

# 基于禁忌搜索与蚁群最优结合算法的配电网规划

陈根军<sup>1</sup>, 唐国庆<sup>2</sup>

(1. 南京南瑞继保电气有限公司, 江苏省 南京市 211100; 2. 东南大学 电气工程系, 江苏省 南京市 210096)

## TABU SEARCH-ANT COLONY OPTIMIZATION HYBRID ALGORITHM BASED DISTRIBUTION NETWORK PLANNING

CHEN Gen-jun<sup>1</sup>, TANG Guo-qing<sup>2</sup>

(1. Nari-Relays Electric Co.Ltd., Nanjing 211100, Jiangsu Province, China;

2. Dept.of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, Jiangsu Province, China)

**ABSTRACT:** Tabu Search (TS) behaves well in finding global optimum of combined optimization problems, whereas its local search is not satisfactory due to diversity; Ant Colony Optimization (ACO) behaves well in finding local optimum, whereas its global search depends on selection of the evaporation coefficient. An unsuitable evaporation coefficient may results in local optimum of final solutions. To compensate some limitations of single algorithms, the authors integrate the two algorithms together and put forward TS-ACO hybrid algorithm to solve the distribution network planning. On the basis of simultaneously taking account of the fixed expenditure, which is required in the expansion of distribution network and the variable cost, which is corresponding to the electrical energy losses, a non-linear hybrid integer mathematical model for distribution network planning is designed. The testing results of a distribution network which possesses 6 substations and 102 feeders show that the presented TS-ACO hybrid algorithm is effective.

**KEY WORDS:** Power system; Transmission and distribution; Distribution network planning; Tabu Search (TS); Ant Colony Optimization (ACO); TS-ACO hybrid algorithm

**摘要:** 禁忌搜索 (TS) 算法具有强大的全局优化性能, 但其局部搜索性能易受分散性的影响; 蚁群最优 (ACO) 算法的正反馈机制使其具有强大的局部搜索性能, 但其全局优化性能的优劣在很大程度上与蒸发系数的选择有关, 如选择得不合适易使算法陷于局部最优。文章将 TS 算法与 ACO 算法组合起来, 提出了 TS-ACO 混合算法, 用于求解配电网规划问题, 在同时考虑扩展配电网所需的固定费用和与电能损失相关的变化费用的基础上, 设计了非线性混合整数配电网规划数学模型, 在一具有 6 个变电所、102 条馈线段的配电网上进行的测试结果表明了 TS-ACO 混合算法的有效性。

**关键词:** 电力系统; 输配电工程; 配电网规划; 禁忌搜索; 蚁群最优; TS-ACO 混合算法

## 1 引言

配电网规划涉及变电站和馈线段的建设时间、建设地点及容量的最优选择, 目的是满足未来负荷增长的需求, 同时服从变电站容量大小、馈线段容量大小、电压降落、辐射状网络结构以及可靠性要求等约束条件。配电网规划是一个非常复杂的大规模组合优化问题。传统的数学规划方法虽然能够从理论上保证规划方案的最优性, 但由于配电网规划的复杂性和组合性, 用于求解规划问题时计算时间较长、占用计算机内存也较大, 因而在实际应用中仅适用于小规模的配电系统。

近年来, 应用现代启发式方法, 如模拟退火算法 (Simulated Annealing, SA)、遗传算法 (Genetic Algorithm, GA)、禁忌搜索 (Tabu Search, TS)、蚁群最优 (Ant Colony Optimization, ACO) 来求解配电网规划问题比较有效可行<sup>[1-5]</sup>。与传统搜索方法相比, 这类方法表现出一定的优越性, 但单个现代启发式方法在某些方面也存在不足之处, 为改善单一算法的局限性, 进一步提高优化质量和搜索效率, 提出了混合现代启发式方法, 如文献[6]中的 SA+GA+TS 混合算法、文献[7]中的 SA+GA 混合算法、文献[8]中的 ANN+GA 混合算法等。

