

# 多种群蚁群算法解机组组合优化

王 威,李颖浩,龚向阳,蔡振华,郑春莹  
(浙江大学 电气工程学院,浙江 杭州 310027)

**摘要:**电力系统机组组合问题是一个大规模混合整数规划问题,具有高维、离散、非线性等特点,在数学上被称为NP-hard问题。为解决蚁群算法在解决机组组合问题中遇到的计算速度慢、易陷入局部最优等问题,将多种群蚁群算法应用到解决机组组合的问题中。开展了多种群蚁群算法在机组组合问题中的应用分析,新建了除搜索蚁之外的侦察蚁和工蚁,设定了3种蚁群之间的信息交互原理,提出了各蚁群的信息素更新方法。在修正后的IEEE30节点系统对算法可行性作了验证,并对算法的合理性和有效性进行了分析。研究表明,所提出的多种群蚁群算法是合理、有效的。

**关键词:** 机组组合;多种群蚁群算法;启发式算法

中图分类号: TM711 文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2012)05-0572-04

## Unit commitment solved by multi colony ant optimization algorithm

WANG Wei, LI Ying-hao, GONG Xiang-yang, CAI Zhen-hua, ZHENG Chun-ying  
(School of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

**Abstract:** Unit commitment(UC)has commonly been formulated as a large-scale,mixed-integer optimization problem which is with the characteristic of high-dimensional, discrete and nonlinear and is known as NP-hard problem in mathematics. In order to solve the problems of time-consuming and easy to fall into local optimum that the ant colony optimization algorithm(ACO)met,the multi colony ant optimization algorithms was investigated. After the analysis of the use of the multi colony ant optimization algorithms in unit commitment, the detect ant and ergate were presented beside the search ant,the new principles of information exchange were set,and the new update method for pheromone was established. The feasibility of the algorithm was verified,the rationality and effectiveness were analyzed by the modified IEEE30. The result shows that the proposed multi colony ant algorithm is reasonable and effective.

**Key words:** unit commitment(UC);multi colony ant optimization algorithm(MCAO);heuristic algorithm

## 0 引 言

机组组合问题(UC)又称开停机计划,其研究的是在满足各类机组运行条件约束的情况下,如何合理安排未来一定时期内的机组开、停机状态,调节各时段机组出力,以使系统总的运行费用达到最小。机组组合问题具有高维数、非凸、离散、非线性的特点,在数学上为NP-Hard问题。因此,在大型电力系统调度中,在可以接受的时间内得到一个可行的精确解是相当困难的。在实际系统中应用于解此类问题的经典算法有优先级表法<sup>[1]</sup>、动态规划法<sup>[2]</sup>、拉格朗日松弛法<sup>[3]</sup>、混合整数规划法<sup>[4]</sup>等。还有基于人工智能的一些方法,包括模拟退火算法<sup>[5]</sup>、蚁群算法<sup>[6]</sup>、遗传算法<sup>[7]</sup>、粒子群算法<sup>[8]</sup>、禁忌

算法<sup>[9]</sup>等。

蚁群算法(ACO)是20世纪90年代提出的一种新型的分布式智能优化算法,具有高度并行性、合作性和鲁棒性,已经成功运用于求解多种组合优化问题当中。在电力系统中的应用领域包括机组组合<sup>[10-12]</sup>、经济调度<sup>[13]</sup>、配电网规划<sup>[14]</sup>等。与其他智能算法一样,计算速度慢、易陷入局部最优是其突出的缺点。针对这些特点,国内外学者对蚁群算法计算效率和准确度的提高做了大量的研究。文献[10]通过将蚁群算法与鱼群算法想结合的方式,加强了收敛速度和搜索能力。文献[11]提出了倒指数扰动因子,并设计了通过随机选择策略和随机扰动策略来处理蚁群算法的停滞现象。文献[12]通过改进蚁群运动方式来改进路径上信

息素的积累方式,这种处理方式减少了对计算机内存的占用,并且加快了计算的速度和提高了结果的准确度。

多种群蚁群算法(MCAO)是一种新型的蚁群算法,基本思想是把原先单独的一种蚁群分类,通过各类蚁群之间的信息交流与合作来提高算法的计算效率以及解的质量。现阶段这种算法在电力系统中的应用还很少。文献[14]针对旅行商问题对多种群蚁群算法的信息交换机制进行了研究;文献[15]提出了一种文化蚁群算法,并给出了群体空间和信仰空间的概念。

