

基于混沌搜索策略蝙蝠算法的输电网规划

马迎东¹, 王文栋¹, 温强²

(1. 神华福能发电有限责任公司, 福建 泉州 362000; 2. 长春市双阳区供电有限责任公司, 吉林 长春 130000)

摘要: 针对输电网规划求解中存在变量多、维数高、约束条件复杂等导致难以求得全局最优解的问题, 将蝙蝠算法应用于输电网规划求解当中。为避免原算法精度低、易陷入局部最优的缺点, 提出在原算法基础上, 通过逻辑自映射函数产生混沌序列对蝙蝠前 $n\%$ 适应度最优个体进行混沌优化, 并建立计及线路建设费用、网损费用、输电线路走廊建设费用、 N 及 $N-1$ 约束条件下的过负荷惩罚费用为目标函数的输电网规划模型。最终通过 Matlab 软件对 IEEE-18 和巴西南部 46 节点标准算例编程计算, 结果验证了新算法在求解大维度输电网规划模型的可行性及高效性。

关键词: 输电网规划; 蝙蝠算法; 逻辑自映射; 混沌搜索

Transmission network planning based on bat algorithm with chaotic search strategy

MA Yingdong¹, WANG Wendong¹, WEN Qiang²

(1. Shenhua Funeng Power Generation Co., Ltd., Quanzhou 362000, China; 2. Changchun Shuangyang Power Supply Co., Ltd., Changchun 130000, China)

Abstract: In allusion to difficult to obtain the global optimal solutions due to the problems of much variables, high dimensions and sophisticated conditions in solving transmission network planning, bat algorithm is applied. The modified bat algorithm is proposed to solve low precision and local optimal solution of original algorithm through optimization of the fitness optimal individuals of bat first $n\%$ fitness by chaotic sequences generated by self-logical function. Power network planning model is designed and constructed which takes line investment cost, overload cost of normal operation, transmission corridor cost, and N and $N-1$ overload penalty cost constraints as objectives. By testing node IEEE-18 and Southern Brazilian 46-bus system with Matlab, the results show that the new method is feasible and efficient to solve transmission model of large dimension power transmission grid.

Key words: transmission network planning; bat algorithm; self-logical map; chaos search

中图分类号: TM715 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)15-0017-05

0 引言

随着国民经济迅速发展, 工、农、商业对电能的需求量提出了更高的要求, 电力工业只能不断地扩大电力系统建设规模。但在建设之前需要考虑众多因素, 方可做出合理的电力系统规划。输电网规划作为电力系统规划的重要组成部分, 最优的规划结果更是规划成败的关键, 如果不合理的规划, 势必造成能源的浪费, 经济的损失。因此, 输电网规划问题求解一直是国内外电力系统研究的重点及热点。

输电网规划数学模型根据侧重点不同而存在差别, 包括: 输电网建设成本、剩余输电容量、输电

阻塞成本、切负荷损失等。上述模型虽然推陈出新, 但至今却没有一个数学模型得到公认, 因此本文选取认可度较高的经济型模型作为规划模型, 即考虑一次性建设费用、过负荷费用、运行费用, 同时将 $N-1$ 准则作为约束条件建立输电网规划模型, 模型中各变量将在规划模型部分详细说明。

输电网规划问题具有维数高、变量多等特点, 常规数学规划方法很难求得最优解。因此, 近些年, 智能优化算法得到广泛应用。文献[1-10]分别将蛙跳、猴群、差分、和声、人工蜂群、类电磁机制、遗传、粒子群等算法进行改进, 最终快速、准确地求得了最优方案。

本文介绍一种结构简洁、易于实现的新型智能

优化算法——蝙蝠算法(BA)^[11], 与其他基本算法一样, BA 算法同样存在求解大维数问题过程中, 精度不高、易陷入局部最优解的缺点。为避免此类问题出现, 引入一种混沌优化方法, 一方面可以提高算法的精度, 另一方面可以增加群体多样性, 避免陷入局部最优解。算例结果表明新算法具有强大的搜索及适应能力。

1 输电网规划模型

以新建线路投资费用、输电走廊建设费用、网损耗费用、正常及 $N-1$ 运行时过负荷惩罚费用为最小的目标函数, 其输电网规划模型如下。

$$\min f = k_1 \sum_{i=1}^n c_i x_i + k_2 \sum_{i=1}^m r_i p_i^2 + k_3 w + k_4 w' + \sum_{i \in \Psi} a_i w_i l_i \quad (1)$$

N 约束:

