

配网规划中加入扰动策略的蚁群算法

杨丽徒^{1,2}, 张丹¹, 王家耀², 王志刚¹, 宋冰³

(1. 郑州大学电气工程学院, 河南 郑州 450002; 2. 信息工程大学测绘学院, 河南 郑州 450052;

3. 山西晋城供电公司调度所, 山西 晋城 048000)

摘要: 作为一种求解组合优化问题的启发式方法, 基本蚁群算法以其正反馈、并行计算和鲁棒性强等优点被许多领域的专家所关注; 但是如果正反馈应用不得当, 也会出现搜索时间过长或陷入局部最优解的情况。为此, 提出采用加入扰动策略的蚁群算法, 通过对各计算因子的动态调整, 控制其正反馈过程和算法的搜索区域, 以提高蚁群算法得到全局最优解的概率和收敛速度。配网规划的应用算例证明了这一改进的有效性。

关键词: 配网规划; 蚁群算法; 小扰动策略; 信息素

中图分类号: TM715; TM74 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2005)09-0035-04

0 引言

自 20 世纪 80 年代以来, 配电网网络优化规划的问题一直是一个重要的研究课题。经典的网络规划方法主要是在图论的基础上, 应用 Dijkstra 算法、邻接结点算法、基于点-边拓扑关系的算法、线性规划或非线性混合整数规划方法等来实现网络路径的优化规划^[1-3]; 但是随着电网规模的增大, 可能出现的“维数灾”和合理计算时间等问题限制了上述方法的使用。大约到了 20 世纪 90 年代, 模拟进化、遗传算法、禁忌搜索算法^[4]、模拟退火算法和免疫算法等启发式优化方法的研究为电网规划提供了新的思路和研究方法。

蚁群算法最初是由意大利学者 M. Dorigo 等人提出的一种求解组合优化问题的新型通用的仿生启发式优化方法, 目前在很多组合优化问题研究上都取得了比较理想的效果, 如 QAP 问题、JSP 问题和 TSP 问题等。但是如果参数选择或正反馈应用不得当, 也会出现搜索时间过长或陷入局部最优解的情况^[5-7]。为此, 本文提出加入扰动策略的蚁群算法, 通过对各计算因子的动态调整, 控制其正反馈过程和算法的搜索区域。实验证明该算法可以提高得到全局最优解的概率, 加快收敛速度。

1 计及支路载荷率的电网优化规划模型

假设待优化规划的电网中, 共有 n 条可行备选路径, 其中有 n_1 条现有路径, n_2 条可行备选新增路径; 有 m 个节点, 包括 m_1 个变电站节点和 m_2 个负荷节点。电网的优化规划问题可以直观地描述为从 m_1 个顶点到网络中其它 m_2 个顶点的最短路径以及

m_1 个供电区域的划分问题。根据配网运行的技术要求, 在 m_1 个供电区域的供电网络一般应该是辐射网结构。因此, 配网的优化规划目标函数 $f(X)$ 可由式 (1) 来描述:

$$\min \left[\sum_{i=1}^{n_1} \frac{C_1 L_i}{P_{*i}} + \sum_{i=1}^{n_2} \left(\frac{C_1 L_i}{P_{*i}} + C_2 L_i \right) x_i + A \sum_{i=1}^n L_i P_{*i} \right]$$
$$\text{s t} \quad V_{\min} \leq V_i \leq V_{\max} \quad (1)$$
$$\text{Radial(Net)} = \text{TRUE}$$

式中: X 为 n 维决策变量, 代表问题的解, $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$; 当支路 i 被选中时 $x_i = 1$, 否则 $x_i = 0$; C_1 为单位长度线路的设备投资回收和折旧维修费用; L_i 为支路长度 (km), P_{*i} 为支路 i 的载荷率; C_2 为单位长度线路的综合投资 (万元/km); 当网络为辐射状时 A 值为过负荷惩罚系数, 当网络为非辐射状时 A 值为一数值较大惩罚值, 保证此结果不被选中。