笔者受上述文献的启发,提出一种针对求解机组组合问题的多种群蚁群算法。该算法把蚁群分为搜索蚁、侦察蚁和工蚁。通过种群之间信息交流与合作加快搜索最优解的效率;针对各种群的不同作用设置不同的信息素调节机制,使蚁群在路径寻优上极大地避免了陷入局部最优解,从而提高优化效果。

## 1 机组组合问题描述

机组组合问题的约束条件一般包括机组功率平衡约束、旋转备用约束、出力上下限约束、机组爬坡速率约束、最小开机时间约束和最小停机时间约束等。机组组合的目标函数通常为系统运行成本 $F$ 最小,其表达式如下:

$$\min F(U_i^t, P_i^t) = \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T [F_i(U_i^t, P_i^t) + C_i U_i^t (1 - U_i^{t-1})] \quad (1)$$

s.t.

$$\sum_{i=1}^N U_i^t P_i^t = P_D^t \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^N U_i^t \bar{P}_i^t \geq P_D^t + S_D^t \quad (3)$$

$$U_i^t P_i^t \leq P_i^t \leq U_i^t \bar{P}_i^t \quad (4)$$

$$Rd_i \leq P_i^t - P_i^{t-1} \leq Ru_i \quad (5)$$

$$\sum_{j=t-T_{2i}}^{t-1} U_i^j \geq T_{1i} U_i^{t-1} (1 - U_i^t) \quad (6)$$

$$\sum_{j=t-T_{1i}}^{t-1} (1 - U_i^j) \geq T_{2i} U_i^t (1 - U_i^{t-1}) \quad (7)$$

式中: $U_i^t$ —第 $i$ 台机组在 $t$ 时段的开关机状态; $P_i^t$ —第 $i$ 台机组在 $t$ 时段的出力; $C_i$ —开机费用; $P_D^t$ —时段 $t$ 系统负荷; $S_D^t$ —时段 $t$ 的备用要求; $\bar{P}_i^t$ ,  $P_i^t$ —机组 $i$ 的出力上/下限; $Ru_i$ ,  $Rd_i$ —机组 $i$ 每个时段允许可调的出力上/下限; $T_{1i}$ ,  $T_{2i}$ —机组 $i$ 的最小开机时间和最小关机时间。

上述约束条件可以分为系统约束和机组特性约束。式(2,3)分别为系统功率平衡约束、备用约束,式(4~7)分别为机组输出功率约束、机组爬坡速率约束、最小开停机时间约束。

## 2 基本蚁群算法简介

基本蚁群算法的主要依据是信息正反馈原理和某种启发式算法的有机结合。本研究在某一个时段把机组的一种随机组合状态当作蚂蚁在这一时段内候选的一条路径,基本蚁群算法在解决组合问题时选择转移路径的概率公式为:

$$P_{ij(k)}(t) = \begin{cases} \frac{\tau_{ij}^\alpha(t) \eta_{ij}^\beta}{\sum_{is \in T(k)} \tau_{is}^\alpha(t) \eta_{is}^\beta} & j, s \in T(k) \\ 0 & \end{cases} \quad (8)$$

式中: $ij$ —在 $k$ 时段里从 $i$ 到 $j$ 的一条路径; $is$ —在 $k$ 时段里从 $i$ 出发的任意一条候选路径; $\tau_{ij(t)}$ — $t$ 时刻路径 $ij$ 上的信息素量; $\eta_{ij}$ —与解决问题相关的启发式信息,在机组组合优化中可选为 $t$ 时刻运行费用的倒数; $T(k)$ — $k$ 时段的候选路径表集合,在机组组合优化中为通过开停机时间约束和爬坡约束筛选后的可选机组组合办法所组成的集合; $\alpha$ ,  $\beta$ —蚂蚁在运动过程中所积累的信息及启发式因子在蚂蚁选择路径过程中所起作用的重要程度。

