

多阶段输电网络最优规划的并行蚁群算法

翟海保¹, 程浩忠¹, 吕千云¹, 陈春霖², 江峰青², 房领峰²

(1. 上海交通大学电气工程系, 上海市 200030; 2. 上海市电力公司发展计划部, 上海市 200002)

摘要: 多阶段输电网络最优规划是一个复杂的非线性组合优化问题, 难以采用传统的数学优化方法求解。蚁群算法是近年来出现的用于解决组合优化问题的一种高效的内启发式搜索技术, 但存在着未成熟收敛问题。文中给出了多阶段输电网络最优规划的数学模型及其解的向量形式; 详细分析了传统蚁群算法的未成熟收敛现象及其原因; 提出一种并行蚁群算法并用于求解多阶段输电网络最优规划问题。并行蚁群算法无需初始可行解, 能很好地协调局部搜索与全局搜索, 在加快计算速度的同时有效地避免了因参数设置、种群规模等不同而引起的未成熟收敛。对实际算例的计算结果表明, 该方法具有很高的计算效率和良好的全局收敛性。

关键词: 输电网络; 多阶段规划; 最优规划; 蚁群算法; 并行蚁群算法; 消息传递接口

中图分类号: TM715; TP18

0 引言

多阶段输电网络最优规划 (MTNOP——multistage transmission network optimal planning) 是一个非常复杂的组合优化问题, 具有非线性、离散性、多峰、多目标及目标函数不可微等特点, 由于需要考虑多个规划阶段之间方案的过渡及决策变量在各个阶段取值的制约 (如一回线路在各个阶段总共只可建 1 次), 从而使得计算量和求解难度相对于单阶段电网规划均大大增加。

传统的数学优化方法无法直接处理此类问题, 通常需要对规划模型做一定的简化。文献[1]对模型进行线性化化简并将其分解为一个主问题 (第 1 规划阶段) 和若干个子问题 (其余规划阶段), 通过 L 型算法利用子问题对主问题的反复追加处理来达到对原问题的逼近, 进而求得规划方案。但一方面线性化化简会造成模型上的误差, 另一方面模型的分解无法保证解空间不发生丢失, 对于大系统, 往往只能求得满意解, 而无法得到原问题的真正最优解。现代启发式算法无需对问题进行化简, 能够从整体优化的角度出发去寻求问题的最优解, 成为近年来处理输电网络规划问题的有效工具。文献[2, 3]中采用遗传算法 (GA) 来求解多阶段输电网络规划问题, 取得了不错的效果。但是遗传算法需要构造大量初始可行解, 一方面, 初始可行解的构造增加了初始计

算量, 另一方面, 初始解群的模式构成会对算法的全局收敛性产生影响。由于选择算子依据适应度值选择个体, 这会导致具有很高适应度值的个体被大量繁殖, 而其他个体被淘汰, 造成模式丢失^[4], 从而提前收敛于某一局部最优解; 交叉算子只能加强模式内部局部搜索, 但无法解决模式丢失问题; 变异算子能够找回已丢失的模式并产生新的模式, 从而避免未成熟收敛, 但过小的变异率无法有效阻止模式丢失和跳出局部最优, 而过大的变异率又将导致盲目随机搜索。

蚁群算法^[5] (ACA——ant colony algorithm) 模仿蚂蚁觅食机理, 通过状态转移准则依概率搜索前进路径, 以信息素 (pheromone) 强度的局部和全局更新来控制和优化搜索方向。近年来, ACA 已被应用于单阶段电网规划问题^[6, 7], 并取得了不错的效果。文献[6]中提出的算法搜索空间过大、效率较低, 处理大规模网络时效果不佳, 文献[7]提出了一种改进的蚁群算法, 具有更高的效率。蚁群算法无需初始可行解^[7], 可以减少初始工作量及避免因初始可行解的不同而对后续搜索过程产生的影响, 有其优越性。但如何应用蚁群算法解决更为复杂的多阶段输电网络最优规划问题, 却尚未得到很好的研究。而且由于蚁群算法是一类随机性优化算法, 其搜索效果与它的参数设置、种群规模等多种因素有关, 有可能出现未成熟收敛, 需加以改进。