假设 P_i 为被选中的路径中的实际传输功率; P_{Bi} 为被选中的路径中的额定传输功率; 可以定义 P_i 与 P_{Bi} 之比为支路载荷率 P_{*i} , 当线路没有过负荷时, $0 < P_{*i} < 1$; 当线路出现过负荷时, $P_{*i} > 1$ 。将支路载荷率 P_{*i} 加入目标函数, 从总体上反映了网络中各条支路的利用情况, 线路载荷率越高的方案越容易被选中, 提高了系统的整体有效性。

2 基本蚁群算法的分析

基本蚁群算法主要是受启发于蚁群搜索食物的过程。研究表明蚂蚁在运动过程中, 能够在它所经过的路径上留下一一种称之为信息素 (Pheromone) 的物质, 并通过感知这种物质, 指导自己的运动方向。这一过程在蚁群的集体行为中便表现出一种信息正反馈现象, 某一路径上走过的蚂蚁越多, 则后来者选

择该路径的概率就越大^[5]。

在配网规划中应用基本蚁群算法,首先需要求出 n_2 条可行备选新增线路的转换概率 P_i^k ;然后,每只蚂蚁根据其转换概率随机的选取其中的若干路径,形成一个满足式(1)的可行解 $f(X)$;通过对可行解的分析,再更新相关路径的信息素;重复上述过程直至满足出口条件。

在这一过程中,转换概率直接对应于路径被选中的概率。假设初始时刻,各条路径上的信息素数值 $\tau_i(0)$ 是相等的,即 $\tau_i(0) = C$ (C 为某一常数, $i = 1, \dots, n_2$), L_k 为蚂蚁 k 还没有访问过的路径元素集; α 为反映信息素作用的强弱指数因子, β 为反映路径信息作用的强弱指数因子, $\tau_i(t)$ 为路径 i 在 t 时刻的信息素, l_i 为路径 i 的路径信息,其数值一般选择路径的长度或投资的倒数;这样,在 t 时刻蚂蚁 k ($k = 1, 2, \dots, K$) 选择路径 i 的概率 $P_i^k(t)$ 为:

$$P_i^k(t) = \begin{cases} \frac{\tau_i(t)^\alpha l_i^\beta}{\sum_{i \in L_k} \tau_i(t)^\alpha l_i^\beta} & i \in L_k \\ 0 & i \notin L_k \end{cases} \quad (2)$$

假设 $\Delta\tau_i^k(t, t+1)$ 是时刻 t 到 $t+1$ 之间蚂蚁 k 释放在路径 i 上的信息素增量, Q 为调节系数,则有:

$$\Delta\tau_i^k(t, t+1) = \begin{cases} \frac{Q}{f(x)} & \text{如果蚂蚁 } k \text{ 选中了路径 } i \\ 0 & \text{如果蚂蚁 } k \text{ 没有选中路径 } i \end{cases} \quad (3)$$

完成一次迭代后,每条路径的信息增量为:

$$\Delta\tau_i(t, t+1) = \sum_{k=1}^K \Delta\tau_i^k(t, t+1) \quad (4)$$

被选中的路径 i 上的信息素更新为:

$$\tau_i(t+1) = \tau_i(t) + \Delta\tau_i(t, t+1), \quad i = 1, \dots, n_2 \quad (5)$$

参数 ρ 为信息素衰减因子 ($0 < \rho < 1$), 用 $1 - \rho$ 表示随时间转移,信息素衰减的程度。

众多研究表明,基本蚁群算法具有很强的发现较好解的能力,具有正反馈、本质上的并行计算、较强的鲁棒性、易于与其他优化算法相结合的特点。但是如果正反馈应用不当,也会出现搜索时间过长或陷入局部最优解的情况。

