

# 遗传蚁群融合算法及在不确定性无功优化中的应用研究

周申培<sup>1,2</sup>, 严新平<sup>2</sup>

(1. 武汉理工大学自动化学院, 湖北 武汉 430070;

2. 武汉理工大学水路公路交通安全控制与装备教育部研究中心, 湖北 武汉 430063)

**摘要:** 在双层规划的理论基础上, 针对电网无功优化中的负荷不确定性问题, 建立了以网损最小为上层优化目标、以满足电压约束条件为下层优化目标的电力系统无功优化模型。并将遗传算法和蚁群算法结合起来用于求解, 采用遗传算法生成信息素的初始分布, 利用蚁群算法求精确解。以 IEEE30 节点系统作为试验系统, 验证了无功优化模型及算法的正确性和有效性。

**关键词:** 无功优化; 双层规划; 融合算法; 遗传算法; 蚁群算法

## The fusion algorithm of genetic and ant colony and its application in uncertain reactive power optimization

ZHOU Shen-pei<sup>1,2</sup>, YAN Xin-ping<sup>2</sup>

(1. School of Automation, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China; 2. Engineering Research Center of Transportation Safety, Ministry of Education, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China)

**Abstract:** Based on bi-level programming theory, a reactive power optimization model for power system is proposed to solve the problem of uncertain load. On the upper level, the sum of transmission loss is minimized, while the lower level optimization ensures that voltage constraints are satisfied. The fusion algorithm of genetic and ant colony algorithm adopts genetic algorithm to give pheromone to distribute, and then it makes use of ant colony algorithm to give the precision of the solution. Furthermore, the numerical example of IEEE 30-bus system is employed to validate the correctness and effectiveness of the model and algorithm.

**Key words:** reactive power optimization; bi-level programming; fusion algorithm; genetic algorithm; ant colony algorithm

中图分类号: TP273 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)24-0120-04

## 0 引言

电力系统无功优化一直是电力系统研究和工程实践领域的重要内容。它是一个多变量、多约束的混合非线性规划问题, 其控制变量既有连续变量又有离散变量, 且目标函数不可微, 这使得整个建模和求解过程都十分复杂。同时, 由于电力系统实际运行中存在不确定性, 因此, 采用合理的规划方法, 将不确定性问题的处理与最优化方法有机结合起来, 并使用快速可靠的求解算法非常重要。

双层规划模型<sup>[1]</sup>最大的优点在于它能找到一个各方面协调的近似最优解, 适于解决不确定性的无功优化问题。文献[2]在解决此类参数不确定性优化问题的时候, 采用了双层优化这一核心技术, 并初步地模拟了不确定性对电力无功优化问题的影响, 取得了一定的成效。文献[3]提到了双层优化在电力

输送容量研究中的运用, 较好地模拟了不确定性对电力输送容量问题的影响。

但是双层规划模型的使用一直受到限制, 因为双层规划模型是一个 NP-hard 问题, 同时也是一个非凸优化问题, 所以它的求解是非常困难的。在现有计算机运行速度非常高的情况下, 智能优化算法在求解双层规划模型上有着良好的应用前景, 有待进一步研究<sup>[4]</sup>。

本文运用双层优化原理, 针对无功优化问题中负荷的不确定性, 建立了不确定性无功优化的双层规划模型, 并将遗传算法和蚁群算法有机融合, 对此模型进行求解, 最后通过 IEEE30 节点系统的仿真计算, 表明本文提出的模型及其求解算法在处理负荷不确定性无功优化方面具有明显的优势。