蚂蚁按照上述转移概率规则完成对候选机组组合路径的选择。当所有的蚂蚁完成了它们的路径选择后,即一次迭代结束,本研究利用全局信息素更新规则来更新路径上的信息素量,重复以上过程,直至达到最大迭代次数或最大停滞次数。全局信息素更新规则为:

$$\tau_{ij}(t+n) = \rho \tau_{ij}(t) + \Delta \tau_{ij} \quad (9)$$

$$\Delta \tau_{ij} = \sum_{k=1}^m \Delta \tau_{ij}^k \quad (10)$$

$$\Delta \tau_{ij}^k = \begin{cases} \frac{Q}{L_k} & \text{若蚂蚁走过路径 } ij \\ 0 & \text{否则} \end{cases} \quad (11)$$

式中: $\rho$ —信息素的挥发因子,以减少历史记忆对选择的影响, $0 < \rho < 1$ ;  $Q$ —常数,表示信息素强度。

通过分析以上公式可以看出,在所有候选路径中,某条路径上的信息素越多且路径越短,则蚂蚁选择该路径的概率也越大。

## 3 多种群蚁群算法解机组组合优化

### 3.1 作用原理描述

笔者提出的多种群蚁群算法是在基本的蚁群算法的基础上,另外设定了侦察蚁和工蚁两种不同作用的蚁群,通过3种蚁群的相互协调配合来达到避免解陷入局部最优、提高解的质量等目的。3种蚁群之间的信息交换机制如图1所示。

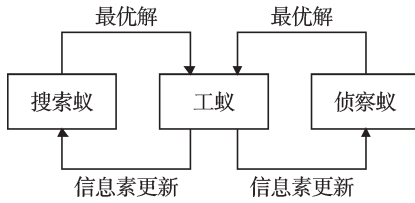


图1 多种群蚁群算法信息交互原理

### 3.2 信息素更新算法的设定

搜索蚁采用基本蚁群算法,它的任务是寻找最优解。搜索蚁在选择一条路径之后,会在这条路径上留下信息素,越短的路径信息素含量越高。需要说明的是各条路径上信息素含量的多少会直接影响到后代蚁群对路径的选择:越短的路径被选中的概率越大,信息素积累也越多,这样被后代选择的机会进一步增大,如此反复,最后达到找到最优路径的目的。

笔者设定侦察蚁的任务是扫描搜索蚁未选择过的路径,最大程度地发现搜索蚁未能发现的最优路径解,帮助搜索蚁避免陷入局部最优。根据这个设定,侦察蚁采用最优路径上信息减少的更新办法,表达式如下:

$$\tau_{ij}(t+n) = \mu\tau_{ij}(t) - \Delta\tau_{ij} \quad (12)$$

式中:  $\mu$ —恢复因子,  $\mu > 1$ 。

从式(8)容易看出,这样的信息素更新方法简单有效,可以很好地避免对已知路径的反复搜索而使蚁群有更多机会搜索搜索蚁未能选用的路径,进而避免所得解落入局部最优。

### 3.3 最优解记忆库及最优逼近变异算法

多种群蚁群算法中,工蚁是整个蚁群算法的核心。工蚁为得到的最优解创建最优解记忆库,并对这些解进行最优解逼近变异,进行最优解的进一步更新,最终对搜索蚁和侦察蚁路径上的信息素进行调整。具体处理过程为:

(1) 接收搜索蚁和侦察蚁每次寻优得到的各自前  $n$  个最优解。本研究将这  $2n$  个结果再排序,找到前  $n$  个最优,将这  $n$  个最优解归入最优解记忆库  $T_{best0}$ 。

(2) 受 2-opt 算法的启发,笔者针对  $T_{best0}$  里的最优解采用最优逼近的变异方法进行进一步的局部寻优。具体做法为:在  $T_{best0}$  中找到最优解  $U_{best}$ ,将  $U_{best}$  和其他  $n-1$  个最优解进行对比。以  $U_{best}$  和  $U_{best1}$  为例,对比最优解如图 2(a)所示。本研究以每一个时段的机组组合状态为单位,对比  $U_{best}$  和  $U_{best1}$  的几个连续时段里的机组组合状态。假设  $U_{best}$  和  $U_{best1}$  的段落 2 的这些时段里所选择的机组组合状态是一样的,而在段落 1 里  $U_{best1}$  的费用小于  $U_{best}$  的费用,在段落 3 里  $U_{best}$  的费用小于  $U_{best1}$  的费用,那么新的最优解  $U'_{best}$  结构如图 2(b)所示。