TS 算法具有强大的全局搜索性能, 而局部搜索性能虽然具有“上山性”, 但易受分散性的影响; ACO 算法的正反馈机制使其在搜索过程中具有强大的局部搜索性能, 而其全局最优性能的优劣在很大程度上与蒸发系数的选择有关。蒸发系数选择得太大, 不利于搜索过程跳出局部最优; 选择得太小, 又会

丧失搜索历史中出现的优秀解的影响,不利于快速发现最优解,从而影响算法的局部搜索性能。

为充分利用这两种算法的优点,弥补它们各自的缺点,本文提出了 TS-ACO 混合算法,充分利用 ACO 算法的正反馈机制来弥补 TS 算法局部搜索的分散性,使 TS 算法进行集中化的局部搜索,以此来提高 TS 算法的局部搜索性能。

## 2 配电网规划的非线性混合整数规划模型

配电网规划的目标是使扩展配电网所需的固定费用和与电能损失相关的变化费用最小,同时服从变电站容量大小、馈线段容量大小、电压降落、放射性网络结构以及可靠性要求等约束条件。由于目标函数和约束条件均具有非线性特征,配电网规划是一个大规模动态非线性混合整数规划问题。本文的配电网规划数学模型表达式为

目标函数:

$$\min Z = \sum_{t=1}^T \sum_{i \in S_E} X_{itE,S} P_{itE,S}^2 + \sum_{t=1}^T \sum_{i \in S_P} (Y_{itP,S} C_{itP,S} + X_{itP,S} P_{itP,S}^2) + \sum_{t=1}^T \sum_{i \in F_E} X_{itE,F} P_{itE,F}^2 + \sum_{t=1}^T \sum_{i \in F_P} (Y_{itP,F} C_{itP,F} + X_{itP,F} P_{itP,F}^2) \quad (1)$$

式中  $T$  为规划时间范围;  $S_E$  为已存在变电站的集合;  $S_P$  为可能的待建变电站的集合;  $F_E$  为已存在馈线段的集合;  $F_P$  为可能的待建馈线段的集合;  $X_{itE,S}$  为已存在变电站  $i$  在  $t$  时间段的能量损失费用系数;  $X_{itP,S}$  为可能的待建变电站  $i$  在  $t$  时间段的能量损失费用系数;  $X_{itE,F}$  为已存在馈线段  $i$  在  $t$  时间段的能量损失费用系数;  $X_{itP,F}$  为可能的待建馈线段  $i$  在  $t$  时间段的能量损失费用系数;  $Y_{itP,S}=1$  表示变电站  $i$  在  $t$  时间段被建设,否则  $Y_{itP,S}=0$ ;  $Y_{itP,F}=1$  表示馈线段  $i$  在  $t$  时间段被建设,否则  $Y_{itP,F}=0$ ;  $C_{itP,S}$  为在  $t$  时间段建设变电站  $i$  折算到当前年的固定费用;  $C_{itP,F}$  为在  $t$  时间段建设馈线段  $i$  折算到当前年的固定费用;  $P_{itE,S}$  为  $t$  时间段已存在变电站  $i$  供应的潮流;  $P_{itP,S}$  为  $t$  时间段可能的待建变电站  $i$  供应的潮流;  $P_{itE,F}$  为  $t$  时间段流过已存在馈线段  $i$  的潮流;  $P_{itP,F}$  为  $t$  时间段流过可能的待建馈线段  $i$  的潮流。

约束条件:

(1) 潮流约束

$$A_t P_t = D_t \quad (t=1,2,\dots,T) \quad (2)$$

式中  $A_t$  为  $t$  时段的节点弧关联矩阵;  $P_t$  为  $t$  时段的网络潮流矢量;  $D_t$  为  $t$  时段的负荷需求矢量。

(2) 容量约束

$$P_{it} \leq P_{i,\max} \quad (3)$$

式中  $i \in S_E \cup S_P \cup F_E \cup F_P$ ;  $t=1,\dots,T$ 。

(3) 电压降落约束

$$V_{i,\max} \geq V_{it} \geq V_{i,\min} \quad (4)$$

式中  $i=1,\dots,N$  ( $N$  为节点数);  $t=1,\dots,T$ ;  $V_{it}$  为  $t$  时间段节点  $i$  的电压,  $V_{i,\max}$  为该节点电压的上限;  $V_{i,\min}$  为该节点电压的下限。

