

基于混沌人工鱼群算法的输电网规划方法

聂宏展¹, 王毕元¹, 孙金红², 马元生²

(1. 东北电力大学 电气工程学院, 吉林省 吉林市 132012; 2. 营口供电公司, 辽宁省 营口市 115002)

Transmission Network Planning Based on Chaotic Artificial Fish Swarm Algorithm

NIE Hongzhan¹, WANG Biyuan¹, SUN Jinhong², MA Yuansheng²

(1. School of Electrical Engineering, Northeast Dianli University, Jilin 132012, Jilin Province, China;

2. Yingkou Power Supply Company, Yingkou 115002, Liaoning Province, China)

ABSTRACT: Artificial fish swarm algorithm can rapidly converge, but there is the defect of premature convergence; although chaotic optimization algorithm possesses strong searching capability due to its features of ergodicity, randomness and sensitivity to initial value, however it converges slowly. At present large-scale transmission network planning method put a higher and higher demand on solution speed, to meet this demand a chaotic artificial fish swarm algorithm suitable for transmission planning is proposed by integrating artificial fish swarm algorithm with chaotic optimization algorithm, the proposed algorithm inherits the feature of chaotic optimization algorithm, thus during the searching process the artificial fish swarm can escape from local extremum, meanwhile both visual field and swimming step of artificial fish swarm are improved, so the search efficiency is speeded up. The feasibility of the proposed algorithm is verified by calculation results of an 18-bus system and Brazilian South 46-bus system.

KEY WORDS: transmission network expansion planning; artificial fish swarm algorithm (AFSA); chaotic optimization algorithm (COA); chaotic artificial fish swarm algorithm (CAFSA)

摘要: 人工鱼群算法收敛速度快, 但存在早熟收敛现象; 混沌优化算法具有遍历性、随机性和对初值敏感的特点, 虽然全局搜索能力强, 但收敛速度慢。大规模输电网规划方法对求解速度的要求越来越高, 为此结合人工鱼群算法和混沌优化算法, 提出了适用于输电网规划的混沌人工鱼群算法, 该算法继承了混沌优化算法特点, 使人工鱼群在搜索过程中避免陷入局部极值, 同时改进了人工鱼的视野和游动步长, 加快了寻优效率。算例结果验证了该算法的可行性。

关键词: 输电网规划; 人工鱼群算法; 混沌优化算法; 混沌人工鱼群算法

0 引言

输电网规划是电力系统规划的重要组成部分, 通过规划期间的负荷增长及电源规划方案确定最佳电网结构, 以实现经济可靠输送电能的目标^[1]。

输电网规划方案的优劣直接影响电力系统运行的经济性和安全性, 甚至影响人民日常生活和国家经济发展。

随着国民经济快速发展, 各部门对电能的需求不断提高, 电力系统需扩大规模, 电网节点数目及复杂性也随之增加。传统的数学优化方法只适用于解决小规模输电网规划问题, 无法很好解决节点多的复杂输电网规划问题。近些年, 随着运筹学和人工智能学的快速发展, 很多新型优化方法(如遗传算法^[2-3]、蚁群算法^[4]、人工鱼群算法(artificial fish swarm algorithm, AFSA)^[5]、粒子群算法^[6-8]、模拟植物生长算法^[9]等)相继出现, 该类算法各有所长, 但目的都在力求保证全局最优解的基础上进行快速搜索。在该类算法基础上出现了混合算法, 如文献[10]的混合人工鱼群算法, 但该算法利用模拟退火算法的概率性来控制区域跳跃, 增加了寻优的随机性, 无法保证每次的求解质量。

AFSA 利用鱼群的并行搜索方法进行快速寻优, 在输电网规划方面取得了一定成绩, 但该算法存在早熟收敛现象。混沌优化算法(chaotic optimization algorithm, COA)^[11]利用自身的随机性、遍历性和对初值的敏感性特点进行寻优, 具有很强的局部跳跃能力和全局搜索能力^[12-13]。在以上2种算法的基础上, 本文提出用于输电网规划的混沌人工鱼群算法(chaotic artificial fish swarm algorithm, CAFSA), 该混合算法能够避免未成熟收敛情况, 继承了混沌法的遍历性且计算速度快。