(3) 检验  $U'_{best}$  是否可行,如果可行且计算所得费

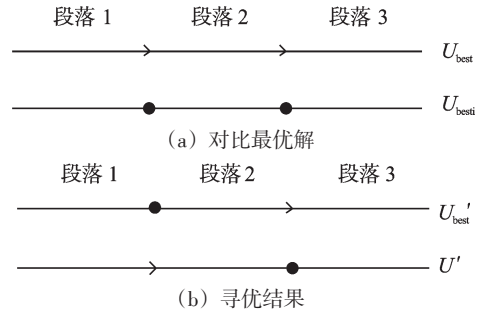


图2 局部寻最优解方法

用小于  $T_{best0}$  中最大值,则将  $U'_{best}$  也归入  $T_{best0}$  中。

(4) 将最优解复制  $m$  份,其中  $m = \lambda n (0 < \lambda < 1)$ 。

(5) 将  $T_{best0}$  中最优解重新排序,找到最优的  $n$  个解,更新记忆库。

(6) 为搜索蚁和侦察蚁更新信息素。搜索蚁的信息素更新方法采用式(9~11)基本蚁群全局信息素更新的算法。侦察蚁与搜索蚁的信息素更新处理不同之处在于信息素的累积办法为式(10~12)。

### 3.4 多种群蚁群算法流程

多种群蚁群算法流程(如图 3 所示)如下:

(1) 初始化。读取系统信息,初始化各参数,计迭代次数  $Nt=0$ 。

(2)  $Nt = Nt + 1$ ,搜索蚁和侦察蚁按照各自的信息素信息寻优。每组蚁群得到  $n$  个最优解。

(3) 工蚁接收这  $2n$  个最优解,作 3.1 节的处理。

(4) 判断是否已经到达收敛要求。如果是,则输出最优解;如果不是,则返回(2)。

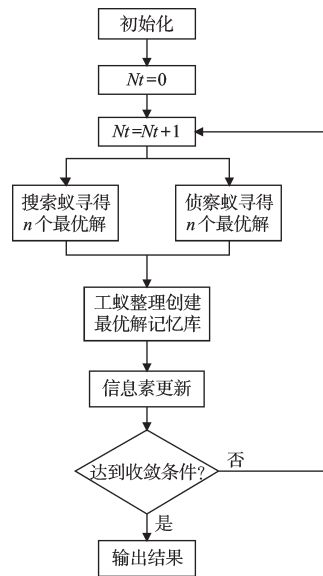


图3 多种群蚁群算法流程

## 4 算例分析

仿真在 P4-3.0 GHz 的 PC 机下进行,本研究采用 Matlab 2008 编写多种群蚁群算法程序,并调用 CPLEX 11.0 进

行经济调度,算例采用修正的IEEE30<sup>[16]</sup>节点系统。搜索蚁5只,侦察蚁25只,最优集合取最优解的个数为 $n=10$ ,最优解加权值 $m=2$ ,即 $\lambda=0.2$ ,最大迭代次数为100次, $\rho=0.8$ , $\mu=1.05$ , $\alpha=6$ , $\beta=1$ 。算法的终止条件为达到最大迭代次数或最优解集合中只有一种解,即所有蚂蚁聚敛到一条路径上时计算终止。

基本蚁群算法和多种群蚁群算法以及没有经过局部寻优的多种群蚁群算法的计算效果如图4所示(其中,实线表示基本蚁群算法解,短划线为笔者提出的多种群蚁群算法解,虚线表示不做局部寻优的多种群蚁群算法解)。从图4中可以明显看出,笔者所提出的多种群蚁群算法,在收敛速度和结果的准确度上都远远优于基本蚁群算法。从图4也可以看出,通过在最优解集中做局部寻优可以在很大程度上加快最优解的搜索效率。

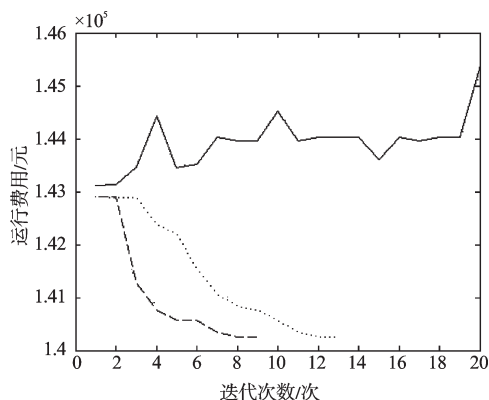


图4 多种群蚁群算法对比

最优解加权和不做最优解加权时的解的情况如图5所示。实线为最优解加权后得到的解的情况,短划线为没有做加权的解的情况,短虚线表示最优解没有加权时得到的最优解集里最优解的平均值。从图5中可以看出,不做最优解加权时,解的收敛速度会比做最优加权时慢很多。这是因为当最优解集里的次最优解已经占一定规模时,即使侦察蚁找到了最优解,由于信息素的积累不够,蚁群在做下一次寻找时,很难向最优解靠拢,造成时间的浪费。最优解的适当加权在一