(4) 辐射状网络约束

最终规划的配电网必须是辐射状网络,不能形成环网。

(5) 逻辑约束

用于描述规划变量之间的逻辑关系。例如,当可能的待建变电站不存在时,连接该变电站和负荷点的馈线段数目为零。

如果  $T=1$ , 上述模型就是一个单阶段的配电网规划问题。本文仅考虑单阶段的配电网规划问题。

## 3 TS 算法与 ACO 算法的性能分析

关于 TS、ACO 基本算法的具体描述参见文献 [9]、[10]。TS 算法通过对当前解进行“移动”操作,产生当前解邻域中可行的邻居解,取其最好邻居解作为新的当前解来完成解空间的局部搜索。TS 的局部搜索能力与其每次“移动”操作所产生邻居解的数目密切相关。邻居解太少,对当前解邻域空间的搜索也就越少,这将影响 TS 算法的局部优化性能;邻居解太多,将会增加算法的执行时间。用于求解具体的配电网规划问题时,TS 算法中当前规划解的邻居解是通过随机产生每一新负荷点的向上节点得到的<sup>[3]</sup>。对于特定负荷点,向上节点的选择是随机的,即局部搜索具有分散性。局部搜索的分散性似乎有利于对局部空间进行全方位搜索,但当邻居解数目一定及邻居解中的优秀解较为集中时,这种分散性反而影响局部优化的性能。最终的规划方案表明,每一新负荷点的向上节点是特定的,尽管在搜索过程中并不能明确每一新负荷点的向上节点,但却可以以某种机制来确定每一新负荷点可能的向上节点的概率,并在“移动”过程中以概率为依据来选择向上节点,由此产生的 TS 当前解的邻居解大部分集中在邻域空间的特定区域内,而小部分分散在邻域空间的其它区域,本文称这种

现象为局部搜索的集中性,与之对应的是局部搜索的分散性。局部搜索的集中性显著增加了发现局部最优解的可能性,提高了局部搜索的性能。图 1、图 2 分别描述了局部搜索的分散性与集中性。

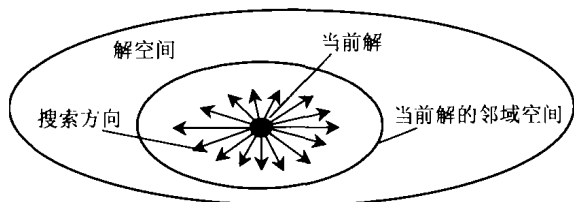


图 1 局部搜索的分散性  
Fig.1 Diversity of local search

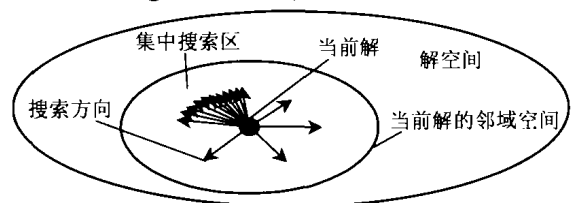


图 2 局部搜索的集中性  
Fig.2 Aggregation of local search

“上山性”是 TS 算法的重要特点,它的另一重要特点是允许一定的“下山”操作(即解质量变差),从而提高算法避开局部最优解的能力。此外,为避免搜索路径的往返重复,TS 使用“Tabu 表”来记录搜索路径的历史信息,这可在一定程度上避开局部极值点,开辟新的搜索区域。因此,虽然 TS 算法并不能从理论上保证一定能搜索到全局最优解,但却能在较短的时间内找到非常优秀的近似最优解。