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

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

$$0 \leq x_i \leq x_{i\max} \quad (4)$$

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

$N-1$ 约束:

$$B'\theta' + P_L' = P_G' \quad (6)$$

$$|B_i' A' \theta'| \leq P_{\max}' \quad (7)$$

$$W' = \sum_{i \in \Phi'} (|P_i'| - P_{i\max}') \quad (8)$$

式中: f 为规化年建设费用; k_1 为建设费用单价; c_1 为第 i 条新建线路的长度; x_i 为待选线路的回路数; k_2 为网络损耗费用系数; r_i 为支路 i 的电阻; P_i 为流过支路 i 的有功功率; P_{\max} 为 N 约束下支路功率矢量; k_3 为过负荷费用惩罚系数; w 为 N 约束下各支路过负荷量的总和; k_4 为过负荷费用惩罚系数; w' 为 $N-1$ 约束下各支路过负荷量的总和; B 、 B_i 、 θ 、 P_L 、 P_G 、 A 分别为 N 约束下系统节点导纳矩阵、支路导纳矩阵、节点电压相角矢量、负荷矢量、发电机出力矢量、系统关联矩阵; $x_{i\max}$ 为走廊 i 新增线路的上限; a_i 为输电走廊单位面积费用; w_i 为走廊宽度; l_i 为走廊长度; Ω 为过负荷线路集合; Ψ 为扩建线路集合; B' 、 B_i' 、 θ' 、 P_L' 、 P_G' 、 A' 分别为 $N-1$ 约束下系统节点导纳矩阵、支路导纳矩阵、节点电压相角矢量、负荷矢量、发电机出力矢量、系统关联矩阵; P_i' 为 $N-1$ 约束下流过支路 i 的有功功率; P_{\max}' 为 $N-1$ 约束下支路的功率矢量; Φ' 为 $N-1$ 约束下过负荷线路集。

2 基于混沌搜索策略的蝙蝠算法

2.1 蝙蝠算法概述

蝙蝠算法是 2010 年由剑桥大学学者 Xin-she yang 提出的, 模拟蝙蝠在觅食过程中通过声呐对猎物进行探测及躲避障碍物。算法由 n 只蝙蝠组成蝙蝠群体, 并给出在飞行过程中不断更新速度、位置的公式为

$$f_i = f_{\min} + (f_{\max} - f_{\min})\beta \quad (9)$$

$$v_i^{t+1} = v_i^t + (x_i^t - x_*)f_i \quad (10)$$

$$x_i^{t+1} = x_i^t + v_i^t \quad (11)$$

式中: f_i 、 f_{\min} 、 f_{\max} 分别表示第 i 只蝙蝠在当前时刻发出的声波频率、声波频率的最大值和最小值; v_i^{t+1} 和 x_i^{t+1} 分别为在 D 维搜索空间下蝙蝠群体中第 i 只个体在第 t 次更新后的速度和位置; β 为服从 $[0, 1]$ 均匀分布的随机变量; x_* 为当前最优位置。

由于蝙蝠在寻找猎物初始阶段, 搜索空间较大, 为提高搜索速度, 设定蝙蝠初始阶段发出声波强度大而速率小, 一旦锁定猎物, 就逐渐减低声波强度、增加发声速率, 以利于精确、快速定位猎物的空间位置, 发声强度及发声速率表达式为

$$A_i^{t+1} = \alpha A_i^t \quad (12)$$

$$r_i^t = r_i^0 [1 - \exp(-\gamma \cdot t)] \quad (13)$$

式中: A_i^{t+1} 、 A_i^t 分别表示为第 i 只蝙蝠在 $t+1$ 和 t 代发射声波强度; r_i^{t+1} 、 r_i^0 分别表示第 i 只蝙蝠在 t 代时声波发射速率及最大声波发射频率; α 、 γ 分别为声波强度衰减系数及声波发射速率增加系数。

局部搜索更新策略, 是从当前最优解中随机选中一个解, 对每一只蝙蝠位置进行更新。

$$x_{\text{new}} = x_{\text{old}} + \varepsilon A' \quad (14)$$

式中: $\varepsilon \in [-1, 1]$ 的一个随机数; A' 为蝙蝠群体在同一时刻的平均声波强度。

2.2 混沌优化策略

在进化过程中, 由于所有蝙蝠群体朝着最优解方向靠近, 导致群体失去多样化, 一旦陷入局部最优, 将无法跳出, 因此采用具有良好搜索机制的混沌优化策略对前 $n\%$ 适应度最优个体进行混沌优化。