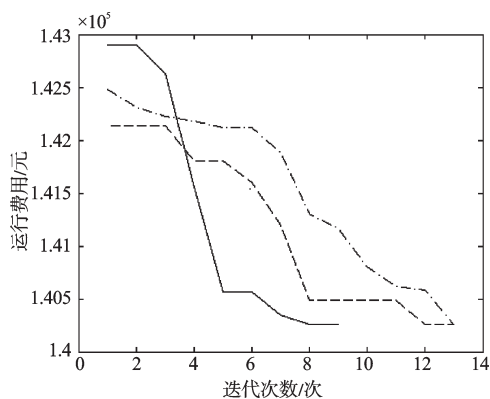


图5 多种群蚁群算法加权处理对比

表1 修正IEEE30不同蚁群算法结果比较

算法名称	平均迭代次数	最优解/万元
ACO	>30	14.31
MCAO	8	14.02
无局部寻优的MCAO	12	14.02
无最优解加权的MCAO	22	14.02

定程度上克服了这样的缺陷,使得蚁群尽快地找到最优值。

各种算法所得出的最优解值以及迭代次数如表1所示。结果表明笔者提出的多种群蚁群算法在效率和解的质量上比基本蚁群算法有很大的提高。

### 5 结束语

国内外研究表明,蚁群算法在解决组合问题上有其突出的优点,但蚁群算法在计算速度和解的准确度上仍不能够令人满意。笔者提出的多种群蚁群算法对基本蚁群算法做了改进,在基本蚁群(搜索蚁)的基础上引入了侦察蚁和工蚁两种蚁群。

侦察蚁与搜索蚁做反方向的路径寻优计算,这样做使得蚁群可以最大可能地搜索各种未知路径,从而在很大程度上防止了搜索蚁陷入局部最优。

工蚁为整个蚁群系统提供信息处理:形成最优解集,进行最优解局部寻优,为搜索蚁和侦察蚁做信息素更新。工蚁是多种群蚁群算法的核心。它相当于鱼群算法的公告板,在解的处理过程中吸收了遗传算法的交叉寻优过程,也集合了免疫算法的最优解加权寻优等优点,使得多种群蚁群算法在计算效率和最优解质量上都有明显的提高。

研究过程表明,蚁群算法在解决机组组合问题过程中在路径筛选以及计算效率等方面还有较大的提高空间。笔者提出的算法在引入侦察蚁以及工蚁之后,表面上加增了算法总体的复杂程度,但是在计算过程中3种蚁群之间逻辑关系明确,算法互补,过程互不影响,提高了算法效率。实践证明,笔者提出的算法在解决机组组合问题上快速、有效的。

### 参考文献(References):

[1] SENJYU T, SHIMABUKURO K, UEZATO K. A fast technique for unit commitment problem by extended priority list [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2003, 18(2): 881-888.

[2] WANG C, SHAHIDEHPUR M. Optimal generation scheduling with ramping costs [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 1995, 10(1): 60-67.

### 3 结束语

本研究简要地介绍了LDPC码和Turbo码的编译码原理,并对基于两种编码的SC-FDE系统进行建模、仿真。仿真及研究结果表明:经Turbo编码和LDPC编码后SC-FDE系统的误码率较之前显著降低,且LDPC码和Turbo码有很强的抗衰落能力,因此编码技术用于无线通信系统可很大程度地提高系统的性能。与基于Turbo码的SC-FDE系统相比,基于LDPC码的SC-FDE系统不仅可以在较低的信噪比下达到理想的误码率且没有差错平底特性,在达到相同误码率时有较大的信道增益,同时LDPC译码复杂度比Turbo码明显降低因而适合硬件实现,因此LDPC码比Turbo码更实用,必将在未来无线移动通信领域得到广泛的应用。

#### 参考文献(References):

- [1] 王 竞. 单载波频域均衡SC/FDE与多载波OFDM的性能比较[D]. 上海:同济大学电子信息工程学院,2007.
- [2] MACKAY D J C. Good error-correcting codes based on

very sparse matrices[J]. **IEEE Transaction in Information Theory**, 1999, 45(7):399-431.

