

文章编号:1000-3673(2001)06-0021-04

# 基于蚁群最优的输电网络扩展规划

陈根军, 王磊, 唐国庆

(东南大学电气工程系, 江苏省南京市 210096)

## AN ANT COLONY OPTIMIZATION METHOD FOR TRANSMISSION NETWORK EXPANSION PLANNING

CHEN Gen-jun, Wang Lei, TANG Guo-qing

(Department of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, Jiangsu Province, China)

**ABSTRACT:** Transmission network expansion planning is a very complicated, nonlinear, large-scale combinatorial optimization problem. In this paper, a novel method called Ant Colony Optimization (ACO) is presented to solve the problem of transmission network expansion planning. ACO algorithm, derived from the study of the behavior of ant colonies, is a new general-purpose heuristic algorithm for hard combinatorial optimization problems. The main characteristics of this method are positive feedback, distributed computation, and the use of a constructive greedy heuristic. In this paper, the application of ACO to transmission network expansion planning is investigated, the corresponding mathematical model is established and solution algorithms are developed. The presented method has been tested on Garver-6 system, and the results show that this method is feasible and efficient.

**KEY WORDS:** transmission network expansion planning; Ant Colony Optimization (ACO); combinatorial optimization; multi-agent

**摘要:** 输电网络扩展规划是一个非常复杂的大规模组合优化问题。文章提出了一种基于蚁群最优的输电网络扩展规划法(ACO)。ACO法来自对蚁群收集行为的研究,是一种求解组合最优问题的新型通用启发式方法。这种方法的主要特征是正反馈、分布式计算以及富于建设性的贪婪启发式搜索的运用。作者初步研究了ACO法在单阶段输电网络扩展规划中的应用,建立了相应的数学模型,设计了相应的算法,并在IEEE Garver-6系统上进行了测算。结果表明所提方法是有效的。

**关键词:** 输电网络扩展规划; 蚁群最优; 组合最优; 多代理

**中图分类号:** TM715 **文献标识码:** A

### 1 引言

输电网络扩展规划的主要任务是寻找输电网络的最优扩展方案以减少整个网络的费用,同时满足各种不同的运行和可靠性约束。由于具有时变性、离散性、非线性以及随机性,输电网络扩展规划是一个

非常复杂的大规模组合最优问题。到目前为止,这个问题还没有得到完满的解决。

在过去的几十年中,关于输电网络扩展规划的问题已有大量文章问世并提出了许多规划方法,如启发式方法、线性规划法、整数规划法、混合整数规划法、动态规划法、解耦方法、专家系统、模拟退火法、遗传算法、人工神经网络算法和Tabu搜索等。

本文提出了一种基于蚁群最优的方法(ACO法)来求解输电网络扩展规划问题。ACO法来自对蚁群收集行为的研究,最初由Dorigo等人提出<sup>[1]</sup>,是一种求解组合最优问题的通用新型内启发式方法。ACO法本质上是一个多代理算法,通过单个代理之间的低级交互形成整个蚁群的复杂行为。这种方法的主要特征是正反馈、分布式计算以及富于建设性的贪婪启发式搜索的运用。正反馈有助于快速发现较好的问题解;分布式计算避免了在迭代过程中早熟现象的出现;而贪婪启发式搜索的运用则使搜索过程中较早发现可接受解成为可能<sup>[1]</sup>。

虽然ACO法的出现只是近几年的事,但已成功应用于许多组合最优问题,例如旅行商问题<sup>[1,2]</sup>、二次分配问题<sup>[1]</sup>、工作—购物问题<sup>[1]</sup>、多背包问题<sup>[3]</sup>、冗余分配问题<sup>[4]</sup>以及子集问题<sup>[3]</sup>,ACO法在电力系统中的应用还刚刚起步。在文献[6]中,Yu I. K. 和 Chou C. S. 将ACO法应用于求解热发电机组的短期发电计划安排问题,并取得了较好的成果。

本文初步研究了ACO法在输电网络扩展规划中的应用,建立了数学模型,设计了求解算法,并将该算法成功地应用于IEEE Garver-6系统。结果表明,本文提出的方法是可行的和有效的。

### 2 输电网络扩展规划的数学模型

作为ACO算法的初步应用,本文仅仅考虑正

常状态下单阶段的输电网络扩展规划问题,其数学模型可用下式表达:

$$\min f(X) = \begin{cases} \sum_{i=1}^n C_i x_i + U_1 W & \text{当网络连通时} \\ U_2 & \text{当网络不连通时} \end{cases} \quad (1)$$