1 输电网规划数学模型

静态输电网规划只考虑最终水平年的规划方案, 而未考虑逐年的过渡建设情况。本文以输电网

扩建线路投资费用和输电网线路运行费用为目标函数，扩展后的输电网结构必须是连通的^[14]，网络潮流采用直流潮流方法计算。目标函数为

$$\min Y = \sum_{k=1}^n K_1 x_k + \sum_{k=1}^m K_2 r_k P_k^2 + K_3 W \quad (1)$$

约束条件为

$$B\theta + P_L = P_G \quad (2)$$

$$|B_1 A \theta| \leq P_{\max} \quad (3)$$

$$0 \leq x_k \leq x_{k \max} \quad (4)$$

式中： F 为年费用，包括建设费用和运行费用； K_1 为每 km 新建线路的投资费用； x_k 为第 k 条新建线路的长度； n 为允许新建的输电线路数； K_2 为年网损费用系数； r_k 为支路 k 的电阻； P_k 为正常运行情况下支路 k 输送的有功功率； m 为所有线路的输电走廊数； B 为系统节点导纳矩阵； θ 为节点电压相位向量； P_{\max} 为线路传输功率上限向量； P_L 为负荷向量； P_G 为发电机出力向量； B_1 为由各支路导纳组成的对角矩阵； A 为系统关联矩阵； $x_{k \max}$ 为第 k 条新增线路长度的上限； K_3 为惩罚系数； W 为总过负荷量

$$W = \sum_{k \in \Omega} (|P_k| - P_{k \max}) \quad (5)$$

式中： $P_{k \max}$ 为线路 k 的传输功率上限； Ω 为过负荷线路集合。在目标函数中加入过负荷罚函数可以使规划方案有冗余，不会有过负荷现象。

2 混沌人工鱼群算法

2.1 混沌优化算法

COA 为随机优化算法，该算法利用 Logistic 映射进行搜索，由于此映射既为满映射也为单映射，可使混沌序列能够不重复地经历一定范围内的所有状态，即搜索最优过程中具有遍历性的特点。COA 的遍历性特点可作为搜索过程中避免陷入局部极小的一种优化机制，同时该算法还具有随机性和对初值敏感性的特点。COA 寻优步骤为：

1) 随机产生一组混沌变量 $z_k = \{z_{k,1}, z_{k,2}, \dots, z_{k,n}\}$ ，其元素取值范围为(0,1)区间，且不为 0.25、0.5、0.75。 k 为寻优迭代次数，初始时设为 1， n 为决策变量个数，同时设置迭代控制标志 k_{\max} 。

2) 优化变量为 x_k ， $x_k = \{x_{k,1}, x_{k,2}, \dots, x_{k,n}\}$ 。若 $z_{k,i} \geq 0.5$ ，则令 $x_{k,i} = 1$ ，否则 $x_{k,i} = 0$ 。电网规划中， $x_{k,i} = 0$ 代表某走廊不需新建线路， $x_{k,i} = 1$ 代表某走廊需新建线路。计算 x_k 的目标函数 Y^* ，并将 Y^* 设为最优目标函数。

3) 通过 Logistic 方程进行变量迭代， $z_{k+1,i} = \mu z_{k,i}(1 - z_{k,i})$ ， $\mu = 4$ ，此方程为满映射，寻优具有遍历性。 z_k 更新完毕后，通过步骤 2) 求解 x_{k+1} 及 $Y(x_{k+1})$ 。

4) 比较 Y^* 和 $Y(x_{k+1})$ ，选择其中的最小值赋给 Y^* ，并将此时的优化变量赋给最优解 x^* ，令 $k = k + 1$ 。

5) 若 $k < k_{\max}$ ，执行步骤 3)；否则终止寻优，输出最优解 x^* 和最优目标函数 Y^* 。

COA 寻优只是利用满映射来完成，虽然具有很强的全局性，但搜索目的性不强，对局部最优无法灵活地进行邻域细搜索，而往往最优值就在邻域内，因此该算法寻优效率不高，具有一定的盲目性。