3 小扰动改进策略

本文在基本蚁群算法的基础上,引入了小扰动的改进策略,旨在动态地调整转换概率,适时调整信息素的释放策略,以利于对解空间的更完全的搜索,

找到全局最优解。

3.1 寻优三阶段

网络分析寻优过程大致可分为 3 个阶段。第一,在寻优的初始阶段,为了避免陷入局部最优解,应加大路径信息 l_i 的作用,适当减少信息素的增量 $\Delta\tau_i^k$,抑制蚁群算法中的正反馈作用。第二,经过一段时间搜索,如果获得的最优解没有变化,说明搜索已经陷入了某个极值点中,可能是全局最优解也可能是局部最优解;此时包含在当前最优解中的路径上的信息素会比其它路径大的多。为了扩大搜索范围,产生一个区域振荡,可强制调整当前最优解中部分路径上的信息素 $\tau_i(t)$ 。第三,在搜索方向基本确定的最后阶段,可以加大信息素正反馈的作用,以克服基本蚁群算法搜索时间较长的缺点。

3.2 关键因素及调控策略

通过对基本蚁群算法的研究不难发现,决定蚁群算法性能的关键因素有 3 个;一是控制信息素作用强弱的指数因子 α ,二是控制路径信息作用强弱的指数因子 β ,三是蚂蚁 k 选中路径 i 后释放的信息素的增量 $\Delta\tau_i^k$;三者相互关联,且 $\Delta\tau_i^k$ 起着核心作用。本算法采用不同数值的 α 、 β 和 $\Delta\tau_i^k$ 组合形式进行实际的网路分析,同时引入信息素局部更新策略,选取 $L = n/2$,即每次循环之后取 $1/2$ 比较优秀的个体进行信息素更新。

3.3 小扰动分量

从网络寻优三阶段的情况来看,控制寻优过程的关键是适当控制蚁群算法的正反馈作用,保证解的多样性,以得到全局最优解。在计算过程中加小扰动分量 $\delta(t)$,是控制正反馈作用的一个重要途径。假设蚁群算法的出口条件为迭代次数 CN ,小扰动分量主要作用于每条可行新增支路 i 的信息素增量 $\Delta\tau_i(t, t+1)$,通过实验可知加入扰动函数后的信息素修正方程为:

$$\tau_i(t+1) = \tau_i(t) + \delta(t) \cdot \Delta\tau_i(t, t+1), \quad i = 1, \dots, n_2 \quad (6)$$

$$\delta(t) = \begin{cases} 1 & 0 < t < CN_1 \\ 2 & CN_1 < t < CN_2 \\ 3 & \text{else} \end{cases} \quad (7)$$

4 算例及分析

图 1 给出了某系统的现有网络和可行待选新增路径;系统现有 10 个节点,9 条线路;在未来的某个水平年,节点增至 18 个,可行待选新增路径 33 条。

网络参数详见文献 [9]。对于辐射形网络结构,每只蚂蚁在该过程重复选取的次数为 $(m - m_1 - n_1)$ 。图 2 为网络优化结果。

根据实验分析和参考文献 [8],除了按照工程惯例选取的参数以外,本算例中的各项参数取值为:

$C_2 = 40$ 万元 /km, $C_1 = 0.15C_2$, $A = 40000$ 万元,调节系数 $Q = 100$, 蚂蚁群个体数 $K = 20$, 运算出口条件设为最大迭代次数 $CN = 500$ 。应用基本蚁群算法和加入小扰动策略的蚁群算法分别计算,计算结果见表 1、表 2。

