

基于启发式蚁群算法的中压配电网规划方法研究

路志英, 葛亮, 陆洁

(天津大学电气与自动化工程学院, 天津 300072)

摘要: 结合数据库技术, 根据城市中压配电网规划问题的具体特征, 对基本蚁群算法中的信息素更新及其寻优方式进行了改进, 对基于启发式蚁群算法的中压配电网规划方法进行了研究。在变电站位置、供电区域及负荷分布已知情况下, 利用街道长度和负荷量的信息素和启发信息, 选取蚂蚁待选前进街道, 确定配电网的局部优化方案, 实现了以区域街道为配电网走廊的“辐射型”网络优化规划。算例表明该方法能够在保证计算速度的前提下, 有效地规划出符合规划要求的方案。方法稳定, 规划方案可行。

关键词: 配电网规划; 蚁群算法; 信息素; 启发信息; 辐射型

Research on medium-voltage distribution network planning based on heuristic ant colony algorithm

LU Zhi-ying, GE Liang, LU Jie

(School of Electrical Engineering and Automation, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: According to the specific characteristics of urban medium-voltage distribution network planning and combining database technology, a new medium-voltage distribution network planning method based on heuristic ant colony algorithm is studied, in which the pheromone updating strategy and optimization of ant colony algorithm are improved. When the substation location, power supply region and load distribution are known, the way that ants select is determined by using the pheromone and the heuristic information consisted of street length and load capacity. Then the distribution network local optimization proposal is determined. Finally, the optimized radial medium-voltage distribution network planning can be gotten which is distributed along the streets under the influence of local optimization. The experimental results show that the proposed method can make effective planning to meet planning requirements of the program and have appropriate calculation speed. The experimental results also prove that the proposed method is stable and the planning scheme is feasible.

Key words: distribution network planning; ant colony algorithm; pheromone; heuristic information; radial

中图分类号: TM715 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)15-0069-06

0 引言

配电网规划问题具有非线性、离散性、运行方式多样性、多阶段性的特点, 其求解是相当复杂的^[1]。

国内外学者研究和开发了各种配电网规划模型和算法, 如支路交换法^[2]是对辐射结构配电网的支路在其邻域内重复进行交换, 直到目标函数值最优, 但这种方法只能实现局部最优, 不能较好地解决实际问题。遗传算法^[3]是求解全局优化问题的随机搜索算法, 通过选择、杂交、变异等一系列算子的操作产生优良的迭代结果, 其效果在配电网规划中得到一定的认同, 但是, 遗传算法在计算过程中会产生大量的无用解^[4]。进化策略^[5]与遗传

算法一样属于模拟进化算法, 但更重视变异的作用。禁忌搜索算法^[6]是一种单线随机搜索算法, 同其他算法结合, 具有强大的全局搜索性能, 但局部搜索性能易受分散性的影响。模拟退火算法^[7]利用概率突跳性在解空间中随机寻找目标函数的全局最优解, 也与其他方法相结合应用到了配网规划中。但上述算法没有充分利用配电网规划领域的相关知识, 弱化了其在具体问题中的全局搜索能力, 使搜索效率较低。

本文在给定变电站选址规划的基础上, 根据规划区域的地理信息, 对启发式蚁群算法^[8]进行了改进, 实现了以城区街道为配电网基础结构的“辐射状”配电网规划。这种算法是针对全新的供电区域或开发区寻找辐射状网架规划方案, 与以往

的网络铺设方法^[1,4,7-12]相比较, 本文研究的基于启发式蚁群算法的中压配电网规划方法对实际工作更具有指导意义。

1 中压配电网规划的数学模型及约束条件

1.1 数学模型

中压配电网规划的数学模型是以线路的规化年综合费用最小为目标函数, 包括线路投资费用、网损费用。

$$f_{\min} = C_{\text{线路}} + C_{\text{网损}} \quad (1)$$

$$C_{\text{线路}} = \alpha \left[\frac{r_0(1+r_0)^{m_i}}{(1+r_0)^{m_i} - 1} \right] \sum_{i=1}^N \sum_{k \in J_i} l_{ik} \quad (2)$$

$$C_{\text{网损}} = \beta \sum_{i=1}^N \sum_{k \in J_i} P_{ik}^2 l_{ik} \quad (3)$$

