

基于混沌自适应分组和声搜索算法的输电网规划

聂宏展, 赵丹, 段柯均, 王瑞

(东北电力大学电气工程学院, 吉林 吉林 132012)

摘要: 针对目前大规模输电网规划求解中难以快速地求得全局最优解的问题, 给出了基于线路的建设费用、网络损耗费用、输电线路走廊的建设费用、各支路总的过负荷惩罚费用和 $N-1$ 约束的过负荷惩罚费用为目标函数的输电网规划模型。分析了和声搜索算法随着输电网规模的扩大、优化问题维数的增加, 算法求解精度和收敛速率明显降低且易陷入局部寻优的现象及其原因的基础上, 设计了一种混沌自适应分组和声搜索算法。该算法通过维数分组、变异和混沌扰动来提升算法的搜索能力, 使其能够快速求解大规模的输电网规划问题。通过对 IEEE18 节点和巴西南部 46 节点系统的计算, 证明了算法及模型应用于输电网规划的可行性, 为实际工程应用打下了基础。

关键词: 电力系统; 输电网规划; 和声搜索算法; 分组策略; 混沌策略

Transmission network planning based on chaos adaptive grouping harmony search algorithm

NIE Hong-zhan, ZHAO Dan, DUAN Ke-jun, WANG Rui

(School of Electrical Engineering, Northeast Dianli University, Jilin 132012, China)

Abstract: At present, it is difficult to obtain the global optimal solution fast in the large-scale transmission networks planning solving. For that, this paper proposes a model of transmission network planning which takes line investment costs, network loss cost, the over-load cost of normal operation, transmission corridor cost and $N-1$ overload penalty cost constraints as objectives. After the main disadvantages of being inclined to premature convergence, low accuracy and convergence rate in harmony algorithm are discussed, with the expansion of the transmission network and the increase in the dimension optimization problem, chaos adaptive grouping harmony search algorithm is proposed. Through group dimension, mutation and chaos disturbance to improve search ability of the algorithm, it can quickly solve large-scale transmission networks planning problems. Through the results of 18-node system and Southern Brazilian 46-bus system, it can not only prove the algorithm and model correctness and effectiveness in transmission network planning, but also can demonstrate that the algorithm has high computing speed and convergence, which provides the foundation for practical engineering applications.

Key words: electric power system; transmission network planning; harmony search algorithm; grouping strategy; chaos strategy

中图分类号: TM715 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)19-0032-05

0 引言

随着现代社会经济的高速发展, 各行业的日常工作越来越依赖于电力的支持。为了满足不断增长的电力需求与越来越高的供电要求, 电网的规模逐渐扩大, 电网开始向大规模电网方向发展。而如何确定最适合当前经济发展的输电网结构, 以满足输送电能的经济性和可靠性的要求, 成为电力系统亟待解决的问题。

近年来, 随着智能优化算法的快速发展, 大规模输电网规划在计算精度和收敛速度上都获得了实质性进展^[1]。文献[1-8]分别介绍了多策略差分进化

算法、遗传算法、人工鱼群优化算法、粒子群优化算法、量子遗传优化算法, 运用这些方法提出有利于快速、准确地获得输电网规划最优的方案。但随着大规模输电网的不断发展, 以上优化方法难免出现“维数灾”和“组合爆炸”等问题^[9]。

本文介绍了一类具有全局搜索能力的和声搜索算法, 该算法通过初始化和声记忆库, 从记忆库中随机产生新的和声, 如果新的和声比和声记忆库中最差的和声好, 替代和声记忆库中适应度最差的和声, 如此循环直至满足停止准则^[10]。在对于求解大规模输电网规划问题和高维决策优化问题上, 随着问题变量维数的增加, 明显降低了和声搜索算法的

计算速度和求解精度。本文通过维数分组、个体变异和混沌扰动来提升算法的搜索能力,使其更好地解决实际工程问题。

1 输电网规划模型

以新扩建线路投资费用、输电走廊建设费用、运行时网络损耗费用、正常运行时过负荷惩罚费用以及考虑可靠性 $N-1$ 约束的过负荷惩罚费用最小为目标函数,并考虑网络正常运行时流经各支路的有功功率不过负荷为约束和任意断开一条线路可靠性校验的 $N-1$ 约束的输电网规划的数学模型,描述如下。

$$\min F = k_1 \sum_{i=1}^n c_i x_i + k_2 \sum_{i=1}^m r_i P_i^2 + k_3 W + k_4 W' + h \quad (1)$$