混沌优化是利用混沌运动的随机性、遍历性以及初值敏感的特性来提高随机优化算法的效率, 其主要思想是将优化变量通过混沌映射规则映射到混沌变量空间的取值区间内, 利用混沌变量的遍历性和随机性寻优搜索, 最后将获得的优化解线性转化到优化空间^[12]。

文中采用逻辑自映射函数来产生混沌序列, 其数学表达式为

$$\begin{aligned} y_{(n+1),d} &= 1 - 2 \times y_{n,d}^2 \\ n &= 0, 1, \dots, y_{n,d} \in (-1, 1) \end{aligned} \quad (15)$$

根据逻辑自映射函数的性质, 首先将蝙蝠位置的每一维映射到 $[-1, 1]$ 上, 其表达式为

$$\begin{aligned} L_{id} &= 2(y_{id} - a_{id}) / (b_{id} - a_{id}) - 1 \\ d &= 1, 2, \dots, D \end{aligned} \quad (16)$$

然后通过式(16)进行载波操作, 将混沌变量加载于待搜索的个体变量, 得到混沌算子操作后的新个体, 并通过式(17)将其进行转换到原来的解空间进行判别, 转换公式为

$$\begin{aligned} x'_{id} &= \frac{1}{2} \times (b_{id} - a_{id}) \times L_{id} + \frac{1}{2} \times (b_{id} - a_{id}) \\ d &= 1, 2, \dots, D \end{aligned} \quad (17)$$

在搜索过程中, 一旦搜索到更优解, 则替代原蝙蝠位置, 否则直至更新到预先设定好的搜索次数。其中 a_{id} 、 b_{id} 分别表示蝙蝠 i 在第 d 维变量的搜索上下界。

2.3 混沌蝙蝠算法流程

因输电网规划为整数规划问题, 即待选线路只能建设或者不建设, 因此需要对蝙蝠位置进行离散化处理, 表达式为

$$x_i(0) = \begin{cases} 1 & rand() \geq 0.5 \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (18)$$

根据本文提出的改进算法及输电网规划问题特点, 制定算法流程如下:

步骤1 设置参数: 种群个数 n , 声波频率范围 $[f_{\min}, f_{\max}]$ 、最大声波发射频率 r^0 、最小声波强度 A 、声波强度衰减系数 α 及声波发射速率增加系数 γ 、混沌搜索迭代次数 K 、最大迭代次数 G , 随机生成初始种群;

步骤2 式(18)离散初始蝙蝠种群位置, 由算例原始参数及蝙蝠初始位置形成初始输电网网络框架, 通过规划模型目标函数及准则约束条件计算蝙蝠种群各蝙蝠位置适应度, 找到当前全局最优蝙蝠位置 x_* ;

步骤3 初始化蝙蝠发声频率, 并根据式(9)~式(11)更新速度和位置。

步骤4 随机生成 $rand1$, $rand1 \geq r'_i$, 通过式(14)进行蝙蝠群体局部更新, 否则随机将生成一个全新解;

步骤5 随机生成 $rand2$, $rand2 < A'_i$ 且新解通过式(18)离散后优于全局最优解 x_* , 则接受新解,

否则不做更新;

步骤6 若步骤5条件满足, 则通过式(12)、式(13)更新 A'_i 、 r'_i , 否则将跳过本步骤;

步骤7 选取 $n\%$ 适应度最优个体进行混沌优化, 当满足混沌搜索结束条件且达到最大迭代次数 G , 则进入步骤8, 否则转到步骤2;

步骤8 输出全局极值点和最优个体值。

3 算例分析

BA 算法更新策略与粒子群算法相类似。因此选取在输电网规划方面的最新的改进粒子群算法, 对本文规划模型进行编程求解, 具体改进方法参照文献[13]。最后通过 PSO、BA 与 CAB 三者进行性能分析比较。

3.1 算例1

采用 CAB 算法对 IEEE-18 节点算例^[14]反复试验, 最终获得适用于 IEEE-18 节点的各项参数为: 种群个数 $n = 25$, 声波频率范围 $[0, 1]$, 最大声波发射频率 $r^0 = 0.75$, 最小声波强度 $A = 0.25$, 声波强度衰减系数 $\alpha = 0.95$ 及声波发射速率增加系数 $\gamma = 0.05$, 混沌搜索迭代次数 $K = 50$, 最大迭代次数 $G = 200$, 参照文献[8]输电线路走廊的单位面积费用 $a_i = 1$, 输电线路走廊占地的宽度 w_i 为一回线时, $w_i = 48.27$ m, 每增加一回线, 走廊占地宽度增加 20 m。