本文将给出 MTNOP 问题的模型, 并针对其解的构成特征, 提出一种并行蚁群算法 (PACA) 进行求解。并行计算在提高运行速度的同时有效地解决了参数设置、种群规模等对计算的影响。

1 MTNOP 问题的数学模型

MTNOP 就是在满足约束的条件下寻找一个最优方案,该方案在整个规划期内的投资和运行费用的贴现值之和最小^[3]。当采用蚁群算法求解电网规划模型时,最核心的问题是对决策变量(线路)的合

$$\begin{cases} \min f(\mathbf{Z}) = \begin{cases} \sum_{s=1}^{N_p} \left(\sum_{i=1}^N \frac{C_i z_{is} + O_s(\mathbf{Z})}{(1+r)^{Y(s-1)}} + C_0 P_s(\mathbf{Z}) \right) \\ C_D \end{cases} \\ \text{s. t. } \sum_{s=1}^{N_p} z_{is} \leq \bar{z}_i \\ \text{各阶段 KCL 和 KVL 平衡约束} \end{cases} \quad \begin{cases} \sum_{s=1}^{N_p} B_s = N_p \\ \sum_{s=1}^{N_p} B_s > N_p \end{cases} \quad (1)$$

式中: $f(\mathbf{Z})$ 为评价函数,表示总投资、运行费用和过负荷罚函数的贴现值; $\mathbf{Z}$ 是一个 $N \times N_p$ 维向量,表示一个规划方案, $\mathbf{Z} = [(z_{11}, \dots, z_{1N_p}), \dots, (z_{i1}, \dots, z_{iN_p}), \dots, (z_{N1}, \dots, z_{NN_p})]$, N 是待选线路走廊的数目, N_p 是规划阶段数; z_{is} 表示第 i 条待选线路走廊在规划方案第 s 阶段中的扩建回路数,取值范围为 $\{0, 1, \dots, \bar{z}_i\}$, $\bar{z}_i$ 是第 i 条待选线路走廊在整个规划期内的最大可扩建回路数; r 为贴现率; $Y(s) =$

$\sum_{l=1}^s y(l)$, 为规划期初始到第 s 阶段末的总年数, $y(l)$ 为第 l 阶段的年数; C_i 为第 i 条待选线路走廊每回路的建设费用; B_s 为规划方案在第 s 阶段中所包含的

孤立子系统与孤立节点的总数目, $\sum_{s=1}^{N_p} B_s = N_p$ 表示规划网络在所有阶段都是连通的, $\sum_{s=1}^{N_p} B_s > N_p$ 表示

该规划网络至少在某一阶段是不连通的; $O_s(\mathbf{Z})$ 为系统在第 s 阶段的运行费用; $P_s(\mathbf{Z})$ 为规划方案在第 s 阶段中出现的所有过负荷总量; C_0 为过负荷惩罚系数; C_D 为一很大的常数,表示系统不联通时的惩罚系数。

2 传统 ACA 的寻优过程及未成熟收敛现象

2.1 ACA 的寻优过程

ACA 算法的核心思想是依状态转移概率来随机搜索解空间;通过信息素的局部更新,按照当前解的评价函数值调整局部搜索方向;通过信息素的全局更新,按照当前最优解的评价函数值调整全局搜索方向。主要有 6 步工作^[7],其中核心步骤如下。

2.1.1 状态转移概率的确定

状态转移准则如下。

如果 $q \leq q_0$, 则

$$\rho_j^{i,s}(k) = \begin{cases} 1 & \max_{k \in L_j(i,s)} \{\tau_j^{i,s}(k)\} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

理建模和处理,而约束条件的选取对算法的收敛性没有影响。为了便于说明问题,这里只考虑基态运行方式下的过负荷约束。

MTNOP 问题可用下述模型来描述:

否则,

$$\rho_j^{i,s}(k) = \begin{cases} \frac{\tau_j^{i,s}(k)}{\sum_{k \in L_j(i,s)} \tau_j^{i,s}(k)} & k \in L_j(i,s) \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

式中: q 为一个在 $[0, 1]$ 区间上均匀分布的随机变量; q_0 是一常数, $0 \leq q_0 \leq 1$, q_0 越小,则越趋向于依概率探索新的空间,即趋向于全局搜索, q_0 越大,则搜索更趋向于直接利用已有信息,即趋向于局部搜索; $\rho_j^{i,s}(k)$ 为蚂蚁 j 在第 i 步第 s 阶段选择前进路径 k 的转移概率; $\tau_j^{i,s}(k)$ 为蚂蚁 j 第 i 步选择第 s 阶段前进路径时路径 k 上的信息素强度; $L_j(i, s)$ 为蚂蚁 j 第 i 步第 s 阶段所能选择的所有前进路径。

2.1.2 信息素强度的局部更新

信息素的局部更新准则如下:

$$\tau(k) = (1 - \alpha_0) \tau(k) + \alpha_0 \Delta \tau(k) \quad (4)$$

式中: $\Delta \tau(k)$ 有多种取法,一般与当前搜索方案的评价函数值成反比^[7]; $0 < \alpha_0 < 1$ 为局部挥发系数, α_0 越小,则信息素的更新受当前方案的影响越小,算法越趋向于全局搜索, α_0 越大,则信息素的更新受当前方案的影响越大,算法越趋向于局部搜索。

2.1.3 信息素强度的全局更新

信息素的全局更新准则如下:

$$\tau(k) = \begin{cases} (1 - \alpha_1) \tau(k) + \alpha_1 \Delta \tau(k) & k \in \mathbf{Z}_{\text{opt}} \\ (1 - \alpha_1) \tau(k) & \text{其他} \end{cases} \quad (5)$$

式中: $\mathbf{Z}_{\text{opt}}$ 为当前最优解; $\Delta \tau(k)$ 有多种取法,一般与当前最优方案的评价函数值成反比^[7]; $0 < \alpha_1 < 1$ 为全局挥发系数,同样, α_1 越小,则信息素的更新受当前最优方案的影响越小,算法越趋向于全局搜索, α_1 越大,则信息素的更新受当前最优方案的影响越大,算法越趋向于局部搜索。

2.2 ACA 中的未成熟收敛现象

采用 ACA 解决实际问题时,常常会出现未成熟收敛,主要原因有以下几点:

a. 算法的收敛效果对其参数 q_0, α_0, α_1 等相当敏感,而这些参数通常根据问题类型和规模,采用试探法求取,它们的不同设置,可能导致最终寻优结果完全不同,造成未成熟收敛。

b. 通过正反馈性的信息素全局更新(式(5))可以看出,某一具有较好评价函数值的局部最优解的过早出现可能会使后续搜索被其“吸引”而产生停滞现象。

c. 随着迭代次数的增加,某些路径上的信息素强度可能会变得过大或过小,导致在某些位置上路

径选择受限。

d. 种群规模对算法的收敛性影响较大,种群规模过小,则计算中解群差异度低,容易产生停滞;种群规模过大,又将造成计算量过大,由于前面几点的原因,这些大量的计算很可能是无效的。