其中: N 为变电站的个数; J_i 为构成第 i 个变电站辐射型线路的总数; l_{ik} 为第 i 个变电站的第 k 条线路的长度; m_i 为变电站低压侧线路折旧年限; r_0 为贴现率; α 为单位长度线路投资费用; P_{ik} 为第 i 个变电站第 k 条线路上的有功负荷; β 为线路网损折算系数。

1.2 约束条件

(1) 电压降必须在允许范围内

本文的电压降约束通过线路长度体现。根据负荷分布密度及大小, 在电压降允许范围内, 线路长度的取值范围可为 2~10 km。

(2) 每条线路容量不能超载

为了保证中压配电网的可扩展性, 每条辐射出线均保留了 50% 的裕量, 主干线路的导线均采用 240 电缆。

(3) 配电网结构呈辐射状网络结构。

(4) 网络规划线路必须沿城市街道铺设。

在进行线路铺设过程中, 如果有违反上述约束条件的方案, 则视为失败方案。

2 地理信息知识库的构建

2.1 知识库结构

本文以框架形式表示配网规划区域的地理信息, 进而构建出适用于配网规划的地理信息知识库。街区及负荷分布如图 1 所示。

地理信息知识库的结构如下:

(变电站供电范围

(变电站 (变电站 1

(坐标 (X 坐标值, Y 坐标值))

(容量 容量值))

(变电站 2

(坐标 (X 坐标值, Y 坐标值))

(容量 容量值))

.....)

(负荷 (负荷 1

(坐标 (X 坐标值, Y 坐标值))

(负荷量 负荷值))

(隶属变电站 变电站号))

(负荷 2))

(街道段^[12]节点 (节点 1

(坐标 (X 坐标值, Y 坐标

值)))

(节点 2))

(街道段号 (街道段 1

(端点 1 (节点号))

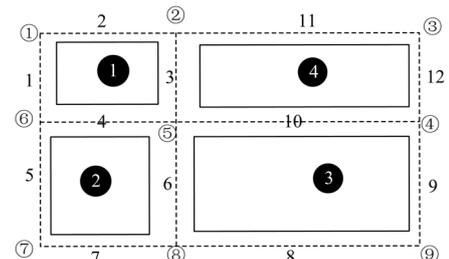
(端点 2 (节点号))

(相邻负荷 (相邻负荷 1 负荷号)

(相邻负荷 2)))

(街道段 2))

)



●~●—负荷号 ①~⑨—节点号 1~12—街道段号
图 1 街区及负荷空间分布示意图

Fig.1 Sketch map of the street and load positions

2.2 知识库实现

本文利用 C 语言对带有地理信息的负荷分布图 (如图 1) 进行识别, 提取所有街道段及其节点坐标、负荷坐标及负荷量等特征值, 然后对这些特征进行分类编号, 最后利用 SQLServer 数据库技术建立地理信息知识库, 所建数据库的部分信息如表 1~表 4 所示。

表 1 变电站信息

Tab.1 Information of the substations

substation_ID (变电站号)	X (横坐标/m)	Y (纵坐标/m)	Capacity (容量)
1	X1	Y1	C1
2	X2	Y2	C2
⋮	⋮	⋮	⋮

表 2 负荷信息

Tab.2 Information of the load

load_ID (负载号)	X (横坐标/m)	Y (纵坐标/m)	WIGHT (容量/kW)	BEG (隶属变电站)
①	X _{L1}	Y _{L1}	W1	1
②	X _{L2}	Y _{L2}	W2	1
③	X _{L3}	Y _{L3}	W3	1
④	X _{L4}	Y _{L4}	W4	1
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

表 3 街道信息

Tab.3 Information of the routes

route_ID (街道段号)	start (端点 1)	end (端点 2)	相邻负荷		BEG (隶属变电站)
			load_1	load_2	
1	①	⑥	①		1
2	②	②	①		1
3	③	⑤	①	④	1
4	④	⑥	①	②	1
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

表 4 节点信息

Tab.4 Information of the nodes

node_ID (节点号)	X (横坐标/m)	Y (纵坐标/m)
①	X _{N1}	Y _{N1}
②	X _{N2}	Y _{N2}
③	X _{N3}	Y _{N3}
⋮	⋮	⋮