根据编程计算, 最终最优方案为表 1。输电线路建设费用为 47 325 万元, 新建输电走廊占地费用为 16 545.44 万元。与文献[4]对比规划方案完全一致, 验证了算法的正确性及可行性。

表 1 规划方案

Table 1 Topology after calculation

输电走廊序号	新增回路数	输电走廊序号	新增回路数	输电走廊序号	新增回路数
1-11	1	7-13	1	11-12	1
4-16	1	7-15	1	12-13	1
5-12	1	8-9	1	14-15	2
6-14	1	9-10	2	16-17	1
7-8	1	10-18	1	17-18	1

为验证算法优越性, BA 算法参数与 CBA 一致。寻优效果图见图 1。

为了减少随机性对算法影响, 在种群规模相同的原則下, 分别对三种算法进行 50 次运算, 结果比较见表 2。

通过图 1 寻优路径及表 2 数据, 可以看出 CBA

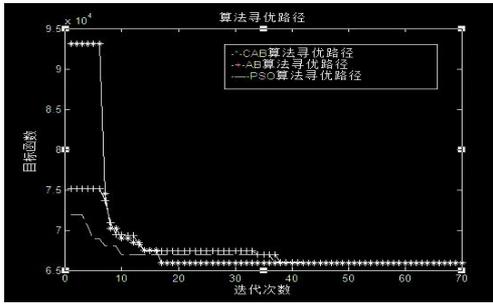


图1 CAB、AB和PSO算法寻优路径对比
Fig. 1 Ways of optimization for CAB, AB and PSO

表2 结果比较(算例1)

Table 2 Comparison of results (Example 1)

算法	BA	PSO	CBA
收敛次数	41	47	50
种群大小	25	25	25
求解时间范围	183-281	146-312	25.4-79.3

算法在收敛次数与求解时间上都较其他两种算法具有明显优势,同时CBA算法在初始解不占优势的情况下,仍快速收敛,验证了其高效性。

3.2 算例2

为了验证CBA算法是否具备求解更大维度输电网络规划问题。采用巴西西南部46节点系统^[14]进行分析计算。多次试验获得适用于46节点的各项参数为:种群个数 $n=50$,最大声波发射频率 $r^0=0.1$,最小声波强度 $A=0.4$,声波强度衰减系数 $\alpha=0.75$ 及声波发射速率增加系数 $\gamma=0.04$,混沌搜索迭代次数 $K=80$,最大迭代次数 $G=500$,其他参数与算例1一致。

最终求解规划方案见表3。输电线路建设费用为262427万元、输电线路走廊占地费用为61338万元,与文献[4]规划方案一致,进一步验证了算法正确性。

表3 规划方案

Table 3 Topology after calculation

输电走廊序号	新增回路数	输电走廊序号	新增回路数	输电走廊序号	新增回路数
2-3	1	14-15	1	28-31	1
3-46	1	15-16	1	29-30	1
5-6	2	19-25	1	31-32	1
5-11	2	20-21	2	31-41	1
9-10	2	24-25	2	40-41	1
11-46	1	26-29	1	42-43	1
12-14	1	28-30	1		

再次进行算法性能分析时发现,BA算法完全不具备大维度问题求解能力,PSO算法在50次求解过程中,仅7次求出全局最优解。两种算法寻优效果见图2。

可以看出,PSO虽然能够得出全局最优解,但从迭代次数可以看出,在陷入局部最优解的时候,需要进行多次迭代才能跳出,大大地增加了问题求解的时间,其精度较CBA算法有明显劣势。算例分析证明,CBA算法具备大维度问题求解能力,同时能够快速求得最优结果。

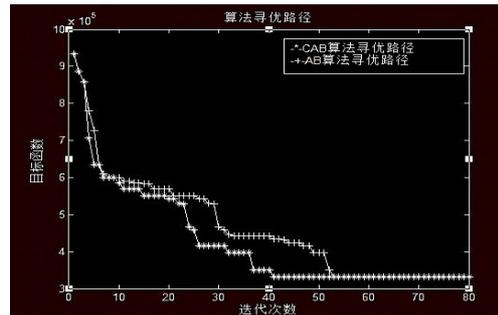


图2 CAB和PSO算法寻优路径对比

Fig. 2 Ways of optimization for CAB and PSO

4 结论

针对BA算法在求解大维度规划模型时,存在易陷入局部最优解的问题,通过逻辑自映射函数产生混沌序列对蝙蝠前 $n\%$ 适应度最优个体进行混沌优化。试验表明,通过混沌优化后的算法,具有强大的全局寻优能力,验证了在解决大维度输电网络规划问题的可行性和高效性,同时扩展了BA算法的应用范围。