3 MTNOP 问题的并行蚁群算法

3.1 一只人工蚂蚁搜索一个规划方案的过程

蚂蚁搜索 MTNOP 规划方案过程如图 1 所示。

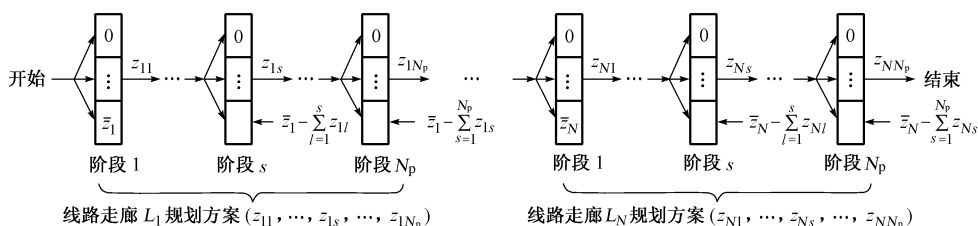


图 1 MTNOP 方案示意图
Fig. 1 Sketch map of MTNOP

蚂蚁先选择第 1 条线路走廊 L_1 的扩建方案,在第 s 阶段,蚂蚁按状态转移准则从 $0 \sim (\bar{z}_1 - \sum_{l=1}^s z_{1l})$ 中选择一个数作为 L_1 在第 s 阶段的实际扩建回路数。接着,蚂蚁依次选择其余线路走廊的扩建回路数,从而得到一个规划方案 $Z = [(z_{11}, \dots, z_{1N_p}), \dots, (z_{i1}, \dots, z_{iN_p}), \dots, (z_{N1}, \dots, z_{NN_p})]$ 。

3.2 ACA 的改进——PACA

可以构造如下的 PACA,来消除或减少前述 ACA 中的未成熟收敛问题:

- 采用主/从并行结构处理器。
- 在每个从处理器中,各自定义一组人工蚂蚁,独立完成前述 ACA 寻优过程并保持与主处理器的通信交互,其中,每组人工蚂蚁各自的 q_0, α_0, α_1 等参数各不相同。
- 针对某些路径上信息素强度过大或过小的情况,采用 MAX-MIN ant system (MMAS)^[8] 中的方法,给信息素强度设定最大和最小阈值。
- 在主处理器中,设立一个 Tabu 表,用来保存当前搜索到的较好的规划方案及各自对应的评价函数值,后续搜索方案如不在该表内,则按式(1)计算其评价函数值,否则,直接读取评价函数值。
- 在主处理器中,设立一个全局变量,用来存储当前搜索到的全局最优路径并保持其动态更新,在采用信息素强度的全局更新来调整搜索方向时,是以该全局最优路径为参考方向。

3.3 PACA 求解 MTNOP 问题时的详细流程

图 2、图 3 分别给出了主/从处理器的算法实现流程。

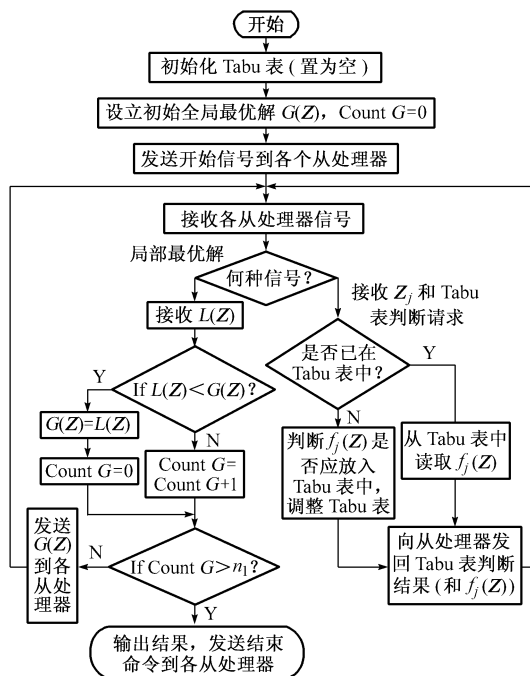


图 2 主处理器流程
Fig. 2 Flow chart of the master processor

说明:

- 在从处理器中,当按式(4)进行信息素局部更新时, $\Delta\tau(k) = D_0 / \lg(f_j(Z) - D)$;按式(5)进行信

息素全局更新时, $\Delta\tau(k) = D_1 / \lg(G(Z) - D)$ 。 D 为常数, D_0, D_1 为系数。由于按式(1)计算出来的评价函数值通常很大, 而且在数轴上分布很密, 尤其在最优解的邻域内, 可能分布着很多次优解, 这些解在数值上差别不大, 通过数轴原点平移并取对数的比例之窗, 可以更好地体现出不同评价函数值之间的细微差别, 更有利于搜索方向的鉴别。