## 1 遗传蚁群融合算法

遗传算法(GA)是一类借鉴生物界的进化规律

演化而来的随机化搜索方法。美国的 John Holland 教授于1975年首先阐述了遗传算法的基本理论和方法, 并提出了对遗传算法的理论研究和发展极为重要的模式理论。同年, De Jong 将 Holland 的模式理论与他的计算实验结合起来, 并提出了诸如代沟等新的遗传操作技术。可以认为, De Jong 所作的研究工作是遗传算法发展过程中的一个里程碑<sup>[5]</sup>。1989年, Goldberg 出版了《搜索、优化和机器学习中的遗传算法》一书<sup>[6]</sup>, 为这一领域奠定了坚实的科学基础。进入20世纪90年代以后, 遗传算法迎来了兴盛发展时期, 无论是理论研究还是应用研究都成了十分热门的课题, 尤其是遗传算法的应用领域不断扩大。目前遗传算法所涉及的主要领域有自动控制、组合优化、信号处理、人工生命等, 它已成为现代重要的智能算法之一。

作为一种全局优化搜索算法, 遗传算法的主要特点是直接对结构对象进行操作, 不存在求导和函数连续性的限定; 具有内在的隐并行性和较好的全局寻优能力, 鲁棒性强; 采用概率化的寻优方法, 能自动获取和指导优化搜索空间, 自适应地调整搜索方向, 不需要确定的规则。但其缺点是: 对于系统中的反馈信息利用不够, 局部搜索能力相对较弱, 在计算后期易出现进化缓慢、过早收敛等问题, 求精确解效率低。

蚂蚁算法(AA)是一种基于群体的仿生优化算法。意大利学者 M. Dorigo 等人受蚁群行为规律的启发, 通过模拟自然界蚂蚁搜索路径的行为, 首次提出了这种算法。1997年, Dorigo 在蚂蚁算法的基础上提出了蚁群系统<sup>[7]</sup>。与蚂蚁算法相比, 蚁群系统引入了局部信息素更新, 从而扩大了算法的搜索空间, 有效地避免了算法陷入局部最优。目前, 蚁群算法已被广泛用于众多领域, 例如旅行商问题、指派问题、Job-shop 调度问题、车辆路由问题等。

作为一种分布式的优化方法, 蚁群算法的原理是一种正反馈机制; 在求解性能上, 具有很强的鲁棒性和搜索较好解的能力。但其缺点是: 初期信息素匮乏, 收敛速度慢, 易陷入局部最优。

遗传蚁群融合算法结合了遗传算法和蚁群算法的优势, 避免各自的不足, 是时间效率和求解效率都比较好的一种新的启发式方法。其基本思路是算法前过程采用遗传算法, 充分利用遗传算法的快速性、随机性、全局收敛性, 其结果是产生有关问题的初始信息素分布。算法后过程采用蚁群算法, 在有一定初始信息素分布的情况下, 充分利用蚁群算法的并行性、正反馈性、求精确解效率高等特点, 使算法快速收敛于最优解。其总体框架如图1所示。

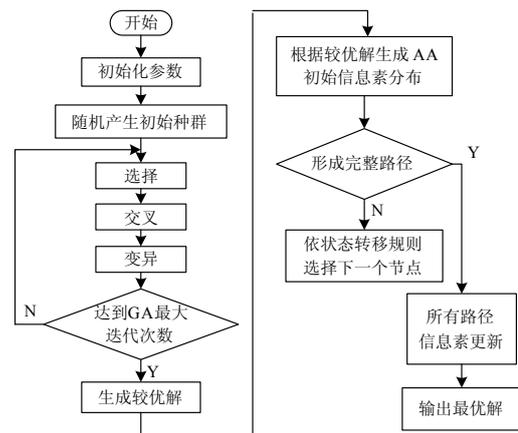


图1 融合算法总体框架图

Fig.1 Frame diagram of the fusion algorithm

文献[4]通过选用 camel 函数作为测试函数对算法的优化性能作了对比分析, 从优化结果可以看出, 遗传蚁群融合算法能较好地处理多局部最优解问题。

## 2 不确定性无功优化的双层规划模型

文献[2]提供了不确定性无功优化的双层规划模型, 但为简化问题, 忽略了主变分接头的影响和一些约束条件<sup>[2]</sup>。本文建立的模型在此基础上对其加以细化实现, 并将其理想化忽略的约束考虑进去。因为采用遗传蚁群融合算法, 后续模型求解的精确性和实时性在一定程度上可以得到保证。

