Tab.3 Planning scheme of Garver-24 - bus system

路径号	架线回数	路径号	架线回数
6-10	1	11-13	1
7-8	2	20-23	1
10-12	1	21-22	1

6 结论

(1) 本文以 Garver-6、Garver-18 和 Garver-24 节点系统为例，对改进粒子群算法、基本人工鱼群算法和种群优化人工鱼群算法进行仿真计算比较。结果表明，基本的人工鱼群算法具有优良的全局收

敛性和较快的收敛速度, 优于改进粒子群算法; 经过改进的种群优化人工鱼群算法, 其收敛速度又显著加快。这些都表明, 人工鱼群算法在输电网扩展规划中具有广阔的应用前景。

(2)人工鱼群算法具有与其他算法有机融合的良好基础。为此, 针对人工鱼群算法的缺点对其改进的同时, 应尽量融合其他算法的优点, 即不仅要克服其缺点, 还应该想办法增加和强化其优点。

(3)对人工鱼群算法的改进, 不一定都要对所有人工鱼个体采用同一种方法进行改进操作。从优化结构入手, 采用不同的方法分别对部分人工鱼个体进行操作的改进策略, 值得进一步探索。

参考文献

- [1] 王锡凡. 电力系统优化规划[M]. 北京: 水利电力出版社, 1990.
WANG Xi-fan. Power system optimization planning[M]. Beijing: Water Conservancy and Electric Power Press, 1990.
- [2] 翟海保, 程浩忠, 陈春霖, 等. 输电网络优化规划研究综述[J]. 电力系统及其自动化学报, 2004, 16 (2): 17-23.
ZHAI Hai-bao, CHENG Hao-zhong, CHEN Chun-lin, et al. Review of transmission network optimal planning[J]. Proceedings of CSU-EPSA, 2004, 16 (2): 17-23.
- [3] 李彤, 王春峰, 王文波, 等. 求解整数规划的一种仿生类全局优化算法[J]. 系统工程理论与实践, 2005, 25 (1): 76-85.
LI Tong, WANG Chun-feng, WANG Wen-bo, et al. A global optimization bionics algorithm for solving integer programming-plant growth simulation algorithm[J]. Systems Engineering Theory & Practice, 2005, 25 (1): 76-85.
- [4] 李晓磊. 一种新型的智能优化方法—人工鱼群算法[D]. 杭州: 浙江大学, 2003.
LI Xiao-lei. A new intelligent optimization method-artificial fish school algorithm[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2003.
- [5] Holland J H. Adaptation in nature and artificial systems[M]. MIT Press, 1962.
- [6] 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, 34(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, 34 (8): 1381-1385.
- [7] 张梅凤. 人工鱼群智能优化算法的改进及应用研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2008.
ZHANG Mei-feng. Research on the modified artificial fish swarm optimization algorithm and its applications[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2008.
- [8] 程浩忠, 张焰, 严正. 电力系统规划[M]. 北京: 中国电力出版社, 2008.
CHEN Hao-zhong, ZHANG Yan, YAN Zheng. Power system planning[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2008.
- [9] 李如琦, 周媛媛. 基于改进粒子群算法的输电网扩展规划[J]. 昆明理工大学学报: 理工版, 2009, 34 (1): 82-86.
LI Ru-qi, ZHOU Yuan-yuan. Planning of power transmission network expansion based on improved particle swarm optimization algorithm[J]. Journal of Kunming University of Science and Technology: Science and Technology, 2009, 34 (1): 82-86.

收稿日期: 2009-11-23; 修回日期: 2010-03-20

作者简介:

李如琦 (1959-), 女, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为电力系统规划、负荷预测、电力系统分析与计算; E-mail: liruqi59@gxu.edu.cn

王宗耀 (1981-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统负荷预测的理论与电力系统规划;

谢林峰 (1982-), 男, 硕士研究生, 研究方向为地方电力系统、电网规划。