基于遗传粒子群混合算法的机组组合优化

张 炯[1]，刘天琪[1]，苏 鹏[1]，张 鑫[2]

(1.四川大学电气信息学院，四川 成都 610065；2.成都电业局，四川 成都 610100)

摘要：节能发电调度的目标是实现能耗量最小，合理安排机组发电计划则更为至关重要。在参考文献的基础上，提出了一种用于机组组合优化的遗传粒子群混合优化算法。先用遗传算法求解机组组合，再用粒子群优化算法求解负荷经济分配。按照节能调度思路对遗传算法进行了改进，提高了优化性能。给出了10机算例系统优化结果，验证了该混合算法的可行性和有效性。

关键词：机组组合；负荷经济分配；遗传算法(GA)；粒子群优化(PSO)

Unit commitment optimization based on genetic algorithm and particle swarm optimization hybrid algorithm

ZHANG Jiong[1], LIU Tian-qi[1], SU Peng[1], ZHANG Xin[2]

(1.School of Electrical Engineering and Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 2.Chengdu Power Supply Company, Chengdu 610100, China)

Abstract: The purpose of energy-efficient scheduling is to realize the minimum of energy consumption, therefore, short-term generation scheduling is of vital importance. On the basis of the references, a hybrid algorithm of genetic algorithm(GA) and particle swarm optimization(PSO) is presented. The first step is to perform the optimization of unit commitment using GA, and the second step is to dispatch economic load in these units using PSO. At last, the example of ten-unit system shows that the hybrid algorithm is feasible and effective.

Key words: unit commitment; load economic dispatch; genetic algorithm(GA); particle swarm optimization(PSO)

中图分类号：TM76；TM73 文献标识码：A 文章编号：1674-3415(2009)09-0025-05

0 引言

机组组合优化问题包括两个基本方面，一是机组组合，即在考虑系统容量和备用以及机组的最小开停机时间等约束的条件下，确定计划周期中每个时刻机组的运行方式；二是机组负荷经济分配，即确定每个时刻系统负荷需求在运行机组中的分配[1]，并使系统的发电能耗最小。

目前，用于机组组合优化的算法有优先级表法[2]、动态规划法[3]、拉格朗日松弛法[4]等传统方法和遗传算法[5~7]、粒子群算法[8~10]等智能算法以及智能混合算法[11]。文献[2]的优先级表法，按照某种经济指标投切机组，计算速度快，但往往不能找到最优解。文献[3]的动态规划法状态变量的维数较高，容易造成"维数灾"，计算速度很慢。文献[5]采用分时段处理机组组合优化，取得了比文献[4]中拉格朗日松弛法好的效果。文献[8~10]中的粒子群算法具有较强的局部寻优能力，计算速度快。文献[11]混合使用两种智能算法，取得了更强的寻优能力。在研究了遗传算法和粒子群算法基本原理的基础上，综合遗传算法的全局优化能力和粒子群算法的局部寻优能力，提出一种优化机组组合的遗传粒子群混合算法，相对于文献[11]更好地解决了各约束条件，避免了硬约束的使用。先用二进制编码的遗传算法优化机组的组合状态，并在设置变异算子时充分体现节能调度尽量开大机组、少开小机组的原则。再在遗传算法优化得到机组组合的基础上，用粒子群算法实现负荷在开机机组之间的经济分配。

1 机组组合的数学模型

1.1 目标函数

机组组合优化就是合理安排机组的启停计划，以使系统的总发电成本最小，总发电成本包括机组发电耗量和机组启动耗量。所以机组组合优化的目标函数为

$$\min_{u_{it},P_{it}} F=\sum_{t=1}^{T}\sum_{n=1}^{N}[u_{it}F_i(P_{it})+u_{it}(1-u_{i(t-1)})S_i)] \quad (1)$$

式中，T 为总时段数；N 为机组数；u_{it} 为机组 i 在时段 t 的状态，其值为 0 时表示停机，为 1 时表示开机；P_{it} 为机组 i 在时段 t 的出力；$F_i(P_{it})$ 和 S_i 分别表示机组 i 的发电耗量和启动耗量。

计算发电耗量和启动耗量的公式分别为

$$F_i(P_{it})=a_iP_{it}^{\ 2}+b_iP_{it}+c_i \quad (2)$$

$$S_i=S_{0,i}+S_{1,i}(1-e^{-T_{it}^{off}/\tau_i}) \quad (3)$$

式中：a_i、b_i 和 c_i 为机组 i 的运行耗量特性参数；$S_{0,i}$、$S_{1,i}$ 和 τ_i 为机组 i 的启动耗量特性参数；T_{it}^{off} 为机组 i 在时段 t 的已停机时间。

1.2 约束条件

(1) 负荷平衡约束

$$\sum_{i=1}^{N}u_{it}P_{it}=P_{Dt} \quad (4)$$

式中：P_{Dt} 为 t 时段的负荷。

(2) 旋转备用约束

$$\sum_{i=1}^{N}u_{it}P_{i\max}\geq P_{Dt}+P_{Rt} \quad (5)$$

式中：P_{Rt} 为 t 时段的旋转备用，本文取 $P_{Rt}=0.07P_{Dt}$；$P_{i\max}$ 为机组 i 的最大出力。

(3) 机组出力上下限约束

$$P_{i\min}\leq P_{it}\leq P_{i\max} \quad (6)$$

式中：$P_{i\min}$ 为机组 i 的最小出力。

(4) 最小开停机时间约束

$$T_{it}^{on}\geq T_{i\min}^{on} \quad (7)$$

$$T_{it}^{off}\geq T_{i\min}^{off} \quad (8)$$

式中：T_{it}^{on} 和 T_{it}^{off} 分别为机组 i 在时段 t 的连续开机时间和停机时间；$T_{i\min}^{on}$ 和 $T_{i\min}^{off}$ 分别为机组 i 在开停机后必须保持开停机状态的最短时间。