### 2.1 上层数学模型

双层规划模型的上层采用无功优化的数学模型, 以有功网损最小作为优化目标, 选择发电机节点电压幅值、无功补偿源节点的注入无功及变压器的可调分接头作为控制变量, 表述为<sup>[8]</sup>:

$$\min P_L = \sum_{k \in N_E} P_{kloss} = \sum_{\substack{i \in N_M \\ j \in N_i}} G_{ij} (V_i^2 + V_j^2 - 2V_i V_j \cos \theta_{ij}) \quad (1)$$

式中:  $P_L$  为系统的有功损耗;  $P_{kloss}$  为第  $k$  条支路的有功损耗;  $N_E$  为网络所有支路的集合;  $N_M$  为系统中所有母线的集合;  $N_i$  为与第  $i$  条母线相连的所有母线的集合, 含第  $i$  条母线。

节点功率平衡约束为:

$$\begin{cases} P_{Gi} - P_{Di} = V_i \sum_{j \in N} V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \\ Q_{Gi} - Q_{Di} + Q_{Ci} = V_i \sum_{j \in N} V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \end{cases} \quad i \in N \quad (2)$$

式中： $N$  为电网节点总数； $P_{Gi}$ 、 $P_{Di}$  为节点  $i$  的发电机和负荷的有功功率； $Q_{Gi}$ 、 $Q_{Di}$ 、 $Q_{Ci}$  为节点  $i$  处发电机和负荷的无功功率及容性无功补偿容量。

控制变量约束为：

$$\begin{cases} V_{Gi,\min} \leq V_{Gi} \leq V_{Gi,\max} & i \in N_G \\ Q_{Ci,\min} \leq Q_{Ci} \leq Q_{Ci,\max} & i \in N_C \\ T_{Bi,\min} \leq T_{Bi} \leq T_{Bi,\max} & i \in N_B \end{cases} \quad (3)$$

式中： $N_G$ 、 $N_C$ 、 $N_B$  为发电机节点数、无功补偿节点数和变压器分接头数； $V_{Gi}$  为发电机节点电压； $Q_{Ci}$  为无功补偿节点无功补偿量； $T_{Bi}$  为变压器分接头。

状态变量约束为：

$$\begin{cases} Q_{Gi,\min} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi,\max} & i \in N_G \\ V_{Di,\min} \leq V_{Di} \leq V_{Di,\max} & i \in N_D \\ q_{Bk,\min} \leq q_{Bk} \leq q_{Bk,\max} & i \in N_E \end{cases} \quad (4)$$

式中： $N_D$  为负荷节点数； $Q_{Gi}$  为发电机无功出力； $V_{Di}$  为负荷节点电压； $q_{Bk}$  为支路无功功率。

### 2.2 下层数学模型

在电力系统实际运行中，负荷总是不断变化的。这里假设负荷是不确定的，即负荷的有功功率  $P_D$ 、无功功率  $Q_D$  在某个范围内变化。于是，在进行无功优化时，当  $P_D^* \in [\underline{P}_{Di}, \overline{P}_{Di}]$ ，

$Q_D^* \in [\underline{Q}_{Di}, \overline{Q}_{Di}]$ ，应有

$$V_k^* \geq \underline{V}_k \quad (5)$$

下层模型的优化目标：

$$\min V_k^* \quad k \in N \quad (6)$$

S.T.