利用地理信息知识库框架建立 GIS 知识库, 该库既能准确描述规划区域的街道信息、变电站供电范围及二者的相互关系, 又便于程序调用、查询与更新。

3 基于蚁群算法的配电网规划

3.1 蚁群算法的基本思想及特征

蚁群算法是受真实蚁群集体觅食行为的启发而提出的一种模拟仿生算法^[6]。

蚁群算法具有正反馈、分布式计算以及运用贪婪启发式搜索等特征。其中, 正反馈有助于快速发现问题的较好解; 分布式计算可避免在迭代过程中出现早熟现象; 而运用贪婪启发式搜索则可使搜索过程中较早地发现可接受解^[13]。尽管蚁群算法具有上述特点, 但基本蚁群算法依然存在收敛速度慢, 易陷入局部最优解的缺点。

基于蚁群算法的配电网规划方法, 将负荷看

作是蚂蚁所要寻找的“食物源”, 蚂蚁在铺线时, 根据具有启发信息的状态转移准则来决定其选择街道段。可有效地求得配电网规划问题的优化解。

本文对启发信息的状态转移准则, 即转移概率模型和信息素更新规则进行了改进设计, 以适用于配电网的优化规划问题。

3.2 变换状态转移准则

每只人工蚂蚁在第 i 个节点的运动方向, 即从待选路径中选择哪条街道段是由状态转移准则决定, 因此, 合理的状态转移准则既要以一定的概率服从现有最优解, 又要以一定的概率搜索新的可行解^[14]。

3.2.1 启发信息状态转移准则

在蚂蚁 j 选择前进路径 k_{selected} 时, 由具有启发信息的状态转移函数引导选路。具有启发信息的状态转移函数表示如下:

$$k_{\text{selected}} = \begin{cases} k_{\max} & \text{当待访问负荷数最多时} \\ k_{\text{short}} & \text{当待访问街道长度最短时} \\ k_{\text{probe}} & \text{其他} \end{cases} \quad (4)$$

其中: k_{\max} 为待选前进路径(街道段)中涉及待访问负荷数最多的街道段号; k_{short} 为待选前进路径中街道段长度最短的街道段号; k_{probe} 为由转移概率准则最终选择的街道段号。

按照街道段符合的条件, 顺次选择且只以其中一种方式选择街道段。

3.2.2 转移概率准则

本文采用伪随机比率作为择路规则。设 q 是一个分布在 $[0, 1]$ 区间上的随机变量, q_0 是一个常数, $0 \leq q_0 \leq 1$ 。

如果 $q \leq q_0$, 则

$$P_j(i, k) = \begin{cases} 1 & \max_{k \in R_j(i)} \rho_j(i, k) \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (5)$$

否则

$$P_j(i, k) = \begin{cases} \frac{\rho_j(i, k) - \alpha/d_k}{\sum_{r \in R_j(i), r \neq k} \rho_j(i, r) - \alpha/d_k} & k \in R_j(i) \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (6)$$

其中: $P_j(i, k)$ 为蚂蚁 j 在节点 i 处选择前进街道段 k 的转移概率; $\rho_j(i, k)$ 为蚂蚁 j 在节点 i 处选择前进街道段 k 上的信息素; d_k 表示前进街道段 k 的长度; α 为常数, 用来调节街道段长度对转移概率的影响程度; $R_j(i)$ 为蚂蚁 j 在节点 i 处所有待选前进

街道段的集合。

3.3 信息素更新原则

3.3.1 各街道段信息素的初始化

针对沿街铺设线路的特殊性, 各条街道段上初始信息素 $\tau(k,0)$ 由公式 (7) 获得, 即

$$\tau(k,0) = H + \frac{K_l}{d_k} \quad (7)$$

其中: H 为各街道段初始化的同等信息素, 保证蚂蚁有均等的机会走到各街道上; d_k 为街道段 k 的长度; K_l 街道段 k 两侧负荷总个数; K_l/d_k 反映每条街道段所含信息。

依据式 (7) 初始化各条街道段的信息素, 有助于蚂蚁选择更有效的街道段前进, 加快寻优速度。

3.3.2 局部信息素更新

局部信息素更新是指蚁群在线路铺设成功, 而且铺设方案的目标函数小于给定阈值情况下, 对所有街道段的信息素进行更新, 否则线路铺设即使成功, 所有街道段的信息素也不会更新。该信息素更新准则的设定, 既能避免较差铺设方案对街道段信息素的影响, 又能充分体现当前最优路径的优势。