正常 N 约束为

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

$$|\mathbf{B}_1 \mathbf{A}\theta| \leq P_{\max} \quad (3)$$

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

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

$$h = \sum_{i \in \Psi} a_i w_i l_i \quad (6)$$

可靠性 $N-1$ 约束为

$$\mathbf{B}'\theta' + P_L' = P_G' \quad (7)$$

$$|\mathbf{B}'_1 \mathbf{A}'\theta'| \leq P'_{\max} \quad (8)$$

$$|P'_i| \leq \bar{P}'_i \quad (9)$$

$$W' = \sum_{i \in \Phi'} (|P'_i| - \bar{P}'_i) \quad (10)$$

其中: F 为规划年建设费用; k_1 为建设费用单价; c_i 为第 i 条新扩建线路的长度; x_i 为待选线路的回路数; k_2 为网络损耗费用系数; P_i 为正常运行时流经支路 i 的有功功率; $P_{i\max}$ 为线路 i 的传输功率上限; r_i 为支路 i 的电阻; k_3 为过负荷费用惩罚系数; W 为模型中各支路过负荷量的总和; $N-1$ 约束情况下的网络过负荷量 W' 乘以惩罚系数 k_4 引入目标函数; h 为输电走廊的建设费用; \mathbf{B} 为系统节点导纳矩阵; \mathbf{B}_1 为系统支路导纳矩阵; θ 为节点电压相角矢量; P_L 为负荷矢量; P_G 为发电机出力矢量; \mathbf{A} 为规划系统关联矩阵; $x_{i\max}$ 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 为走廊宽度; l 为走廊长度; Ω 为过负荷线路集合; Ψ 为扩建线路集合。

$N-1$ 约束情况下,式(7)为直流潮流约束,式(8)为支路功率不等式约束,式(9)为支路潮流约束,式(10)为总过负荷量。 \mathbf{B}' 为 $N-1$ 时系统节点导纳矩阵; θ' 为节点相角矢量; P_L' 为负荷矢量; P_G' 为发电机出力矢量; P'_{\max} 为支路功率矢量; \mathbf{B}'_1 为由各支路导纳组成的对角矩阵; \mathbf{A}' 为系统关联矩阵; P'_i 为 $N-1$ 运行方式下线路传输功率; \bar{P}'_i 为线路 i 的传输功率上限, Φ' 为 $N-1$ 情况下过负荷线路集合,设置相对较大的罚函数从而使系统满足 $N-1$ 要求,体现电网的安全性和可靠性要求。

2 和声搜索算法(HS)

和声搜索算法是一类具有全局优化能力的新颖的智能优化算法^[11-12]。详细的计算步骤如下:

(1) 初始化参数。和声记忆库的个数 HMS ; 和声记忆库保留的概率 $HMCR$; 音调微调的概率 PAR ; 音调微调的宽度 Bw ; 迭代次数 $Tmax$ 。

(2) 初始化和声记忆库。随机产生 HMS 个和声 x^1, x^2, \dots, x^{HMS} 放入和声记忆库。

(3) 生成新和声。和声生成的机理: 模仿和声记忆库; 音调微调扰动; 随机选择音调。具体操作如下:

$$x'_i = \begin{cases} x_i \in (x_i^1, x_i^2, \dots, x_i^{HMS}), & \text{if } rand < HMCR \\ x_i \in X_i, & \text{otherwise; } i = 1, 2, \dots, N \end{cases} \quad (11)$$

$$x'_i = \begin{cases} x_i(k+m), m \in \{-1, 1\}, & \text{if } rand < PAR \\ x_i, & \text{otherwise; } i = 1, 2, \dots, N \end{cases} \quad (12)$$

(4) 更新和声记忆库。如果新生成的和声的目标值优于和声记忆库中函数值最差的和声,用此和声替换最差的和声来更新和声记忆库。具体操作如下:

$$\text{if } f(x^i) < f(x^{\text{worst}}) = \max_{j=1,2,\dots,HMS} f(x^j) \quad (13)$$

$$\text{then } x^{\text{worst}} = x^i$$

(5) 重复步骤(3)和(4),直到满足终止条件。

3 混沌自适应分组和声搜索算法(CAGHS)

为了克服和声搜索算法在解决多变量优化问题时易陷入局部极值的问题和提高和声搜索算法的全局优化能力。主要改进如下:

(1) 参数改进。在优化阶段,合理的 PAR 和 $HMCR$ 有助于增强解空间的多样性。具体操作如下。

$$HMCR_i = HMCR_0 \times \left(\frac{HMCR_1}{HMCR_0} \right)^{\frac{i}{N}} \quad (14)$$

$$PAR_i = \frac{i}{N} \times (PAR_0 - PAR_1) + PAR_1 \quad (15)$$

式中: N 是循环总次数; i 是当前迭代次数。

(2) 公式 (11) 改进。利用和声记忆库中目标函数值最好的和声的信息, 能有效地提高算法的计算速度和求解精度。具体操作如下:

$$x'_i = \begin{cases} x_i = \min(x^1, x^2, \dots, x^{HMS}), & \text{if } rand < HMCR \\ x'_i \in X_i, & \text{otherwise; } i = 1, 2, \dots, N \end{cases} \quad (16)$$

(3) 维数分组。对于大规模优化问题, 在优化后期, 变量之间相互冲突, 导致收敛速度降低并且易陷入局部搜索, 因此采用维数分组^[13]。具体操作如下:

音调分别从 $1 \sim \frac{N}{2}$ 、 $\frac{N}{2} \sim N$ 、 $1 \sim N$, 通过式

(11) 和式 (12) 进行音调微调, 其余音调不变, 生成新的和声。

(4) 变异。对和声记忆库中的最优和声 X_{new} 中的任意一维进行变异, 具体操作如下:

$$d = \text{fix}(N \times rand) + 1 \quad (17)$$

$$X_{new}(d) = X_{new}(d) \pm 1 \quad (18)$$

(5) 保证解空间的多样性。假如新生成的和声与记忆库中的某一个和声相同, 则放弃更新记忆库。

(6) 边界处理。对于超越取值范围的个体进行如下处理。具体操作如下:

$$x_{ij} = \begin{cases} \min x_{ij} & \text{if } (x_{ij} < \min x_{ij}) \\ \max x_{ij} & \text{if } (x_{ij} > \max x_{ij}) \end{cases} \quad (19)$$

(7) 混沌扰动。当算法停止不前, 陷入局部极值时, 基于 cat 映射方程的混沌优化算法的遍历性可作为跳出局部寻优的一种优化机制。具体操作如下:

$$x = \text{mod}(x + y, 1) \quad (20)$$

$$y = \text{mod}(x + 2y, 1) \quad (21)$$

$$X(1:N) = \begin{cases} X(1:N) - x & \text{if } (rand > 0.5) \\ X(1:N) + x & \text{if } (rand < 0.5) \end{cases} \quad (22)$$

式中: $X(1:N)$ 是和声记忆库中的和声; $rand$ 是 $[0,1]$ 上的均匀分布。

CAGHS 算法的流程图, 如图 1 所示。

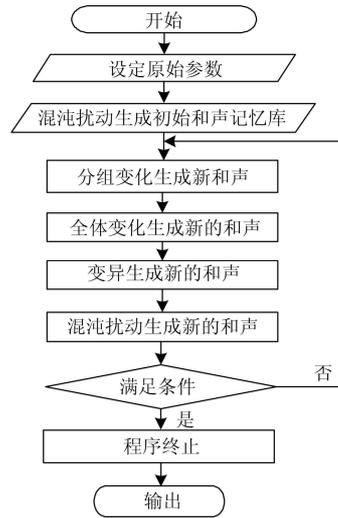


图 1 算法流程图

Fig. 1 Sketch map of algorithm

4 算例

4.1 算例 1

采用 IEEE-18 节点系统进行计算试验^[14], 根据分析调试经验, CAGHS 算法的各参数取令 $HMS=57$; 记忆库取值概率 $HMCR_0=0.9$; $HMCR_1=0.33$; 微调概率 $PAR_0=0.33$; $PAR_1=0.9$; 分组参数分成三组; 微调带宽为 1; 自循环次数 $J1=1\ 035$; 创作的次数 $Tmax=10\ 000$ 。根据文献[15]确定输电线路走廊的单位面积费用 a 的取值和输电线路走廊占地的宽度 w 的取值。

编制 CAGHS 算法程序并求解。方案如图 2 所示。

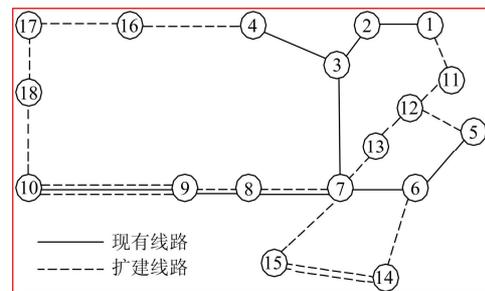


图 2 规划结果图

Fig. 2 Topology after calculation

最优输电网规划方案的输电线路的建设费用为 47 325 万元, 其中线路走廊的占地费用为 16 545.44 万元。

为了论证 CAGHS 算法的优越性, 将其与标准和声搜索算法 (HS)、人工鱼群优化算法 (AFSA) 进行比较。编制 AFSA 算法的程序, 计算 IEEE18