表 1 基本蚁群算法在不同参数下的仿真结果

Tab 1 Simulation results of AC algorithm on different combination of α , β and ρ

因子	因子	衰减系数	最优目标函数值	达到收敛所需要的进化代数	收敛性能说明
0.5	1.5	0.3	90 165.462 1	43	陷入局部最优 97 556 501 1
0.5	1.5	0.5	90 165.462 1	145	收敛到全局最优
0.5	1.5	0.7	90 165.462 1	333	收敛到全局最优
1.0	1.0	0.3	92 658 251 0	6	陷入局部最优 92 658 251 0
1.0	1.0	0.5	93 590 462 1	20	陷入局部最优 97 556 501 1
1.0	1.0	0.95	90 165.462 1	113	收敛到全局最优
1.0	1.5	0.5	96 083 251 0	10	陷入局部最优 97 556 501 1
1.0	1.5	0.7	92 658 251 0	40	陷入局部最优 97 556 501 1

表 2 小扰动蚁群算法在不同参数下的仿真结果

Tab 2 Simulation results of AC algorithm with little interference on different combination of parameters

α	β	ρ	α_1	β_1	ρ_1	CN_1	CN_2	最优目标函数值	达到收敛所需进化代数	收敛性能说明
0.5	1.5	0.3	0.8	1.8	2	30	60	90 165.462 1	42	收敛到全局最优
0.5	1.5	0.5	0.85	1	2	50	100	90 165.462 1	46	收敛到全局最优
0.5	1.5	0.7	0.8	1	2	50	100	90 165.462 1	146	收敛到全局最优
1.0	1.0	0.3	0.8	1	2	30	60	90 165.462 1	11	收敛到全局最优
1.0	1.0	0.5	0.7	1	2	10	40	93 590 462 1	17	陷入局部最优 93 590 5
1.0	1.0	0.95	0.8	1.3	2	30	95	90 165.462 1	88	收敛到全局最优
1.0	1.5	0.5	0.7	1	2	30	60	92 658 251 0	5	陷入局部最优 92 658 8
1.0	1.5	0.7	0.7	1.5	2	10	30	90 165.462 1	35	收敛到全局最优

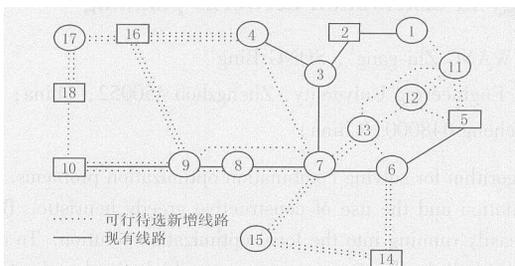


图 1 网络路径示意图

Fig 1 Schematic diagram of network path

从实验的结果来看,加入小扰动分量的蚁群算法获得最优解的概率明显大于基本算法,主要优点有:

- 1) 具有扰动策略的蚁群算法可以有效地逃离局部最优区,逐渐收敛到全局最优解;
- 2) 改进算法克服了停滞现象的过早出现;

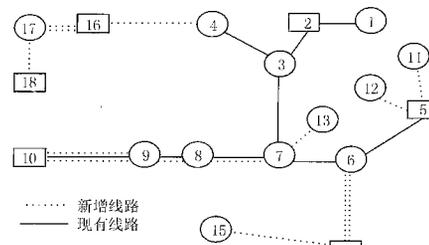


图 2 具有扰动策略的蚁群算法网络优化结果

Fig 2 Network optimal result with little interference in ACO

3) 小扰动分量的加入能够加快收敛速度,大大节省了搜索时间;

4) 即使小扰动没有使某些参数下的蚁群算法最终收敛到全局最优,也能够某种程度上使所得最优目标函数值更趋近于全局最优解。

5 结论

蚁群算法是基于群体协作和学习过程的一种新的启发式算法。本文把加入扰动策略的蚁群算法,应用于配网规划并在目标函数中引入了支路有效度的概念,实验结果表明该算法可以有效克服基本算法中搜索时间过长或易陷入局部最优的缺陷,使得其寻优性能有显著提高。

参考文献:

- [1] 王家耀. 空间信息系统原理 [M]. 北京: 科学出版社, 2001.
WANG Jia-yao. Theory of Spatial Information System [M]. Beijing: Science Press, 2001.
- [2] 原河峰, 杨丽徙, 章健. 以优化理论进行农村电网规划设计 [J]. 农村电气化, 1994, 15(6): 2-3.
YUAN He-feng, YANG Li-xi, ZHANG Jian. Rural Distribution Network Planning Based on Optimization Method [J]. Rural Electrization, 1994, 15(6): 2-3.
- [3] Jonnavuthula S, Billinton R. Minimum Cost Analysis of Feeder Routing in Distribution System Planning [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1996, 11(4): 1935-1940.
- [4] Binato S, Lizardo J. Greedy Randomized Adaptive Search Procedure for Transmission Expansion Planning [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2001, 16(2): 247-253.
- [5] 王志刚, 杨丽徙, 陈根永. 基于蚁群算法的配电网架架优化规划方法 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2002, 12: 73-76.

- WANG Zhi-gang, YANG Li-xi, CHEN Gen-yong. Ant Colony Algorithm for Distribution Network Planning [J]. Proceedings of the EPSA, 2002, 12: 73-76.
- [6] Dorigo M, Maniezzo V, Colomi A. The Ant System: Optimization by a Colony of Cooperating Agents [J]. IEEE Trans on Systems, Man, and Cybernetics-Part B, 1996, 26(3): 1-13.
 - [7] Dorigo M, Gambardella L M. Ant Colony System: A Cooperative Learning Approach to the Traveling Salesman Problem [J]. IEEE Trans on Evolutionary Computation, 1997, 1(1): 53-66.
 - [8] 詹士昌, 徐婕, 吴俊. 蚁群算法中有关算法参数的最优选择 [J]. 科技通报, 2003, 19(5): 380-386.
ZHAN Shi-chang, XU Jie, WU Jun. The Optimal Selection on the Parameters of the Ant Colony Algorithm [J]. Bulletin of Science and Technology, 2003, 19(5): 380-386.
 - [9] 程浩忠, 张焰. 电力网络规划的方法与应用 [M]. 上海: 科学技术出版社, 2002.
CHENG Hao-zhong, ZHANG Yan. The Method and Application on Power Network Planning [M]. Shanghai: Science and Technology Press, 2002.

收稿日期: 2004-08-05

作者简介:

杨丽徙 (1956 -), 女, 教授, 主要从事电力系统运行与规划方面的研究及教学工作; E-mail: yanglixixi@zzu.edu.cn

张丹 (1979 -), 女, 硕士研究生, 研究方向为配电网网络分析。

Ant colony algorithm with little interference strategy in distribution networks planning

YANG Li-xi^{1,2}, ZHANG Dan¹, WANG Jia-yao², WANG Zhi-gang¹, SONG Bing³

(1. Zhengzhou University, Zhengzhou 450002, China; 2. Information Engineering University, Zhengzhou 450052, China;
3. Shanxi Jincheng Power Company, Jincheng 048000, China)

Abstract: Basic ant colony algorithm is a new general-purpose heuristic algorithm for solving combination optimization problems. The main characteristics of this method are positive feedback, distributed computation and the use of constructive greedy heuristic. But if the positive feedback is not proper, it will take longer time on searching or easily running into the local optimization solution. To overcome those shortcomings, this paper puts forward an ant colony algorithms with little interference strategy, which timely adjusts the pheromone. It could control the positive feedback process and enhance the probability of full-scale optimization. The validity is proved by a power network optimization example.

Key words: distribution network planning; ant colony algorithms; little interference; pheromone

(上接第 34 页 continued from page 34)

Abstract: An improved genetic approach to optimal reactive power is presented. It employs the sensitivities of the objective function with respect to the control variables to adjust the mutation direction. Results of algorithm to the IEEE14 bus power system reveal this technique is suitable to minimize real power loss and the time of running program.

Key words: reactive power optimization; genetic algorithm; sensitivity analysis; optimal mutation