2.2 人工鱼群算法

AFSA 通过个体行为和群体协作对食物进行搜索，鱼群之间通过视觉和嗅觉互相传递食物浓度信息。当某条鱼发现某位置(即区域次优位置)有很高的食物浓度时，它会将信息传递给周边其它鱼，而区域最优位置往往就在次优位置附近，因而会被快速发现。

AFSA 将最优位置即最优解计入公告板，公告板用以记录最优位置和该位置的食物浓度。公告板可保留一个最优解，还可保留若干个次优解。AFSA 模仿的鱼群行为有：聚群行为、追尾行为、觅食行为^[15]。

2.3 混沌人工鱼群算法

AFSA 中，某鱼群寻到区域最优位置时，其它鱼群也会被吸引至该位置，则大量鱼群会聚集在该区域进行觅食。若该位置出现多次原地的觅食行为，则认为该区域是全局最优区域，区域最优解为全局最优解。但该方法有可能错失真正的全局最优解，为此将觅食行为进行混沌优化，并将每条鱼进行混沌序列编号，确保随时跟踪导航鱼游动的位置。混沌优化的遍历性特点可以作为人工鱼搜索过程中避免陷入局部极小的一种有效机制，此特点使人工鱼具有很强的全局性，但又不失本身寻优的灵活性，从而兼顾了全局收敛性和灵活性。同时人工鱼群也具有了混沌优化的所有特点，对初值敏感的特点可以使人工鱼群的搜索轨迹各不相同，多样化的搜索路径提高了全局搜索效率。

CAFSA 具体步骤为。

1) 初始化混沌人工鱼位置，设置 k_{\max} ，并令 $k = 1$ 。

2) 混沌人工鱼执行聚群行为。将每条人工鱼

赋予不同的混沌序列值，若某条人工鱼视野范围内的鱼群中心位置有很大的食物浓度，并且鱼群不拥挤，则该人工鱼向此处游去，并更新自身的混沌值，否则执行步骤 3)。

3) 混沌人工鱼执行追尾行为。若某条人工鱼的视野范围内有一个伙伴，该伙伴的食物浓度高于自己，并且伙伴周围不拥挤，则该条人工鱼向伙伴游去，并更新自己的混沌值，否则执行步骤 4)。

4) 混沌人工鱼执行觅食行为。当聚群和追尾行为都不执行时则进行觅食行为，人工鱼觅食并非随机寻找食物，其在视野范围内搜索比当前位置更好的觅食地点，该行为带有混沌运动特性，混乱而有序，将该行为混沌化的具体步骤为：

①如果人工鱼觅食尝试次数 t 小于人工鱼觅食最大尝试次数 t_{prey} ，则转②，否则执行步骤 5)。

②人工鱼在当前视野范围内尝试觅食，当前食物浓度为 Y ，将混沌变量转化为优化变量 x_k ，如果 $Y < Y(x_k)$ ，则执行觅食，否则执行③。

③更新尝试次数 $t=t+1$ ，执行①。

5) 若混沌人工鱼在若干次行为中没有游动，则将该人工鱼进行混沌变异，利用 Logistic 方程更新混沌变量，并令 $k=k+1$ ，若 $k < k_{max}$ ，执行步骤 2)，否则终止寻优，输出最优解。

CAFSA 虽然通过鱼群协作具有局部细化搜索能力，但其寻优效率不是很理想，为此做如下改进：

1) 将每条人工鱼的位置用 0~1 之间小数表示，以精确描述鱼的位置和伙伴的中心位置，提高聚群精度。

2) 将人工鱼行为混沌化后，人工鱼无觅食的随机游走行为并非随意行为，而是具有混沌特性的行为。混沌化游走可避免重复搜索，提高寻优效率同时还可跳出局部极值。

3) 将人工鱼的视野范围进行梯度化设置，实行自适应自反馈机制，视野范围会随着食物浓度的增加而逐渐减小，避免单一视野范围影响全局最优的质量或寻优时间。

4) 将人工鱼游动步长进行梯度化设置，步长会随着视野范围的变化而变化，可有效避免步长过大导致后期寻优不够细致错过最优值或步长过小阻碍人工鱼在区域间的游动，进而提高搜索效率。