节点输电网规划模型, 所用参数见参考文献[8], 分析结果见表 1、图 3。

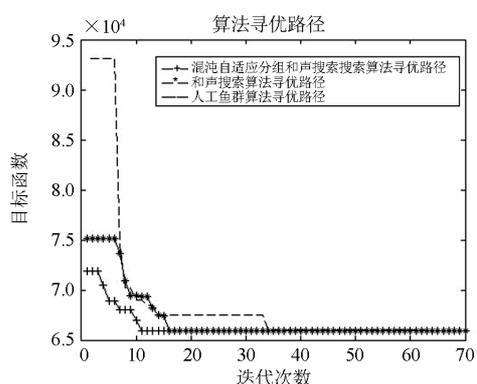


图 3 算法寻优路径比较
Fig. 3 Ways to optimization

表 1 结果比较
Table 1 Comparison of results

算法	AFSA	HS	CAGHS
计算次数	50	50	50
收敛次数	43	47	50
种群大小	25	13	57
最优解次数范围	32~108	28~72	7~19
计算时间/s	150~289	130~230	41.6~106

从表 1 中可以看出, 经过 50 次运算, 通过与人工鱼群算法 (AFSA) 和标准和声搜索算法比较, 在最优解出现次数范围和计算时间上, CAGHS 算法具有很大的优势。从图 3 中可以看出, AFSA 算法有 7 次陷入局部寻优, HS 算法有 3 次陷入局部寻优, 而 CAGHS 算法在求解 IEEE18 系统上可以快速求得最优结果。

4.2 算例 2

采用巴西南部 46 节点系统进行试验, 算例的网络结构和线路、有功功率和负荷功率的参数参见文献[16]及算例 1; 其中电源节点标号为 14、16、17、19、27、28、31、32、34、37、39、46; 负荷节点标号为 2、4、5、8、12、13、20、22、23、24、26、33、35、36、38、40、42、44、45; 其余节点为中间变电站节点。

编制 CAGHS 算法程序并求解。最优输电网规划方案输电线路走廊占地费用为 61 338 万元和输电线路的建设费用为 262 427 万元, 规划方案结果如表 2 所示。

表 2 巴西南部 46 节点系统优化方案

Table 2 Planning schemes of 46 bus system

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

为了论证 CAGHS 算法的优越性, 将其与 HS 算法、AFSA 算法和混合人工鱼群算法 (HAFSA) 进行比较, 而 HS 算法和 AFSA 算法几乎无法收敛。编制 HAFSA 算法的程序, 所用参数见参照文献[9], 分析结果见图 4。

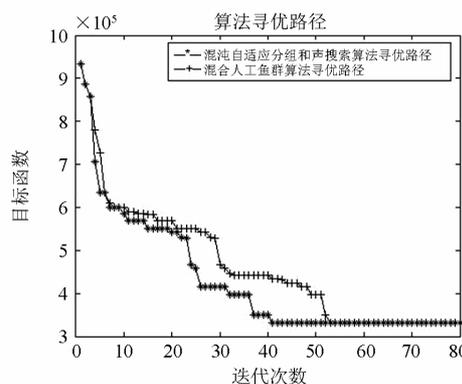


图 4 算法寻优路径比较
Fig. 4 Ways to optimization

从图 4 中可以看出, 与 HAFSA 算法比较, 在最优解出现次数范围和计算时间上, CAGHS 算法具有很大的优势; CAGHS 算法在求解巴西南部 46 节点系统上可以快速求得最优结果。

5 结论

基本和声搜索算法在处理大规模输电网规划问题时难于跳出局部寻优, 降低了和声搜索算法的寻优能力。通过变量维数分组, 音调变异和混沌扰动对算法进行的改进, 明显提高了算法的整体寻优能力, 并且通过理论的和规划算例的检验, 证明了混沌自适应分组和声搜索算法在解决大规模输电网规划等高维优化问题上具有一定的优势。