$$\begin{cases} P_{Gi} - P_{Di} = V_i^* \sum_{j \in N} V_j^* (G_{ij} \cos \theta_{ij}^* + B_{ij} \sin \theta_{ij}^*) & i \in N \\ Q_{Gi} - Q_{Di} + Q_{Ci} = V_i^* \sum_{j \in N} V_j^* (G_{ij} \sin \theta_{ij}^* - B_{ij} \cos \theta_{ij}^*) & i \in N \\ P_{Di,\min} \leq P_{Di}^* \leq P_{Di,\max} & i \in N_p \\ Q_{Di,\min} \leq Q_{Di}^* \leq Q_{Di,\max} & i \in N_p \end{cases} \quad (7)$$

式中： $V_k^*$  为节点  $k$  的电压幅值； $V^*$  变量是下层模型节点电压幅值构成的向量； $\theta^*$  是节点电压相角构成的向量； $P_D^*$  和  $Q_D^*$  分别为下层模型节点负荷的有功功率和无功功率构成的向量； $N_p$  为负荷变化的节点数。

其中， $V_k^*$  作为上层模型和下层模型共同的决策变量，上下层通过式 (5) 来联系和相互协调，使得整个双层规划模型在求解的过程中既能体现上层目标函数的最优，又确保了在负荷变动情况下所有节点的电压水平都在额定范围内。

### 3 IEEE30 节点算例分析

IEEE30 节点系统包含 6 台发电机、4 台可调变压器和 9 台无功补偿设备。节点 1、2、5、8、11、13 为发电机节点，其中节点 1 作为平衡节点；支路 9-6、6-10、12-4、28-27 为变压器支路。变量  $V_{19}, V_{20} \in [0.95, 1.05]$ ，初始值均为 1.0。对节点负荷做如下调整，如表 1 所示。

表 1 不确定性负荷数据

Tab.1 The parameters of uncertain load						
节点	有功变化上限	有功变化下限	$P_D$	无功变化上限	无功变化下限	$Q_D$
7	0.250 8	0.205 2	0.228	0.125 35	0.092 65	0.109
12	0.123 2	0.100 8	0.112	0.09	0.06	0.075
21	0.21	0.14	0.175	0.134 4	0.089 6	0.112

采用遗传蚁群融合算法对该系统进行无功优化计算，算法参数选取为：遗传算法的种群规模和蚁群算法中人工蚁的数量均为 50；采用单点交叉，交叉概率  $P_c=0.4$ ；采用简单变异，变异概率  $P_m=0.001$ ；遗传终止代数 500。

优化结果表明：在双层优化下，网损值为 0.070 127，比单层优化下的网损值 0.069 788 略有增加；双层优化的迭代次数为 27 次，计算时间为 1.55 s，比单层优化的迭代次数 11 次和计算时间 0.75 s 都有所增加。但本算例中的单层优化和双层优化无论从优化结果和运算效率上都比文献[9]的好，由此表明遗传蚁群融合算法在处理此类问题上的优势。

通过核实计算，在单层优化下，当负荷节点的有功、无功功率发生变化时，节点 19 和节点 20 的最小电压值偏离了节点额定电压的下限值。而在双层优化下，当负荷节点的有功、无功功率发生变化时，所有节点的电压都能保证在额定值范围内。这是因为单层规划的结果是针对确定的负荷得出的最优方案，当负荷在区间内变动时，其所对应的方案将不是最优的，而且可能造成局部电压过低或线路载荷越限的后果；而双层规划结果给出的是负荷在给定范围内变动时，系统网损最小的方案。因此当只确定负荷在某个范围内，但不确定在范围内的具体概率分布时，本文提出的双层规划方法可以给出一个满意的优化方案。

## 4 结语

为使电力系统更好地适应未来的实际运行情况, 在进行电力系统无功优化时, 应考虑不确定因素的影响。本文针对电力系统无功优化中的信息不确定问题, 以变动负荷为例, 建立了电力系统不确定性无功优化的双层规划模型, 并采用遗传蚁群融合算法解决了模型求解精度和速度的问题, 最后通过算例进行了有效性的验证。算例结果表明本文的模型和算法有效可行。