- [3] 王伟祥,刘玉君. 基于LDPC码编码方案的OFDM系统[J]. 计算机工程与应用,2006,30(6):137-139.
- [4] GLAVIEUX B C. A near optimum error correcting coding and decoding: Turbo-codes [J]. **IEEE Transactions on Communications**, 1996, 44(10):1261-1271.
- [5] 郭 忱. LDPC编译码算法的研究和应用[D]. 长春:吉林大学通信工程学院,2007.
- [6] 刘顺兰,刘婷婷,曾 嵘,等. 改进的单载波频域均衡系统及其在航空信道上的性能分析[J]. 电讯技术,2009,49(9):49-53.
- [7] 陈 艳,赵旦峰,高敬鹏. OFDM系统下LDPC码的性能仿真[J]. 舰船电子对抗,2007,30(4):96-98.
- [8] 王万良,张美燕. 基于turbo码的对称式分布式信源编码研究[J]. 机电工程,2009,26(3):20-33,104.
- [9] 李艳中,赵泽茂. 基于turbo码的PCM/FM再入遥测系统性能分析[J]. 机电工程,2009,26(12):54-57.
- [10] 刘顺兰,刘小云,刘婷婷. 基于Turbo信道编码的SC-FDE系统[J]. 计算机工程,2010,36(7):270-272.

[编辑:李 辉]

(上接第575页)

- [3] ONGSAKUL W, PETCHARAKS N. Unit commitment by enhanced adaptive lagrangian relaxation [J]. **IEEE Transactions on Power Systems**, 2004, 19(1):620-628.
- [4] SHAW J J, BERTSEKAS D P. Optimal scheduling of large hydrothermal power system [J]. **IEEE Transactions on PAS**, 1985, 104(2):286-294.
- [5] SIMOPOULOS D N, KAVATZA S D, VOURNAS C D. Unit commitment by an enhanced simulated annealing algorithm [J]. **IEEE Transactions on Power Systems**, 2006, 21(1):68-76.
- [6] SIMON S P, PADHY N P, ANAND R S. An ant colony system approach for unit commitment problem [J]. **IEEE Transactions on Power Systems**, 2006, 28(5):315-323.
- [7] 高 山,单渊达. 遗传算法搜索优化及其在机组组合中的应用[J]. 中国电机工程学报,2001,21(3):45-48.
- [8] TING T O, RAO M V C, LOO C K. A novel approach for unit commitment problem via an effective hybrid particle swarm optimization [J]. **IEEE Transactions on Power Systems**, 2006, 21(1):411-418.
- [9] MANTAWY A H, ABDEL M Y L, SELIM S Z. Unit commitment by tabu search [J]. **IEEE Proceedings Generation, Transactions and Distribution**, 1998, 145(1):56-64.
- [10] 王 剑,刘天琪. 发动机机组组合的混合蚁群优化算法[J]. 电力系统保护与控制,2010,38(20):85-89.
- [11] 郝晋,石立宝,周家启,等. 一种求解最优机组组合问题的随机扰动蚁群优化算法[J]. 电力系统自动化,2002,26(23):1-6.
- [12] HOU Yun-he, WU Yao-wu. Generalized ant colony optimization for economic dispatch of power systems [J]. **Power System Technology**, 2002(1):225-229.
- [13] 陈根军,王 磊,唐国庆,等. 基于蚁群最优的配电网规划方法. 电网技术,2003,27(3):71-75.
- [14] MIDDENDORF M, REISCHLE F, SCHMECK H, et al. Multi colony ant algorithms [J]. **Journal of Heuristics**, 2002, 8(3):305-320.
- [15] 顾军华,范培培,宋庆增,等. 改进的求解TSP问题文化蚁群优化方法[J]. 计算机工程与应用,2010,46(26):49-52.
- [16] MA M, SHAHIDEHPOUR H M. Transmission-constrained unit commitment based on benders decomposition [J]. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, 1998, 20(4):287-294.

[编辑:李 辉]