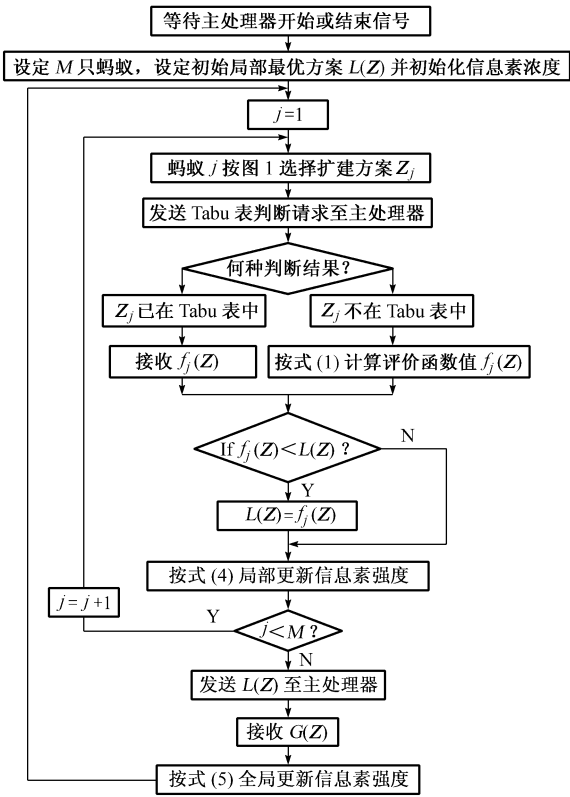


图 3 从处理器流程
Fig. 3 Flow chart of the slaver processors

b. 计算结束的判断标准是经过连续 n_1 组搜索全局最优解仍未得到更新。

3.4 PACA 优点分析

根据这样得到的 PACA, 与传统的 ACA 相比,

有以下优点:

- a. 多组人工蚂蚁的并行搜索可以大大加快收敛速度。
- b. 在 ACA 中, 由于 q_0, α_0, α_1 等参数值对最终收敛结果影响很大, 在实际中往往能够通过试探法得到一些可行参数组合, 而每一种可行参数组合可能会在某一方面具有优势, 但通常难以寻找到在局部和全局收敛性方面均为最优的参数组合。在 PACA 中, 每组人工蚂蚁设以不同的参数组合, 可以实现它们的优势互补, 兼顾全局搜索和局部搜索。
- c. 多组蚂蚁并行搜索, 可以在很大程度上避免因某一局部最优解过早出现而使后续解被它“吸引”所造成的搜索停滞。
- d. 将蚁群规模“化整为零”, 既能保证群体搜索优势, 又能有效地减少“无效”搜索的出现。
- e. 多组人工蚂蚁共用同一全局最优解, 从而实现了信息共享, 不同组的蚂蚁之间通过在进行全局更新时共用这一全局最优解, 达到相互之间调整、校对搜索方向的目的。

4 算例分析

本文基于消息传递接口(MPI)平台以百兆以太网为通信介质将 6 台 P4 计算机连接起来实现并行计算。算例系统为巴西北部-东北部高压电网, 共 87 个节点, 183 条待选线路走廊, 每条线路走廊最大可扩建回路数为 12。整个规划期分为 2 个阶段(1998 年~2001 年和 2002 年~2008 年), 其详细数据见文献[9], 原始网络图见文献[10]。在后面的计算中, D_0 取为 8.2, D_1 取为 8.5, D 取为 30×10^8 美元, 贴现率 $r = 0.1$ 。

定义 5 组人工蚂蚁, 每组 30 只, q_0, α_0, α_1 参数组合为 (0.5, 0.12, 0.12), (0.45, 0.15, 0.15), (0.55, 0.10, 0.10), (0.5, 0.10, 0.15), (0.5, 0.15, 0.10), 大约 3 min 左右可得到最优方案, 见表 1。