式中  $X$  为  $n$  维决策矢量,代表问题的解; $x_i (i=1, 2, \dots, n)$  是矢量  $X$  的元素,当待选线路  $i$  被选中时  $x_i = 1$ ,当待选线路  $i$  未被选中时  $x_i = 0$ ;  $C_i$  是线路  $i$  的投资费用,本文假设投资费用  $C_i$  正比于线路  $i$  的长度,于是它可以用线路  $i$  的长度  $L_i$  来表示; $W$  是网络的过负荷(即超过线路最大允许负荷)的部分,其值可以通过网络的负荷潮流求得,本文采用直流潮流法来求解负荷潮流; $U_1$  是一个大数,代表过负荷的惩罚系数; $U_2$  也是一个大数,代表网络不连通时的惩罚值,  $U_2 \gg U_1$ 。

### 3 蚁群最优算法

蚂蚁善于在捕食时建立一条联系蚁群和食物源的最短路径。受到蚂蚁的这种收集行为的启发, Dorigo 等人发展了蚁群最优算法(ACO法),作为一种具有通用目的的内启发式算法,用于求解大规模的组合优化问题。ACO 算法利用了一个代理集。在这个代理集中,每个成员都象相互协作的人工蚂蚁一样工作,通过沉淀在图的各个边上的信息素来交换信息,从而建立问题的解。当人工蚂蚁移动时,它们一边建立问题的解,一边通过加入新收集的信息不断地修改问题的描述。

下面结合著名的组合优化问题——旅行商问题(TSP),介绍蚁群最优的基本算法。

给定  $n$  个城市以及这  $n$  个城市相互之间的距离,则 TSP 问题可以定义为寻找访问每个城市一次的封闭路径的最小长度。TSP 问题的目标函数可以表述如下:

$$\min D_{\text{total}} = \sum_{i=1}^{n-1} d(i, i+1) + d(n, 1) \quad (2)$$

式中  $d(i, j)$  为城市  $i$  与城市  $j$  之间的距离。

假设  $b_i(t) (i=1, 2, \dots, n)$  是时刻  $t$  城市  $i$  蚂蚁的数目,  $m = \sum_{i=1}^n b_i(t)$  是所有蚂蚁的数目。时刻  $t$  城市  $i$  与  $j$  之间的连接  $ij$  上信息素的密度用  $\tau_{ij}(t)$  表示。 $\tau_{ij}(t)$  的初始值  $\tau_{ij}(0)$  被设置为一很小的正数  $C$ 。在时刻  $t$ , 每只蚂蚁可以选择下一个城市,每个蚂蚁移动到下一个城市的时刻则将变为  $t+1$ 。经过  $n$  次这样的移动,每只蚂蚁都完成了 1 次巡回旅行,或者

说完成了 1 次循环,这时候时间将是  $t+n$ 。所有蚂蚁旅行过的封闭路径中最短的一条被保存下来。同时,各城市之间的路径上信息素的密度被重新更新为

$$\tau_{ij}(t+n) = \rho \tau_{ij}(t) + \Delta \tau_{ij}(t, t+n) \quad (3)$$

式中  $\rho$  是一系数,  $1-\rho$  为时刻  $t$  到  $t+n$  之间各路径上信息素的蒸发系数。

$$\Delta \tau_{ij}(t, t+n) = \sum_{k=1}^m \Delta \tau_{ij}^k(t, t+n) \quad (4)$$

$\Delta \tau_{ij}^k(t, t+n)$  是时刻  $t$  到  $t+n$  之间第  $k$  只蚂蚁释放在路径  $(i, j)$  上单位长度信息素的数量,可以用下述方程来表示:

$$\Delta \tau_{ij}^k = \begin{cases} Q/L_k & \text{若第 } k \text{ 只蚂蚁使用路径 } (i, j) \\ 0 & \text{若第 } k \text{ 只蚂蚁未使用路径 } (i, j) \end{cases} \quad (5)$$

式中  $Q$  为一常数,  $L_k$  为第  $k$  只蚂蚁的旅行距离。

在蚂蚁的旅行过程中,第  $k$  只蚂蚁从城市  $i$  移动到城市  $j$  的转换概率定义为

$$P_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{\tau_{ij}^k(t) \eta_{ij}^\beta}{\sum_{l \in A_k(t)} \tau_{il}^k(t) \eta_{il}^\beta} & \text{若 } j \in A_k(t) \\ 0 & \text{若 } j \notin A_k(t) \end{cases} \quad (6)$$