参考文献

[1] 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 Hong-zhan, ZHENG Peng-fei, 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.
- [2] 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 Jian-ping, LIN Han, WEN Bu-ying. Application of improved quantum genetic algorithm in transmission network expansion planning[J]. *Power System Protection and Control*, 2012, 40(19): 90-95.
- [3] 范宏, 金义雄, 程浩忠, 等. 兼顾输电利润和社会成本的输电网二层规划方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2011, 39(24): 106-111.
- FAN Hong, JIN Yi-xiong, CHENG Hao-zhong, et al. Transmission network planning considering transmission profit and social cost based on bi-level programming[J]. *Power System Protection and Control*, 2011, 39(24): 106-111.
- [4] 韩晓慧, 王联国. 输电网优化规划模型及算法分析[J]. *电力系统保护与控制*, 2011, 39(23): 143-148.
- HAN Xiao-hui, WANG Lian-guo. Review of transmission network optimal planning model and algorithm[J]. *Power System Protection and Control*, 2011, 39(23): 143-148.
- [5] 赵书强, 李勇, 王春丽. 基于可信性理论的输电网规划方法[J]. *电工技术学报*, 2011, 26(6): 166-171.
- ZHAO Shu-qiang, LI Yong, WANG Chun-li. Transmission network expansion planning based on credibility theory[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2011, 26(6): 166-171.
- [6] 朱建全, 吴杰康. 基于混合粒子群算法并计及概率的梯级水电站短期优化调度[J]. *电工技术学报*, 2008, 23(11): 131-138.
- ZHU Jian-quan, WU Jie-kang. Short-term scheduling optimization of cascade hydro plants based on hybrid particle swarm optimization with probabilistic analysis[J]. *Transaction of China Electrotechnical Society*, 2008, 23(11): 131-138.
- [7] 江岳文, 陈冲, 温步瀛. 含风电场的电力系统机组组合问题随机模拟粒子群算法[J]. *电工技术学报*, 2009, 24(6): 129-137.
- JIANG Yue-wen, CHEN Chong, WEN Bu-ying. Particle swarm research of stochastic simulation for unit commitment in wind farms integrated power system[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2009, 24(6): 129-137.
- [8] 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 Hong-zhan, 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.
- [9] 聂宏展, 乔怡, 吕盼, 等. 基于混合人工鱼群算法的输电网扩展规划[J]. *电网技术*, 2009, 33(2): 78-83.
- NIE Hong-zhan, QIAO Yi, Lü Pan, et al. Transmission network expansion planning based on hybrid artificial fish school algorithm[J]. *Power System Technology*, 2009, 33(2): 78-83.
- [10] 雍龙泉. 和声搜索算法研究进展[J]. *计算机系统应用*, 2011, 20(7): 244-248.
- YONG Long-quan. Advances in harmony search algorithm[J]. *Computer Systems & Applications*, 2011, 20(7): 244-248.
- [11] GEEM Z W, KIM J H, LOGANATHAN G V. A new heuristic optimization algorithm: harmony search[J]. *Simulation*, 2001, 76(2): 60-68.
- [12] PARIZAD A, BAGHAEE H R, DEGHAN S, et al. Application of harmony search for transmission expansion planning considering security index and uncertainty[J]. *Electric Power and Energy Conversion Systems*, 2009: 1-8.
- [13] 拓守恒, 邓方. 一种求解高维复杂优化问题的动态自适应和声搜索算法[J]. *计算机科学*, 2012, 39(9): 240-246.
- TUO Shou-heng, DENG Fang. Dynamic self-adaptive harmony search algorithm for solving high-dimensional complex optimization problems[J]. *Computer Science*, 2012, 39(9): 240-246.
- [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.
- WANG Xi-fan. *Power system optimal planning*[M]. Beijing: Hydraulic and Electric Power Press, 1990: 279-281.
- [15] 黄映, 李扬, 高赐威. 基于非支配排序差分进化算法的多目标电网规划[J]. *电网技术*, 2011, 35(3): 85-89.
- HUANG Ying, LI Yang, GAO Ci-wei. Multi-objective transmission network planning based on non-dominated sorting differential evolution[J]. *Power System Technology*, 2011, 35(3): 85-89.
- [16] HAFNER S, MONTICELLI A, GARCIA A, et al. Branch and bound algorithm for transmission system expansion planning using a transportation model[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2000, 147(3): 149-156.

收稿日期: 2014-01-01; 修回日期: 2014-04-01

作者简介:

聂宏展(1962-), 男, 硕士, 教授, 研究方向为电力系统规划、继电保护;

赵丹(1989-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统规划; E-mail: dandanzhaozhao@163.com

段柯均(1990-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统规划。