表 1 87 节点系统最优规划方案
Table 1 The optimal plan of the 87-bus system

规划方案	阶段 1	阶段 2	评价函数值/ 亿美元
最优方案	2-87(2), 3-83, 3-87(2), 4-32, 4-81, 5-56, 5-60, 8-73, 11-12(2), 12-17, 12-84, 13-15(3), 14-59, 15-16(4), 16-44(6), 16-61, 16-77, 17-18, 18-50(6), 19-20(2), 21-57, 22-58(2), 24-43, 25-55(2), 26-54(2), 30-31, 30-63(2), 33-67, 39-86, 40-45(2), 41-64(2), 43-55, 43-58, 48-49(2), 49-50, 52-59, 54-63, 54-79(2), 56-57, 58-78(2), 60-66, 61-85(2), 62-72, 63-64, 65-87, 67-71(2), 68-69, 68-83(2), 71-72, 72-73, 73-74, 75-82, 75-83, 76-82, 78-80, 79-82, 80-83	1-2, 4-60(2), 4-68(2), 4-81(2), 12-15, 12-17(2), 13-14, 13-15, 14-45, 17-18(3), 18-50(5), 18-74, 21-57, 25-55, 27-53, 39-86, 41-64, 42-85, 43-55, 43-58, 48-49(2), 48-50(7), 52-59, 53-76(3), 53-86(2), 54-63, 61-85(2), 61-86(2), 67-69, 68-83, 70-82, 75-81, 75-82	30.785 296

注: 括号内的数字表示扩建回路数。

此处最优评价函数值与文献[2]中不同,主要有2点原因:

a. 在文献[2]中,认为没有电源和负荷的节点可以不出现在规划网络中;而本文中,认为规划网络必须包括所有节点。

b. 文献[2]中的贴现系数是 $(1-r)^{Y(s-1)}$,而本文中的贴现系数更为准确,为 $(1+r)^{-Y(s-1)}$ 。

为了比较 PACA 相对于 ACA 的改进,同时用 ACA 对该算例系统进行了计算,见表 2。

表 2 PACA 与 ACA 分析比较
Table 2 Comparisons between PACA and ACA

方法	最优方案投资/亿美元	求解时间/s	搜索到最优方案概率/(%)	平均最优方案投资/亿美元
PACA	30.785 296	180~185	94	30.812 752
ACA	30.785 296	630~645	68	31.259 843

注:每种算法均进行了 50 次运算。

由表 2 可以看出:

a. 采用 PACA 和 ACA 均能以较大的概率搜索到全局最优规划方案。

b. 采用 PACA 时,收敛速度快得多,加速比 $S_p = t_{ACA}/t_{PACA} = 3.40 \sim 3.58$,并行效率 $E_p = 0.57 \sim 0.60$ 。

c. 本文中 PACA 有 47 次搜索到了全局最优解,而 ACA 则有 34 次,PACA 搜索成功率比 ACA 提高了 26%。

5 结语

本文针对 MTNOP 问题的特点及传统 ACA 的常见问题,采用 PACA 来解决 MTNOP 问题,主要有以下一些优点:①无需初始可行解;②能有效减少因参数设置和种群规模而引起的未成熟收敛;③采用 Tabu 表,减少重复搜索;④采用“比例之窗”,可更好地体现不同解对应目标函数值的区别,从而更充分地搜索可行域。对 87 节点算例的分析表明,该方法是行之有效的,有着良好的应用前景。

本文着重介绍了 PACA 求解 MTNOP 问题的过程和优势,采用的规划模型较为简单,但已充分说明问题。本文算法并行效率不高,原因之一是各个处理器搜索空间并不独立,易发生重复搜索。进一步的工作包括:完善规划模型、全面考虑各种安全约