式中  $A_k(t)$  代表第  $k$  只蚂蚁时刻  $t$  之前还没有访问到的城市集合;  $\eta_{ij}$  为可见度。在 TSP 问题中,  $\eta_{ij} = 1/d_{ij}$ ;  $\alpha$  与  $\beta$  是用来控制信息素密度和可见度之间相对重要程度的参数。

引进参数  $\alpha$  和  $\beta$  表明,转换概率是信息素密度和可见度之间相互平衡的结果。前者表示,如果释放到某路径上的信息素越多,那么该路径就越容易被蚂蚁所选中;而后者表示,如果某路径的距离越短,那么该路径就越容易被蚂蚁所选中。

为了避免 1 只蚂蚁在旅行中访问某城市超过 1 次,采用一个称之为 tabu 表的数据结构。每只蚂蚁都有一个 tabu 表与之对应。tabu 表的  $\text{tabu}_k(t)$  中存储了第  $k$  只蚂蚁到时刻  $t$  为止已经访问过的城市名称。所有这些存储于 tabu 表中的城市在余下的时间内将禁止被第  $k$  只蚂蚁访问。因此,集合  $A_k(t)$  可以定义为,  $A_k(t) = \{i | i \notin \text{tabu}_k(t)\}$ 。当 1 次巡回旅行完成后,tabu 表的  $\text{tabu}_k(t)$  被清空,所有的蚂蚁重新开始新的 1 次旅行。

### 4 蚁群最优算法在输电网络扩展规划中的应用

根据式(1)所描述的单阶段输电网络扩展规划的数学模型,对应规划方案的每 1 个可能的解都是  $n$  条待选输电线路的 1 个子集。输电线路的选取,必须

尽可能减小式(1)中的目标函数。在本文提出的ACO算法中,把 $n$ 条待选输电线路从1到 $n$ 编好号,同时增加编号 $n+1$ 来表示没有线路被选中,即“空白”的情形。在ACO算法的迭代过程中,蚂蚁每次从这 $n+1$ 个成员中选择1个元素。对每只蚂蚁,该过程同时重复 $n$ 次,最终每只蚂蚁均形成1个线路集,该线路集形成一个规划方案,从而完成1次迭代过程。蚂蚁每次从 $n+1$ 个成员中选择哪1个元素是由每1个元素的转换概率决定的,而转换概率则与每个元素的信息素密度密切相关。上述过程重复执行直到完成指定的迭代次数。

在 $n+1$ 个元素中,“空白”元素的初始信息素 $\tau_{n+1}(0)$ 被设置为 $\tau_{n+1}(0) = C_0$ ,其中 $0 < C_0 < 1$ 。前 $n$ 个元素的初始信息素被设置为

$$\tau_j(0) = \left[ \frac{1 - C_0}{\sum_{i=1}^n \left( \frac{1}{L_i} \right)^\beta} \right]^{1/\alpha} \quad (j = 1, 2, \dots, n) \quad (7)$$

因此有下述公式成立

$$\sum_{j=1}^n \frac{\tau_j(t)}{L_j^\beta} + C_0 = 1 \quad (8)$$

式中  $L_j$  为待选线路 $j$ (或者是元素 $j$ )的长度。

完成1次迭代后,每1条待选线路的信息素密度被更新为

$$\tau_j(t+n) = \rho \tau_j(t) + \Delta \tau_j(t, t+n) \quad (9)$$

$$j = 1, 2, \dots, n$$

$$\Delta \tau_j(t, t+n) = \sum_{k=1}^m \Delta \tau_j^k(t, t+n) \quad (10)$$

$\Delta \tau_j^k(t, t+n)$ 是时刻 $t$ 到 $t+n$ 之间第 $k$ 只蚂蚁释放在元素 $j$ 上单位长度信息素的数量,可以用下述方程来表示:

$$\Delta \tau_j^k = \begin{cases} \frac{Q}{f_k(X)} & \text{若第 } k \text{ 只蚂蚁使用元素 } j \\ 0 & \text{若第 } k \text{ 只蚂蚁未使用元素 } j \end{cases} \quad (11)$$