ACO 算法在本质上是一个多代理算法,它通过单个代理之间的低级交互形成整个蚁群的复杂行为。在 ACO 算法中,局部搜索是通过多代理机制来完成的,即通过多个人工蚂蚁(代理)的分布式计算来产生新的解群。为在较少的迭代次数和迭代时间内迅速发现较好的局部最优解,ACO 算法采用了正反馈机制,即通过可见度和不断积累的信息素等控制参数来提高优秀解的产生机率。从 ACO 算法在配电网规划中的应用情况来看,该算法善于在较短的迭代次数内找到非常优秀的规划解,这也说明了 ACO 算法具有较强的局部搜索能力。

ACO 算法中的正反馈机制使 ACO 算法在搜索过程中易陷入局部最优解,这是因为信息素在正反馈机制的作用下不断积累,使某些局部最优解出现的机率远大于其它优化解出现的机率。为避免这种现象的发生,ACO 算法又采用了蒸发系数的概念。蒸发系数通过削弱搜索过程中累积的信息素密度,来减小搜索历史中出现的优秀解的影响,

因而有利于算法跳出局部最优,向解空间的其它区域进行搜索。

#### 4 配电网规划的 TS-ACO 混合算法

本文 TS-ACO 混合算法的步骤如下:

(1) 通过建立配电网的最小生成树来形成配电网规划的初始解  $S_{\text{initial}}$ , 计算  $S_{\text{initial}}$  的评价函数。令当前解矢量  $S_{\text{current}}=S_{\text{initial}}$ , 最好解矢量  $S_{\text{best}}=S_{\text{initial}}$ 。初始化“Tabu 表”、释放水平函数  $A$  和候选支路集合  $S$  中所有支路的“信息素”密度。为存放次优解,设置一个解集合,用于存放最优解及次优解,其大小可以根据实际需要来设定,初始化解集合  $\tilde{S}$ , 并设置该集合中的第一个元素为  $S_{\text{initial}}$ , 其它元素为空。设置迭代计数器  $K=0$ 。

(2) 如  $K$  等于预先设定的最大允许迭代次数  $K_{\text{max}}$ , 则输出  $S_{\text{best}}$  作为最终的规划方案, 集合  $\tilde{S}$  为最终的解集合; 否则令  $K=K+1$ , 并转向步骤 (3)。

(3) 将两种“移动”操作作用于  $S_{\text{current}}$ , 生成  $S_{\text{current}}$  的一个辐射状网络试验解  $S$ , 并计算对应试验解的评价函数  $f(S)$ 。在执行“移动”的操作过程中, 依据各向上节点的转换概率来选择当前节点的向上节点, 而不是随机地选择。重复该过程, 直至达到指定的邻居取样数  $N_{\text{max}}$ 。

(4) 如集合  $\tilde{S}$  中仍有空元素, 则将步骤 (3) 中的最好试验解(具有最小目标函数的试验解)加入到集合  $\tilde{S}$  中; 否则将该最好试验解与集合  $\tilde{S}$  中存储的历史解作比较。如该最好试验解比最差历史解要好, 就用该最好试验解替代集合  $\tilde{S}$  中的最差历史解。

(5) 如果  $S_{\text{best}}$  没有步骤 (3) 中产生的最好试验邻居解好, 就用该最好试验邻居解更新  $S_{\text{best}}$ , 并同时更新释放水平; 否则转向步骤 (5)。

(6) 如果步骤 (3) 中产生的试验邻居解对应的“移动”不在“Tabu 表”中, 或虽在“Tabu 表”中但已达到其释放水平, 则用该试验邻居解更新  $S_{\text{current}}$ 。将产生该试验邻居解的“移动”的反方向“移动”存入“Tabu 表”中, 同时更新“Tabu 表”, 转向步骤 (2)。如产生该试验邻居解的对应“移动”在“Tabu 表”中还没有达到其释放水平, 就检查下一个次优试验邻居解, 并重复该过程。

(7) 更新候选支路集合  $S$  中所有支路的“信息素”密度, 转向步骤 (2)。

#### 5 算例分析

通过一具有 6 个变电所、102 条馈线段的配电

网对上述基于TS-ACO的配电网规划方法进行测试(如图3所示)。图中,101和102为现有网络中已经存在的变电站,103~106为可能的待建变电站;用连续实线段来表示现有网络中的馈线,而可能的待架设馈线用虚线段表示。表1列出了图3中各负荷点的负荷需求。