(1) 每条街道段信息素的更新

每当一只蚂蚁走过一条街道段后, 为避免后续蚂蚁只在当前所走过街道段附近寻路, 需对该街道段信息素进行立即调整。

设蚂蚁 j 走过街道段 k 后, 街道段 k 的信息素调整公式如下:

$$\tau(k,t+1) = \tau(k,t) - \beta/d_k \quad (8)$$

其中: β 为常数; $\tau(k,t)$ 为街道段 k 第 t 时刻的信息素; d_k 为前进路径街道段 k 的长度。

(2) 街道段信息素的局部更新

当某组蚁群中所有蚂蚁共同完成了一次成功的线路铺设方案后, 街道段信息素按如下操作进行局部更新。

① 当蚂蚁 j 未走过街道段 k , 街道段 k 的信息素不作改变, 即:

$$\tau(k,t+1) = \tau(k,t) \quad (9)$$

② 当蚂蚁 j 经过街道段 k , 则街道段 k 的信息素为

$$\tau(k,t+1) = (1 - \tau_0)\tau(k,t) + \Delta\tau \quad (10)$$

$$\Delta\tau = \sum_{j=1}^M \left(\frac{\sum_{l_j=1}^{L_j} \text{Load}(l_j)}{\sum_{r_j=1}^{R_j} \text{Route}(r_j)} \right) \quad (11)$$

其中: t 表示当前时刻, $t+1$ 为下一时刻; M 表示成功铺设线路涉及到的蚂蚁数目; τ_0 表示信息素挥发量; L_j 表示第 j 只蚂蚁所访问的负荷个数; l_j 表示第 j 只蚂蚁访问的某负荷值; r_j 表示第 j 只蚂蚁经过某街道段的长度, R_j 表示第 j 只蚂蚁所经过街道段的个数。

3.3.3 全局信息更新

根据目标函数值最小, 确定到迄今为止各组蚁群线路铺设的最好方案, 并将此方案对街道信息素的影响按以下方式进行全局更新。

① 当蚂蚁 j 未走过街道段 k 时

$$\tau(k,t+1) = (1 - \tau_1)\tau(k,t) \quad (12)$$

② 当蚂蚁 j 经过的街道段 k 时

$$\tau(k,t+1) = (1 - \tau_1)\tau(k,t) + \Delta\tau_{\text{best}} \quad (13)$$

$$\Delta\tau_{\text{best}} = \sum_{j=1}^M \left(\frac{\sum_{l_j=1}^{L_j} \text{Load}(l_j)}{\sum_{r_j=1}^{R_j} \text{Route}(r_j)} \right) \quad (14)$$

其中: $(1 - \tau_1)$ 表示全局信息素更新后街道段 k 信息素的剩余程度; $\Delta\tau_{\text{best}}$ 为最好方案下信息素的变化量, 其他量的含义与局部更新相同。

3.4 蚂蚁前进路径的搜索策略

真实蚂蚁在觅食过程由所处环境中的信息量来决定前进的方向, 而人工蚂蚁是在平面的节点上运动, 因此可把觅食过程抽象成构造解的过程。

对于配电网线路铺设问题, 每一节点通过人工蚂蚁感知以该节点为端点的街道段上的负荷值或信息素浓度, 来选择前进的街道段。蚂蚁的巢穴为变电站站点, 食物为负荷点, 人工蚂蚁从巢穴节点按照启发函数选择下一节点, 直至找到了足够的食物 (达到了线路负荷量), 便得到了所求问题的一个可行解。