式中  $f_k(X)$  为第 $k$ 只蚂蚁所完成的规划方案的目标函数值,可以由式(1)计算得出。

为了计算整个网络的过负荷值,本文采用直流潮流法。

蚂蚁每次从 $n+1$ 个成员中选择哪一个元素是由每一个元素的转换概率来决定的,转换概率 $P_j^k(t)$ 表述如下:

$$P_j^k(t) = \begin{cases} \frac{\tau_j(t) \eta_j^\beta}{\sum_{i \in A} \tau_i(t) \eta_i^\beta + C_0} & \text{若 } j \in A \\ \frac{C_0}{\sum_{i \in A} \tau_i(t) \eta_i^\beta + C_0} & \text{若 } j \in B \\ 0 & \text{若 } j \notin A, B \end{cases} \quad (12)$$

式中  $A$  为第 $k$ 只蚂蚁还没有访问过的元素集; $B$ 为由“空白”元素单独组成的集合; $\eta_j = 1/L_j$ 。

从式(8)可以看出,仅仅对应所有待选线路的前 $n$ 个元素的信息素密度被更新,而“空白”元素的信息素密度没有被更新。在这种情况下,随着迭代次数的增加,“空白”元素被选中的概率将变得越来越小。为了避免这种情况的发生,引入“松弛系数” $\lambda$ 来解决这个问题。也就是说,在式(12)中,将项目 $\tau_j(t) \eta_j^\beta$  ( $j \in A$ )用松弛系数 $\lambda$ 相乘,同时满足下述方程:

$$\lambda \sum_{k \in A} \tau_k^a(t) \eta_k^\beta + C_0 = 1 \quad (13)$$

因此,松弛系数 $\lambda$ 可以由下式决定:

$$\lambda = \frac{1 - C_0}{\sum_{k \in A} \tau_k^a(t) \eta_k^\beta} \quad (14)$$

将式(12)修改为

$$P_j^k(t) = \begin{cases} \frac{\lambda \tau_j^a(t) \eta_j^\beta}{\lambda \sum_{k \in A} \tau_k^a(t) \eta_k^\beta + C_0} & \text{若 } j \in A \\ \frac{C_0}{\lambda \sum_{k \in A} \tau_k^a(t) \eta_k^\beta + C_0} & \text{若 } j \in B \\ 0 & \text{若 } j \notin A, B \end{cases} \quad (15)$$

当1次循环完成后,ACO算法从所有蚂蚁形成的规划方案中选择具有最小目标函数值的新规划方案,并与当前保存的最优规划方案进行比较。如果新方案比当前保存的最优方案还要好,那么用新方案更新当前保存的最优方案;否则维持当前的最优方案。

重复上述过程直至达到预先指定的最大迭代次数 $N_{\max}$ 。

输电网络扩展规划ACO算法的整个过程可以描述如下:

①初始化。设迭代次数 $N=0$ 。给“空白”元素分配一初始信息素值 $\tau_{n+1}(0)=C_0$ ;给其它 $n$ 个元素分配初始信息素值如式(7)所示。令 $\Delta \tau_j^k=0$ 。

②把所有待选线路加入到原来的网络中,用式(7)计算目标函数值 $f(X_0)$ 。令当前的最优规划方案 $S_{\text{best}}=f(X_0)$ 。

③For  $k=1$  to  $m$ ,置tabu表为空。

For  $l=1$  to  $n$ (重复选择元素 $n$ 次),利用式(15)计算所有未被加入tabu表的待选线路元素及“空白”元素的转换概率 $P_j^k(t)$ 。根据各元素的转换概率 $P_j^k(t)$ 从上述元素中选择一元素。

利用式(1)计算第 $k$ 只蚂蚁形成的规划方案的目标函数值。

④如果  $S_{best}$  不比在步骤③中找到的最优规划方案好,那么用步骤③中找到的最优规划方案代替  $S_{best}$ ; 否则转向步骤⑤。

⑤For  $j=1$  to  $n$ , For  $k=1$  to  $m$ , 用式(11)计算信息素密度增量值  $\Delta\tau_j^k$ , 用式(10)计算  $\Delta\tau_j(t, t+n)$ 。

⑥For  $j=1$  to  $n$ , 用式(9)更新信息素密度  $\tau_j(t+n)$ 。

⑦令迭代次数  $N=N+1$

⑧若  $N < N_{max}$ , 则清空所有的 tabu, 转向步骤③, 否则输出最好的规划方案, 停止。

## 5 算例分析

本文提出的输电网络扩展规划的 ACO 算法经编程实现, 在 IEEE Garver-6 系统<sup>[7]</sup>上进行了测试。图1是 Garver-6 系统的网络结构图。图中, 实线代表已有的输电线路, 虚线代表待选输电线路。