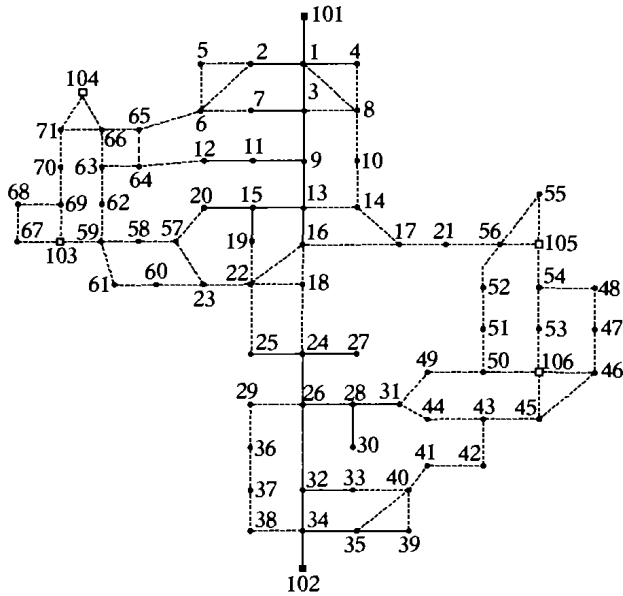


图3 现有配电网络及可能的扩展网络

Fig.3 Existing distribution system and proposed new additions

表1 各负荷节点的负荷需求

Tab.1 Load demands for all load nodes

节点号	负荷需求/kVA	节点号	负荷需求/kVA	节点号	负荷需求/kVA
1	0	25	500	49	240
2	315	26	0	50	70
3	0	27	315	51	315
4	630	28	0	52	250
5	100	29	500	53	400
6	70	30	420	54	250
7	400	31	315	55	315
8	630	32	0	56	240
9	0	33	800	57	315
10	250	34	0	58	315
11	500	35	1000	59	250
12	240	36	315	60	315
13	0	37	240	61	400
14	100	38	400	62	240
15	800	39	250	63	315
16	315	40	315	64	400
17	800	41	100	65	100
18	240	42	315	66	250
19	100	43	400	67	800
20	50	44	315	68	315
21	315	45	500	69	500
22	400	46	315	70	250
23	315	47	315	71	315
24	0	48	250		

得到的最优规划方案如图4所示。此方案中,整个配电网由四个具有辐射状网络结构的子网组成,分别由变电站101、102、103、106供电,其中,变电站103、106为规划期间内计划投建的变

电站,变电站101、102、103、106供应的负荷点的总负荷分别为4850kVA、5470kVA、5685kVA和5605kVA。该规划方案的总费用为13738.9401万元。其中,投资费用为6369.2万元,运行费用为7369.7401万元。

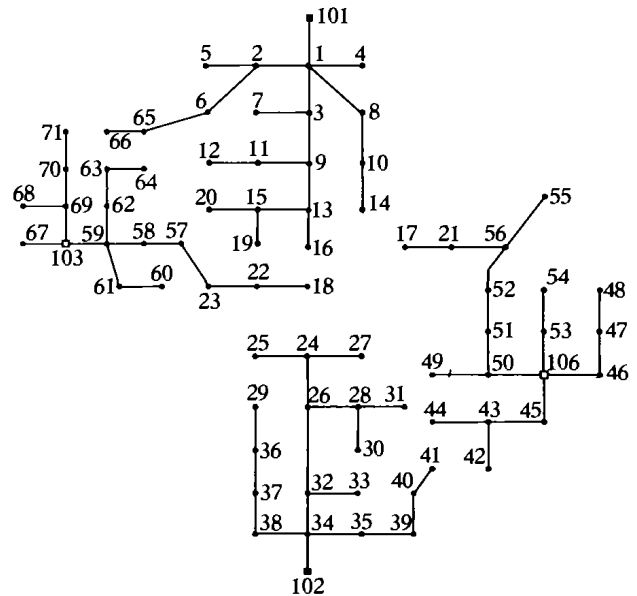


图4 基于TS-ACO混合算法的最优规划方案

Fig.4 Optimal planning scheme based on TS-ACO hybrid method

得到的次优方案如图5所示,该方案的总费用为13740.6711万元,其中投资费用为6365.42万元,运行费用为7375.2511万元。图6为混合算法与单个算法TS、ACO迭代过程的比较结果。