束、如何更有效地避免重复搜索以及如何采用更有效的并行策略等。

参考文献

- 张洪明,傅勇,侯志俭,等(Zhang Hongming, Fu Yong, Hou Zhijian, et al). 基于 L 形算法的多阶段电网规划(New Approach for Multistage Power Network Planning Based on L-shape Algorithm). 上海交通大学学报(Journal of Shanghai Jiaotong University), 1999, 33(4): 482~484
- Antonio H, Gallego R A, Romero R. Multistage and Coordinated Planning of the Expansion of Transmission Systems. IEEE Trans on Power Systems, 2004, 19(2): 735~744
- 毛玉宾,王秀丽,王锡凡(Mao Yubin, Wang Xiuli, Wang Xifan). 多阶段输电网络最优规划的遗传算法(Genetic Algorithm for the Optimal Multistage Transmission Network Planning). 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems), 1998, 22(12): 13~15
- 熊伟清,魏平,赵杰煜(Xiong Weiqing, Wei Ping, Zhao Jieyu). 遗传算法的早熟现象研究(Research on the Premature Convergence of Genetic Algorithms). 计算机应用研究(Computer Application Research), 2001(9): 12~14
- Dorigo M, Gambardella L M. Ant Colony System: A Cooperative Learning Approach to the Traveling Salesman Problem. IEEE Trans on Evolutionary Computation, 1997, 1(1): 53~66
- 陈根军,王磊,唐国庆(Chen Genjun, Wang Lei, Tang Guoqing). 基于蚁群最优的输电网络扩展规划(An Ant Colony Optimization Method for Transmission Network Expansion Planning). 电网技术(Power System Technology), 2001, 25(6): 21~24
- 翟海保,程浩忠,陈春霖,等(Zhai Haibao, Cheng Haozhong, Chen Chunlin, et al). 基于改进蚁群算法的输电网络扩展规划(Transmission Network Expansion Planning Based on Improved Ant Colony Algorithm). 中国电力(Electric Power), 2003, 36(12): 49~52
- Stutzle T, Holger H. MAX-MIN Ant System. Future Generation Computer System, 2000, 16(8): 889~914
- Romero R, Monticelli A, Garcia A, et al. Test System and Mathematical Models for Transmission Network Expansion Planning. IEE Proceeding—Generation, Transmission and Distribution, 2002, 149(1): 27~36
- Romero R, Gallego R A, Monticelli A. Transmission System Expansion Planning by Simulated Annealing. IEEE Trans on Power Systems, 1996, 11(1): 364~369

翟海保(1978—),男,博士研究生,从事电力系统规划方面的研究。E-mail: zhaihaibao@hotmail.com

程浩忠(1962—),男,博士,教授,博士生导师,从事电力系统规划等方面的研究。

吕千云(1976—),男,博士研究生,从事电能质量、电网规划等方面的研究。

PARALLEL ANT COLONY ALGORITHM FOR THE MULTISTAGE TRANSMISSION NETWORK OPTIMAL PLANNING

Zhai Haibao¹, Cheng Haozhong¹, Lü Ganyun¹, Chen Chunlin², Jiang Fengqing², Fang Lingfeng²

(1. Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

(2. Shanghai Municipal Electrical Power Company, Shanghai 200002, China)

Abstract: Multistage transmission network optimal planning (MTNOP) is a complex nonlinear combinatorial optimization problem, which cannot be well solved by traditional optimization methods. Ant colony algorithm (ACA), a recently emerged

meta-heuristic method, is highly efficient for quickly finding high quality solutions to combinatorial optimization problems. But, it is inclined to premature convergence problems. In this paper, firstly, the mathematical model of MTNOP problem is introduced and the vector of its solution is also proposed. Then, after discussing the premature convergence of ACA in detail, a parallel ant colony algorithm (PACA) is introduced to solve the MTNOP problem. In PACA, no initial feasible solutions are needed, and the local search and global search are harmonized effectively. Compared with ACA, PACA can not only enhance the computation speed, but also solve the premature convergence caused by the inappropriate set of parameters and colony size. The simulation results for an 87-bus sample system, although preliminary, show its advantage on computation speed and convergence.

This work is jointly supported by National Natural Science Foundation of China (No. 50177017) and Teaching and Research Award Program for Outstanding Young Teachers in Higher Education Institutions of MOE, China.

Key words: transmission network; multistage planning; optimal planning; ant colony algorithm; parallel ant colony algorithm; message propagation interface (MPI)