本文线路铺设是在变电站供电范围确定的全新的供电区域或开发区下, 进行辐射型线路的铺设。铺设方法的流程图如图 2 所示。

由于蚁群搜索算法是一种随机搜索方法, 因此, 通常的算法停止准则是预先设定足够多的搜索循环数量。当算法达到这个预设的循环总数时, 搜索过程终止。

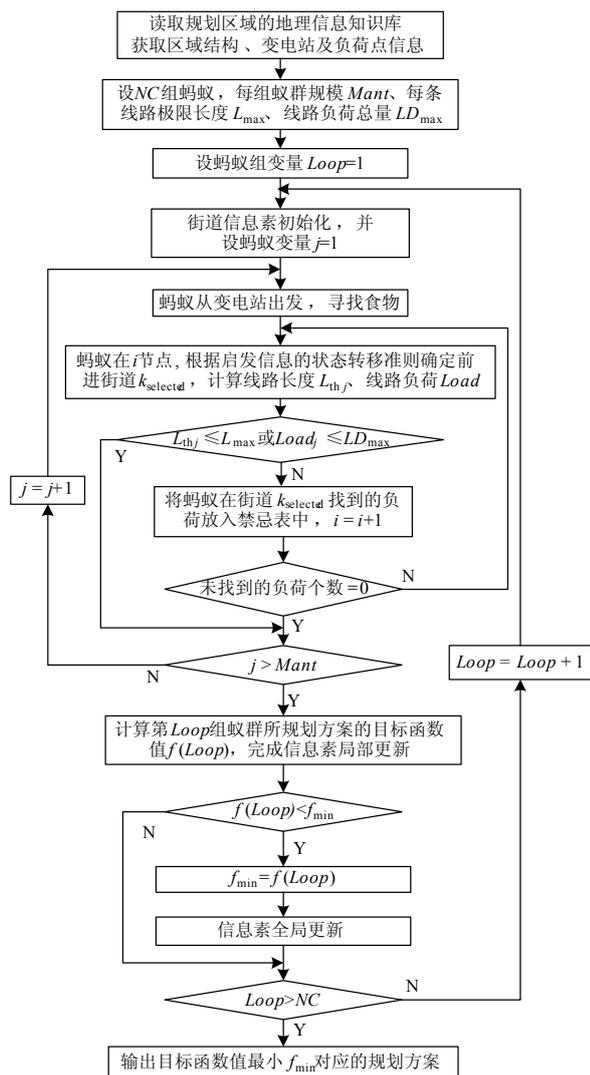


图2 本文配网规划方法流程图

Fig.2 Flowchart of the distribution network planning method proposed in this paper

4 算例测试及结果分析

本文算例在变电站选址、供电范围以及负荷分布情况均已知, 而且规划区域为全新的供电区域或开发区情况下, 依据规划目标和技术原则, 按照辐射状的接线模式对目标年进行配网规划。所有铺设线路的导线截面积均相同。

通过多个算例的多次运行, 蚁群种群规模取200, 迭代次数(循环搜索数量)为8。

算例的规划区域拥有1座2×40 MVA的变电站, 74个负荷点, 目标年预测年最大负荷为51.71 MW。负荷空间分布及变电站位置如图3所示。

依据本文算法对算例进行配网线路铺设, 所得规划结果如图3所示, 此规划方案相对应的规划线

路长度及所带负荷信息如表5所示。

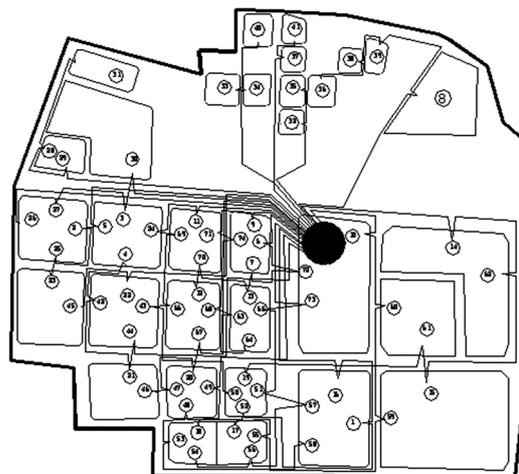


图3 算例线路铺设结果

Fig.3 Distribution network planning solution of the case

表5 算例的规划线路信息

Tab.5 Information of the planning solution in the case

线路编号	长度 / km	总负荷 / kW	负荷个数
1	1.23	2 901.29	6
2	3.44	2 896.88	5
3	1.70	3 052.24	6
4	1.60	2 968.33	2
5	2.43	3 106.43	6
6	4.25	2 876.61	5
7	2.57	3 140.64	6
8	1.79	2 126.6	3
9	3.87	3 041	4
10	2.18	2 758.93	4
11	3.54	2 463.26	4
12	1.77	2 662.1	3
13	3.55	2 646.45	4
14	2.30	2 885.11	4
15	3.31	3 139.58	4
16	2.32	1 712.77	2
17	4.36	3 003.78	3
18	2.68	1 599.88	1
19	1.54	2 725.57	2
总和	50.43	51 707.45	74

该算例的规划区域负荷空间分布及负荷量大小不均, 从规划结果来看: 该区域共铺设线路19条, 总长为50.43 km, 平均长度为2.654 km, 平均每条线路所带负荷2 721.45 kW。布线方案合理, 符合规划要求, 且与实际规划情况接近。

5 结论

本文在变电站、负荷及供电区域（全新的供电区域或开发区）已知情况下，对基于启发式蚁群算法的中压配电网规划方法进行了研究。该方法充分利用了由街道地理信息、负荷信息构建的启发函数和街道段的信息素，在保证计算速度的前提下，有效地完成了沿街铺设辐射型配网线路的任务。算例结果说明了所提方法有效实用，优化规划结果合理，接近实际，符合规划要求。

参考文献

[1] 王赛一, 王成山. 基于多目标模型的城市中压配电网规划[J]. 中国电力, 2006, 39 (11): 46-50.
WANG Sai-yi, WANG Cheng-shan. Urban MV distribution network planning based on multi-objective model[J]. Electric Power, 2006, 39 (11): 46-50.