由图6可知,TS-ACO混合算法与TS算法在迭代次数为10次时给出的评价函数值要比ACO算法给出的评价函数值小,主要是因为前面两种算法

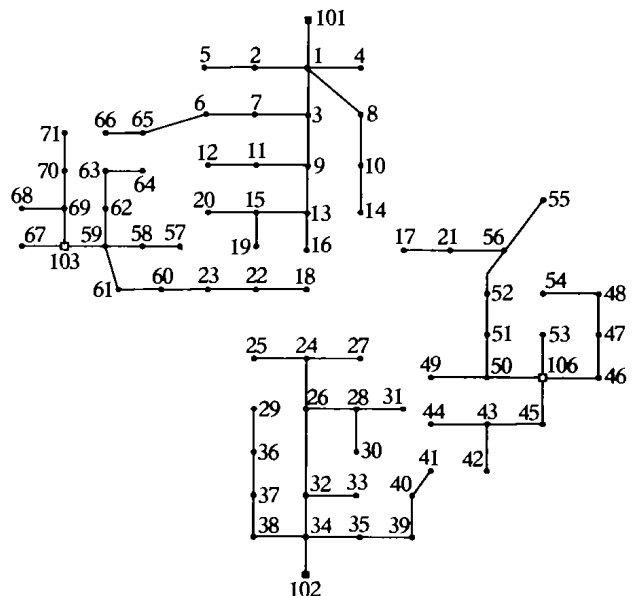


图5 基于TS-ACO混合算法的次优规划方案

Fig.5 Suboptimal planning scheme based on TS-ACO hybrid method

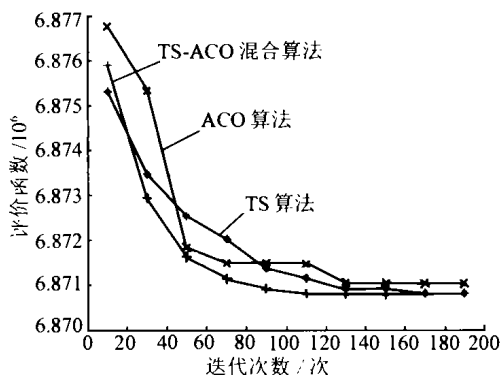


图 6 混合算法 TS-ACO 与 TS、ACO 迭代过程的比较  
Fig.6 Iteration comparison among TS-ACO, TS and ACO

的初始解是通过配电网的最小生成树给出的,最小生成树具有较好的网络结构,因而给其后的迭代过程一个良好开端。对 ACO 算法而言,在迭代次数小于 30 时,由于迭代次数较少,“信息素”密度积累也相应较少,算法的正反馈机制还没有得到充分发挥,评价函数值下降较慢。在迭代次数小于 50 时,ACO 算法的正反馈机制得到了充分发挥,具体表现为评价函数值下降较快。在其后的迭代过程中 ACO 算法表现得相当平稳,评价函数值的变化也较小。图 6 中,ACO 算法在迭代次数约为 50 时给出的规划解已经相当优秀,这也充分表明,该算法具有强大的局部搜索能力。

与 ACO 算法的迭代过程相比,TS 算法要平缓得多。除在开始阶段以外,迭代次数小于 90 时 TS 算法的评价函数值均比 ACO 算法的大。迭代次数达到 190 次时,TS 算法给出的最优规划解的评价函数值却比 ACO 算法给出的小,虽然两者的差别极其微弱,这也从具体事例上证明了 TS 算法具有良好的全局搜索性能。