改进后混沌人工鱼群算法流程见图 1 所示。人工鱼位置的食物浓度决定规划方案的优劣，食物浓

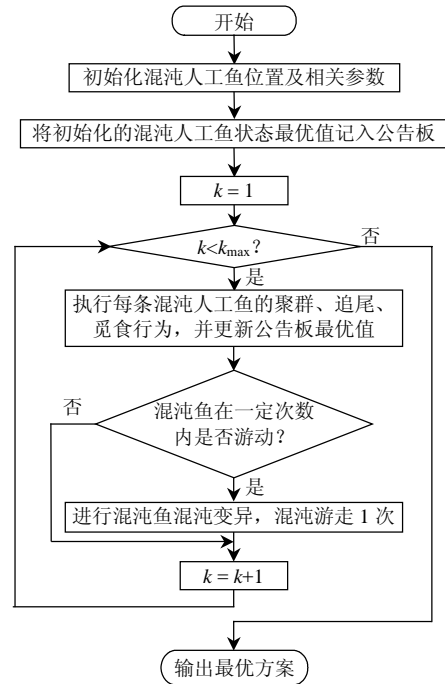


图 1 CAFSA 流程

Fig. 1 Flow chart of CAFSA

度越高规划方案越优。

3 算例分析

3.1 算例 1

本算例为 18 节点系统，网络结构及相关参数参见文献[1]，该系统有 32 条待选输电线路。令混沌人工鱼条数 $n=18$ ，视野 $v=\{2, 4, 6, 8\}$ ，移动步长 $L=\{1, 3, 5, 8\}$ ，拥挤度 $\delta=0.35$ ，控制迭代次数 $k_{max}=200$ ，觅食尝试次数 $t_{prey}=3$ 。应用 CAFSA 所得规划结果如图 2 所示，与文献[1]中所得结果相同。CAFSA、AFSA 和 COA 计算结果比较情况见表 1。

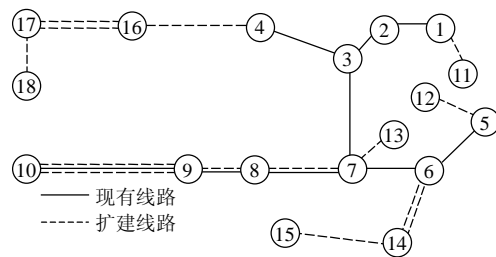


图 2 CAFSA 规划结果

Fig. 2 Topology result by CAFSA

表 1 CAFSA、AFSA 和 COA 计算结果比较
Tab. 1 Comparison of results among CAFSA, AFSA and COA

算法	平均迭代次数	平均求解时间/s	试验 50 次搜索到最优解次数
AFSA	38	19.3	42
COA	274	41.0	50
CAFSA	9	5.8	50

由表 1 可知, COA 迭代次数多, 寻优时间长, 但每次搜索都能寻到最优解; AFSA 迭代次数和寻优时间均适中, 但不能每次都可以寻到最优解, 会在较优区域聚群和觅食, 随着鱼儿越聚越多, 该区域会被误认为全局最优区域从而无法继续寻优。CAFSA 在寻优速度和寻优质量上是最理想的, 充分继承了 COA 和 AFSA 的优点, 通过鱼群的并行协作快速穿梭各个区域, 能很快找到全局最优区域, 进而鱼群大量聚集找到最优觅食地点, 即实现最优规划方案。

图 3 为 CAFSA、AFSA 和 COA 的收敛性曲线。由图 3 可知, COA 收敛轨迹比较平缓, 迭代 150 次也没有最终收敛, 但其搜索轨迹呈阶梯状, 最终会寻到全局最优值; AFSA 开始阶段搜索速度比较快, 迭代 16 次后进入较优区域, 并在 38 次才跳出较优区域寻到全局最优值, 该段区域鱼儿很容易大量聚群, 将局部最优值误认为全局最优值, 出现早熟收敛现象; CAFSA 的收敛轨迹几乎呈直线形, 没有过多的重复搜索, 具有很高的搜索效率, 可以在最短时间和最少迭代次数下寻到全局最优值, 这样快速而准确的寻优特点满足了大规模输电网规划要求。