[2] Miguez E, Cidras J, Diaz-Dorado E, et al. An improved branch-exchange algorithm for large-scale distribution network planning[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2002, 17 (4): 931-936.

[3] Miranda V, Ranito J V, Procenca L M. Genetic algorithms in optimal multistage distribution network planning[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1994, 9(4): 1927-1933.

[4] 刘自发. 基于智能优化算法的配电网规划与优化运行研究[D]. 天津: 天津大学, 2005.
LIU Zi-fa. A study on distribution network planning and optimal operation based on intelligence optimization algorithms[D]. Tianjin: Tianjin University, 2005.

[5] Song Y H, Irving M R. An overview of heuristic optimization techniques for power system expansion planning and design[C].//Power Engineering Society General Meeting. 2004: 933.

[6] Nara K, Hayashi Y, Yamafuji Y, et al. A tabu search algorithm for determining distribution tie lines[C].//Proceedings of the International Conference on Intelligent Systems Applications to Power Systems, ISAP' 96. Orlando(USA): 2008: 266-270.

[7] 刘健, 杨文宇, 余健明, 等. 基于改进最小生成树算法并考虑负荷不确定性的配电网架最优规划[J]. 电网技术, 2005, 29 (16): 61-65.
LIU Jian, YANG Wen-yu, YU Jian-ming, et al. Optimal distribution network planning based on improved minimal cost spanning tree algorithm and considering indeterminacy of power loads[J]. Power System Technology, 2005, 29 (16): 61-65.

[8] 高炜欣, 罗先觉. 基于蚂蚁算法的配电网网络规划[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24 (9): 110-114.
GAO Wei-xin, LUO Xian-jue. Improved ant algorithm for distribution network planning[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24 (9): 110-114.

[9] 钱峰. 10 kV配电网规划研究[D]. 南京: 河海大学, 2003.
QIAN Feng. The study of 10 kV distribution network planning[D]. Nanjing: Hohai University, 2003.

[10] 徐珍霞, 顾洁. 粒子群优化算法在配电网架优化规划中的应用[J]. 继电器, 2006, 34 (6): 29-33.
XU Zhen-xia, GU Jie. Application of particle swarm optimization algorithm to distribution network planning[J]. Relay, 2006, 34 (6): 29-33.

[11] 陈根军, 唐国庆. 基于禁忌搜索与蚁群最优结合算法的配电网规划[J]. 电网技术, 2005, 29 (2): 23-27.
CHEN Gen-jun, TANG Guo-qing. Tabu search-ant colony optimization hybrid algorithm based distribution network planning[J]. Power System Technology, 2005, 29 (2): 23-27.

[12] 王成山, 王赛一. 基于空间的城市中压配电网智能规划(一)辐射接线模式的自动布局[J]. 电力系统自动化, 2004, 28 (5): 45-50.
WANG Cheng-shan, WANG Sai-yi. The intelligent planning of urban mid-voltage distribution network based on spatial GIS, part one: automatic routing of radial network[J]. Automation of Electrical Power Systems, 2004, 28 (5): 45-50.

[13] Dorigo M, Maniezzo V, Colomi A. Ant system: optimization by a colony of cooperating agents[J]. IEEE Transactions on System, Man, and Cybernetics, Part B: 1996, 26 (1): 29-41.

[14] Daniel L C, Khan I H, Ravichandran S. Distribution network reconfiguration for loss reduction using ant colony optimization algorithm[C]. // INDICON, Annual IEEE. Chennai(India): 2005: 619-622.

收稿日期: 2009-09-02; 修回日期: 2009-11-10

作者简介:

路志英 (1964-), 女, 副教授, 研究生, 主要从事智能信息处理、进化算法和城市电网规划等方面的研究;
E-mail: luzhy@tju.edu.cn

葛亮 (1985-), 男, 在读研究生, 主要从事智能信息处理、图像处理研究;

陆洁 (1982-), 女, 研究生, 从事进化算法和城市电网规划等方面的研究。