与单个算法相比,TS-ACO 混合算法给出的迭代过程更加令人振奋。除在开始阶段以外,这种算法在其它时刻给出的最优规划解的评价函数值均不大于单个算法给出的值。尽管 TS-ACO 混合算法在迭代次数达到 170 以后给出的最优规划解的评价函数值与 TS 算法相同,但与 TS 算法相比,它具有更好的局部搜索性能,从而有利于较早发现优秀规划解。

## 6 结论

(1) ACO 算法能迅速找到比较优秀的规划解,但找到最优解的过程很漫长,表明其具有强大的局部搜索能力,但全局搜索性能不强;

(2) TS 算法找到优秀规划解的迭代次数比 ACO 算法的多,但它能够找到更为优秀的解,表明其具有强大的全局优化性能;

(3) TS-ACO 算法兼具 ACO 算法和 TS 算法的优点,它既能迅速找到比较优秀的规划解,又能找到 TS 算法所找到的最优解。

## 参考文献

- [1] Ramirez-Rosado I J, Bernal-Agustin J L. Genetic algorithms applied to the design of large power distribution systems[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1998, 13(2): 696-703.
- [2] 卢鸿宇, 胡林献, 刘莉. 基于遗传算法和 TS 算法的配电网电容器实时优化投切策略[J]. 电网技术, 2000, 24(11): 56-59.  
Lu Hongyu, Hu Linxian, Liu Li. Optimal real-time capacitor strategy in distribution networks based on GA and TS[J]. Power System Technology, 2000, 24(11): 56-59.
- [3] 陈根军, 李继洸, 王磊, 等. 基于 Tabu 搜索的配电网规划[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(7): 40-44.  
Chen Genjun, Li K K, Wang Lei, et al. Distribution network planning by a Tabu search approach[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(7): 40-44.
- [4] 王成山, 王赛一. 基于空间 GIS 和 Tabu 搜索技术的城市中压配电网规划[J]. 电网技术, 2004, 28(14): 68-73.  
Wang Chengshan, Wang Saiyi. Medium-voltage city distribution network planning based on GIS and Tabu search technique[J]. Power System Technology, 2004, 28(14): 68-73.
- [5] 陈根军, 王磊, 唐国庆. 基于蚁群最优的配电网规划方法[J]. 电网技术, 2003, 27(3): 71-75.  
Chen Genjun, Wang Lei, Tang Guoqing. An ant colony optimization based method for distribution network planning[J]. Power System Technology, 2003, 27(3): 71-75.
- [6] 程国良, 王熙法, 庄镇泉, 等. 遗传算法及其应用[M]. 北京: 人民邮电出版社, 1996.
- [7] 陈章潮, 顾洁, 孙纯军. 改进的混合模拟退火-遗传算法应用于电网规划[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(10): 28-31.  
Chen Zhangchao, Gu Jie, Sun Chunjun. Application of improved combined simulated annealing method and genetic algorithms to power network planning[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(10): 28-31.
- [8] 岑文辉, 雷友坤, 谢恒. 应用人工神经网络与遗传算法进行短期负荷预测[J]. 电力系统自动化, 1997, 21(3): 29-32.  
Cen Wenhui, Lei Youkun, Xie Heng. Application of ANN and GA to short-term load forecasting[J]. Automation of Electric Power Systems, 1997, 21(3): 28-32.
- [9] Glover F, Laguna M. Tabu Search[M]. Basel: Science Publishers, 1993.
- [10] Dorigo M, Maniezzo V, Colomi A. Ant system: optimization by a colony of cooperating agents[J]. IEEE Trans on Systems, Man and Cybernetics-Part B: Cybernetics, 1996, 26(1): 1-13.

收稿日期: 2004-10-15。

作者简介:

陈根军 (1974-), 男, 博士, 从事 EMS 高级应用软件和配网自动化的开发和研究工作;

唐国庆 (1937-), 男, 教授, 博士生导师, 从事电力系统运行与控制、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方面的研究工作。