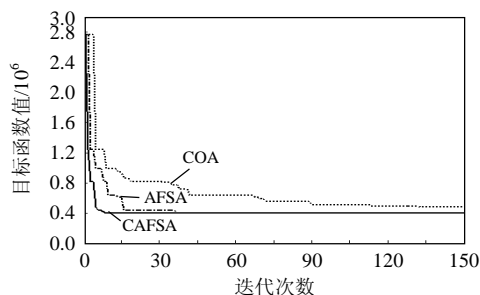


图 3 CAFSA、AFSA 和 COA 的收敛曲线
Fig. 3 Convergence curves of CAFSA, AFSA and COA

3.2 算例 2

本算例采用巴西南部 46 节点系统, 该系统现有输电线路 47 条, 待选输电线路 79 条。令混沌人工鱼条数 $n=35$, 视野向量 $v=\{2, 5, 9, 11\}$, 移动步长向量 $L=\{1, 3, 5, 8\}$, 拥挤度 $\delta=0.35$, 控制迭代次数 $k_{\max}=200$, 觅食尝试次数 $t_{\text{prey}}=3$ 。应用 CAFSA 所得规划结果如表 2 所示, 该结果与文献[6]一致。

该系统由于忽略线路电阻, 目标函数不需考虑运行成本, 降低了规划模型的复杂性, 提高了计算效率。

求解过程中, 平均迭代次数为 31, 平均计算时间为 139 s, 最优方案总投资为 18.800 5 亿元。在大

表 2 46 节点系统优化方案

Tab. 2 Optimal planning scheme for 46-bus system

输电走廊序号	相同数目	输电走廊序号	相同数目
2-3	1	24-25	2
5-6	2	26-29	3
5-11	1	28-30	1
6-46	1	29-30	2
9-10	1	31-32	1
14-15	1	40-41	1
19-25	1	42-43	2
20-21	1		

规模输电网规划中, CAFSA 在收敛性能和求解速度方面都具有明显优势, 而 COA 面对“组合爆炸”的大规模输电网规划往往束手无策。

4 结论

1) 本文在 COA 和 AFSA 基础上提出了 CAFSA, 该算法充分发挥了原有 2 种算法优势, 通过混沌特性控制人工鱼的全局搜索和局部细搜索过程, 使该算法具有良好的全局和局部收敛性。

2) 本文算法对人工鱼的视野范围和游动步长进行了梯度化改进, 提高了寻优效率。

3) 本文只考虑了静态输电网规划问题, 下一步需将该算法应用于大规模多阶段的输电网规划中, 以验证其应用于该问题的可行性。

致谢

本文得到了东北电力大学研究生创新基金的资助, 谨此致谢。

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: 268-283.
- [2] 王秀丽, 王锡凡. 遗传算法在输电系统规划中的应用[J]. 西安交通大学学报, 1995, 29(8): 1-9.
Wang Xiuli, Wang Xifan. Transmission system planning with genetic algorithm[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 1995, 29(8): 1-9(in Chinese).
- [3] 王秀丽, 陈皓勇, 王锡凡, 等. 基于非支配遗传算法及协同进化算法的多目标多区域电网规划[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(12): 11-15.
Wang Xiuli, Chen Haoyong, Wang Xifan, et al. Multi-objective and multi-district transmission planning based on NSGA-II and cooperative co-evolutionary algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(12): 11-15(in Chinese).
- [4] 翟海保, 程浩忠, 吕干云, 等. 多阶段输电网络最优规划的并行蚁群算法[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(20): 37-42.
Zhai Haibao, Cheng Haozhong, Lü Ganyun, et al. Parallel ant colony algorithm for the multistage transmission network optimal planning [J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(20): 37-42(in Chinese).
- [5] 吴杰, 刘健, 卢志刚, 等. 适用于输电网网架规划的人工鱼群算