参考文献

- [1] 王茜,张粒子,舒隽,等.基于阈值选择策略的改进混沌蛙跳算法在电网规划中的应用[J].电力系统保护与控制,2011,39(3):34-39.
WANG Qian, ZHANG Lizi, SHU Jun, et al. Application of improved shuffled frog leaping algorithm based on threshold selection strategy in transmission network planning[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(3): 34-39.
- [2] 王靖然,余贻鑫,曾沅.离散猴群算法及其在输电网络扩展规划中的应用[J].天津大学学报,2010,43(9):798-803.
WANG Jingran, YU Yixin, ZENG Yuan. Discrete monkey algorithm and its application in transmission network expansion planning[J]. Journal of Tianjin

- University, 2010, 43(9): 798-803.
- [3] 聂宏展, 郑鹏飞, 于婷, 等. 基于多策略差分进化算法的输电网规划[J]. 电工电能新技术, 2013, 32(1): 13-18.
NIE Hongzhan, ZHENG Pengfei, YU Ting, et al. Transmission network planning based on multi-strategy differential evolution algorithm[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2013, 32(1): 13-18.
- [4] 聂宏展, 赵丹, 段柯均, 等. 基于混沌自适应分组和声搜索算法的输电网规划[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(19): 32-36.
NIE Hongzhan, ZHAO Dan, DUAN Kejun, et al. Transmission network planning based on chaos adaptive grouping harmony search algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(19): 32-36.
- [5] 周文越, 吕飞鹏, 廖小君. 基于人工蜂群算法的分布式电源规划[J]. 电力系统自动化学报, 2014, 26(5): 39-43.
ZHOU Wenyue, LÜ Feipeng, LIAO Xiaojun. Optimal planning of distributed generation based on artificial bee colony algorithm[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2014, 26(5): 39-43.
- [6] 付锦, 王先洪, 欧智乐, 等. 改进类电磁机制算法在多目标动态电网规划中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(3): 94-99.
FU Jin, WANG Xianhong, OU Zhile, et al. Application of improved electromagnetism-like mechanism in multi-objective dynamic power network planning[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(3): 94-99.
- [7] 肖曦, 许青松, 王雅婷, 等. 基于遗传算法的内埋式永磁同步电机参数辨识方法[J]. 电工技术学报, 2014, 29(3): 21-26.
XIAO Xi, XU Qingsong, WANG Yating, et al. Parameter identification of interior permanent magnet synchronous motors based on genetic algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2014, 29(3): 21-26.
- [8] 陈昌松, 段善旭, 蔡涛, 等. 基于改进遗传算法的微网能量管理模型[J]. 电工技术学报, 2013, 28(4): 196-201.
CHEN Changsong, DUAN Shanxu, CAI Tao, et al. Microgrid energy management model based on improved genetic arithmetic[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(4): 196-201.
- [9] 周建平, 林韩, 温步瀛. 改进量子遗传算法在输电网规划中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(19): 90-95.
ZHOU Jianping, LIN Han, WEN Buying. Application of improved quantum genetic algorithm in transmission network expansion planning[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(19): 90-95.
- [10] 周超, 田立军. 基于粒子群优化算法的电压暂降监测点优化配置[J]. 电工技术学报, 2014, 29(4): 181-187.
ZHOU Chao, TIAN Lijun. An optimum allocation method of voltage sag monitoring nodes based on particle swarm optimization algorithm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(4): 181-187.
- [11] YANG Xinshe. A new metaheuristic bat-inspired algorithm[M] // Nature Inspired Cooperative Strategies for Optimization(NICSO2010): Springer, 2010: 65-74.
- [12] 程慧, 刘成忠. 基于混沌映射的混合果蝇优化算法[J]. 计算机工程, 2013, 39(5): 218-221.
CHENG Hui, LIU Chengzhong. Mixed fruit fly optimization algorithm based on chaotic mapping[J]. Computer Engineering, 2013, 39(5): 218-221.
- [13] 常伯涛, 范颖. 基于改进粒子群算法的输电网扩展规划研究[J]. 华北电力大学学报, 2008, 35(4): 13-17.
CHANG Botao, FAN Ying. Transmission network expansion planning based on improved particle swarm optimization[J]. Journal of North China Electric Power University, 2008, 35(4): 13-17.
- [14] 王锡凡. 电力系统优化规划[M]. 北京: 水利电力出版社, 1990: 279-281.

收稿日期: 2014-10-21; 修回日期: 2015-03-24

作者简介:

马迎东(1985-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统规划。E-mail: 178568359@qq.com

(编辑 周金梅)