## 参考文献

- [1] BARD JF. Practical bi-level optimization algorithms and applications[M]. New York : Kluwer Academic Publishers, 1998.
- [2] 王函韵, 胡晔, 朱卫东, 等. 信息不确定性对电网无功优化的影响[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25 (13): 24-28.  
WANG Han-yun, HU Hua, ZHU Wei-dong, et al. The impact of parameter uncertainty on reactive source optimization[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25 (13): 24-28.
- [3] GAN D, LUO X, BOURCIER D V, et al. Min-max transfer capability of a transmission interface[J]. International Journal of Electrical Power and Energy System, 2003, 25: 347-353.
- [4] 周申培. 考虑排放因素的城市交叉口交通信号控制策略的研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2009.  
ZHOU Shen-pei. Research on traffic signal control strategies in urban intersections based on emission factors [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2009.
- [5] De Jong KA. An analysis of the behavior of a class of genetic adaptive systems[D]. University of Michigan, 1975.
- [6] Goldberg D E. Genetic algorithms in search, optimization and machine learning[M]. Addison-Wesley Publishing Company, 1988.
- [7] Marco Dorigo, Eric Bonabeau, Theraulaz Guy. Ant algorithms and strategy[J]. Future Generation Computer System, 2000, 16 (8): 851-871.
- [8] 丁玉凤, 文劲宇. 基于改进 PSO 算法的电力系统无功优化研究[J]. 继电器, 2005, 33 (6): 20-24.  
DING Yu-feng, WEN Jin-yu. Advanced PSO algorithm of reactive power optimization in power system[J]. Relay, 2005, 33 (6): 20-24.
- [9] 黄昌泽, 刘明波, 郝庆苑. 不确定性无功优化问题的双层规划解法[J]. 陕西电力, 2008, 12: 5-9.  
HUANG Chang-ze, LIU Ming-bo, HAO Qing-yuan. Bi-level programming solution considering uncertain factors for reactive power optimization[J]. Shaanxi Electric Power, 2008, 12: 5-9.
- 收稿日期: 2009-12-17; 修回日期: 2010-04-01  
作者简介:  
周申培 (1979-), 女, 讲师, 博士, 从事智能优化算法, 交通信号控制优化的研究; E-mail: zhousp@whut.edu.cn  
严新平 (1959-), 男, 教授, 博士, 从事智能交通系统的关键技术和算法研究。E-mail: xpyan@whut.edu.cn
- 
- (上接第 119 页 continued from page 119)
- [11] Milošević Borka, Begovic Miroslav. Nondominated sorting genetic algorithm for optimal phasor measurement placement[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2003, 18 (1): 69-75.
- [12] Abido M A. Multiobjective evolutionary algorithms for electric power dispatch problem[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2006, 10 (3): 315-329.
- [13] Mendoza Franklin, Bernal-Agustin José L, Domínguez-Navarro José A. NSGA and SPEA applied to multi-objective design of power distribution systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2006, 21 (4): 1938-1945.
- [14] 李良敏, 温广瑞, 王生昌. 遗传算法中遗传操作的改进策略[J]. 计算机应用与软件, 2009, 26 (6): 27-30.  
LI Liang-min, WEN Guang-rui, WANG Sheng-chang. On modified policy for genetic operations of genetic algorithm[J]. Computer Applications and Software, 2009, 26 (6): 27-30.
- [15] 石嘉川, 刘玉田. 中低压配电网电压优化调整[J]. 中国电力, 2005, 38 (1): 27-30.  
SHI Jia-chuan, LIU Yu-tian. Optimal voltage regulation in middle-low voltage distribution network[J]. Electric Power, 2005, 38 (1): 27-30.
- 收稿日期: 2010-01-04; 修回日期: 2010-03-12  
作者简介:  
闫若冰 (1986-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统无功优化规划;  
唐巍 (1971-), 女, 教授, 博士生导师, 研究方向为配电网经济安全运行、配电网可靠性评估。E-mail: wei\_tang@cau.edu.cn