- 法[J]. 电网技术, 2007, 31(18): 63-67.
- Wu Jie, Liu Jian, Lu Zhigang, et al. Artificial fish swarm algorithm suitable to transmission network planning[J]. Power System Technology, 2007, 31(18): 63-67(in Chinese).
- [6] 金义雄, 程浩忠. 改进粒子群算法及其在输电网规划的应用[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(4): 46-50.
- Jin Yixiong, Cheng Haozhong. Improved particle swarm optimization method and its application in power transmission network planning [J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(4): 46-50(in Chinese).
- [7] 高飞, 童恒庆. 基于改进粒子群优化算法的混沌系统参数估计方法[J]. 物理学报, 2006, 55(2): 577-582.
- Gao Fei, Tong Hengqing. An approach of parameter estimation for a chaotic system based on genetic algorithm[J]. Acta Physica Sinica, 2006, 55(2): 577-582(in Chinese).
- [8] 金义雄, 程浩忠. 计及阻塞管理及剩余容量的并行粒子群电网规划方法[J]. 电网技术, 2005, 29(23): 18-23.
- Jin Yixiong, Cheng Haozhong. Parallel particle swarm optimization on power transmission network planning taking account of congestion management and residual capacity[J]. Power System Technology, 2005, 29(23): 18-23(in Chinese).
- [9] 王淳, 程浩忠. 模拟植物生长算法及其在输电网规划中的应用[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(7): 24-28.
- Wang Chun, Cheng Haozhong. A plant growth simulation algorithm and its application in power transmission network planning[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(7): 24-28(in Chinese).
- [10] 聂宏展, 乔怡, 吕盼. 基于混合人工鱼群算法的输电网络规划[J]. 电网技术, 2009, 33(2): 78-83.
- Nie Hongzhan, Qiao Yi, Lü Pan. Transmission network planning based on hybrid artificial fish school algorithm[J]. Power System Technology, 2009, 33(2): 78-83(in Chinese).
- [11] 王凌, 郑大钟, 李清生. 混沌优化算法的研究进展[J]. 计算技术与自动化, 2001, 20(1): 1-5.
- Wang Ling, Zheng Dazhong, Li Qingsheng. Survey on chaotic optimization methods[J]. Computing Technology and Automation, 2001, 20(1): 1-5(in Chinese).
- [12] 刘自发, 葛少云, 余贻鑫. 一种混合智能算法在配电网网络重构中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(15): 73-78.
- Liu Zifa, Ge Shaoyun, Yu Yixin. A hybrid intelligent algorithm for loss minimum reconfiguration in distribution networks[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(15): 73-78(in Chinese).
- [13] 王春娟, 张伏生, 王帅, 等. 基于混合优化算法的电网规划方法[J]. 电网技术, 2005, 29(23): 30-33.
- Wang Chunjuan, Zhang Fusheng, Wang Shuai, et al. Power network planning method based on hybrid optimal algorithm[J]. Power System Technology, 2005, 29(23): 30-33(in Chinese).
- [14] Romero R, Monticelli A, Garcia A, et al. Test systems and mathematical models for transmission network expansion planning [J]. IEEE Proceedings of Generation Transmission and Distribution, 2002, 149(1): 27-36.
- [15] 聂宏展, 吕盼, 乔怡. 基于人工鱼群算法的输电网络规划[J]. 电工电能新技术, 2008, 27(2): 11-15.
- Nie Hongzhan, Lü Pan, Qiao Yi. Transmission network planning based on artificial fish school algorithm[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2008, 27(2): 11-15(in Chinese).



聂宏展

收稿日期: 2010-05-04。

作者简介:

聂宏展(1962), 男, 硕士, 教授, 研究方向为电力系统优化运行、继电保护, E-mail: niehz1126@163.com;

王毕元(1985), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统规划;

孙金红(1972), 男, 硕士, 工程师, 研究方向

为电力系统规划;

马元生(1974), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为电力系统规划。

(编辑 徐梅)