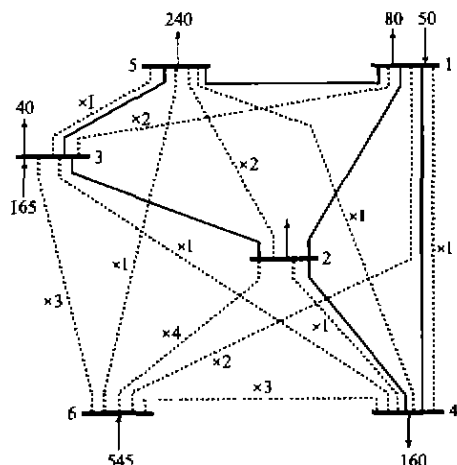


图1 Garver-6 系统  
Fig. 1 Garver-6 system

在 ACO 算法中, 待选线路的费用用线路的长度代替。参数设置如下:  $C_0=0.5$ ,  $\alpha=1$ ,  $\beta=1$ ,  $\rho=0.9$ ,  $Q=100$ ,  $m=22$ , 以及  $N_{max}=50$ 。运行 ACO 算法程序后, 得到最终的规划方案, 如图2所示。这与文献[7]中的结果是一致的。

## 6 结论

本文详细探讨了 ACO 算法在输电网络扩展规划中的应用, 对单阶段输电网络扩展规划问题建立了相应的数学模型, 发展了相应的求解算法。对 IEEE Garver-6 系统进行的测试表明, 本文提出的方法是有效的。

本文所做的工作只是 ACO 算法在输电网络扩

展规划中应用的开始, 进一步的研究工作还有待于今后逐步完成, 例如 ACO 算法如何应用于多阶段输电网络的扩展规划。

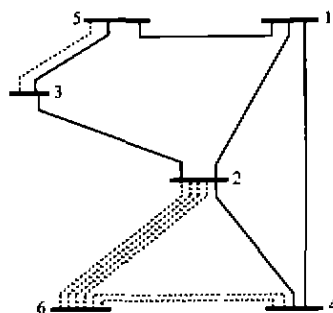


图2 Garver-6 系统的规划方案  
Fig. 2 The planning schedule of Garver-6 system

## 参考文献:

- [1] Dorigo M, Mantezzo V, Colonna A. Ant system: optimization by a colony of cooperating agents[J]. IEEE Trans on Systems, Man, and Cybernetics-Part B, Cybernetics, 1996, 26(1).
- [2] Dorigo M, Di Caro G. Ant colony optimization: a new meta-heuristic[C]. Proceedings of the 1999 Congress on Evolutionary Computation, 1999: 1470-1477.
- [3] Leguizamón G, Crespo M L, Kavka C, et al. The ant colony metaphor for multiple knapsack problem[C]. Proceedings of the 3th Congreso Argentino en Ciencias de la Computación. La Plata, Argentina, 1997: 1080-1090.
- [4] Liang Y C, Smith A E. An ant system approach to redundancy allocation[C]. Proceedings of the 1999 Congress on Evolutionary Computation, 1999: 1478-1484.
- [5] Leguizamón G, Michalewicz Z. A new version of ant system for subset problems[C]. Proceedings of the 1999 Congress on Evolutionary Computation, 1999: 1459-1464.
- [6] In-Keun Yu, Chou C S, Song Y H. Application of the ant colony search algorithm to short-term generation scheduling problem of thermal units[C]. Proceedings POWERCON '98, 1998 International Conference on Power System Technology, 1998: 552-556.
- [7] Garver L L. Transmission network estimation using linear programming[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1970: 1688-1697.

收稿日期: 2000-06-26; 改回日期: 2000-12-14。

作者简介:

陈根军, 男, 博士研究生, 研究方向为电力系统规划、配网自动化;

王磊, 女, 副教授, 从事配网规划与配网自动化、人工智能、决策支持系统在电力系统中应用的研究;

唐国庆, 男, 教授, 博士生导师, 从事电力系统运行与控制、配网规划与配网自动化、电力电子在配电网中的应用、人工智能在电力系统中应用的研究。

(编辑 陈定保)