(5) 机组加减出力速率约束

$$-P_{iD}\leq P_{it}-P_{it-1}\leq P_{iU} \quad (9)$$

式中：P_{iU} 和 P_{iD} 分别为机组 i 加减出力上限(不包括机组启停情况)。

(6) 线路潮流限制、分区功率平衡等约束，本文未考虑这些因素。

2 机组组合优化的遗传粒子群混合算法

2.1 遗传算法及其改进

遗传算法(GA)是一种模拟生物的自然选择和群体遗传机理的数值优化算法，根据适应值函数(目标函数)进行选择、交叉、变异操作，经过反复进化迭代，逐渐逼近全局最优解。

在保留 GA 算法基本步骤和结构的同时作了如下改进。

（1）遗传种群

采用文献[4]中的 10 机系统，并按照全天最小负荷的 80%确定 9、10 机组承担基荷，即全天为开机状态，且不参加变异操作；8、7 为大机组；1、2、3 为小机组。采用一个 $T\times N$ 的 0-1 矩阵代表种群中的个体，产生的个体满足式(5)、(7)、(8)。

（2）选择操作

在研究了传统轮盘赌选择特点的基础上，决定采用 PK 选择法和最优保留策略法，即在父代中任意选择两个个体，比较其适应值，适应值小的选中，而最优个体直接进入子代。

（3）交叉操作

分两步进行列交叉和行交叉。列交叉后检查是否满足式(5)，不满足就重新交叉；行交叉后检查是否满足式(7)、(8)，不满足就取消本次交叉。如下个体，箭头所示位置即为列交叉和行交叉的交叉点。

列交叉 ↓

$$\begin{matrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1N} \\ a_{21} & a_{21} & \cdots & a_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{T1} & a_{T1} & \cdots & a_{TN} \end{matrix}$$

← 行交叉

（4）变异操作

为了更快地得到最优解，并体现节能调度的原则，使用两步变异操作。首先根据节能调度中“上大压小”的原则，进行机组全天变异操作，对大机组给出一定的概率 p，满足概率要求，就把该机组的停机状态全部转为开机，然后依次关闭小机组，关闭一台就检查个体是否满足式(5)，不满足就取消上步操作，并终止全天变异操作。接着进入单点变异操作，变异时需检查是否满足式(5)、(7)、(8)。

2.2 负荷经济分配

遗传算法中的选择操作需要各个体的适应值，由遗传算法得到机组组合，然后根据负荷经济分配结果计算发电成本。本文采用粒子群算法处理负荷经济分配。

$$x,v=(p_{\min}+a(p_{\max}-p_{\min}))u \tag{10}$$

式中: $p_{\max}$、$p_{\min}$ 分别为机组出力的上下限；a 为(0,1)之间的随机数；u 为机组状态。

在粒子群算法中，按式(10)初始化粒子的速度和位置，并按式(11)更新粒子速度。

$$v_{ij}(n)=wv_{ij}(n)+c_1r_{1,i}(n)[p_{ij}(n)-x_{ij}(n)]+ c_2r_{2,i}(n)[\hat{p}_j(n)-x_{ij}(n)] \tag{11}$$

式中：$v_{ij}(n)$ 为第 n 个粒子群中粒子 i 第 j 维的速度；c_1 和 c_2 为加速率；$r_{1,i}(n)$ 和 $r_{2,i}(n)$ 为(0,1)上的随机数；$p_{ij}(n)$ 为第 n 个粒子群中粒子 i 的极值在 j 维的位置；$\hat{p}_j(n)$ 为第 n 个粒子群的极值在 j 维的位置；$x_{ij}(n)$ 为第 n 个粒子群中粒子 i 第 j 维的位置；w 为惯性权重，且

$$w=w_{\max}-(w_{\max}-w_{\min})\times Iter/MaxIter \tag{12}$$

式中: $w_{\max}=0.9$，$w_{\min}=0.4$，$Iter$ 为当前迭代次数，$MaxIter$ 为最大迭代次数。

得到更新后的粒子速度，按式(13)更新粒子位置。

$$x_{ij}(n)=x_{ij}(n)+v_{ij}(n) \tag{13}$$

如果位置更新后，$x_{ij}(n)$ 大于 $p_{\max}$，则 $x_{ij}(n)=p_{\max}$；小于 $p_{\min}$，则 $x_{ij}(n)=p_{\min}$。得到粒子位置后计算目标函数值，并更新粒子群的极值位置和粒子的极值位置。计算目标函数时，用罚函数处理不满足式(4)、(9)的情况，并用罚函数处理平衡节点机组不满足式(6)的情况。t 时段第 k 个粒子对应的第 i 台机组的出力为

$$p_{it}(k)=x_{ik}(t) \tag{14}$$

综上，遗传粒子群混合算法优化机组组合的流程如图 1 所示。

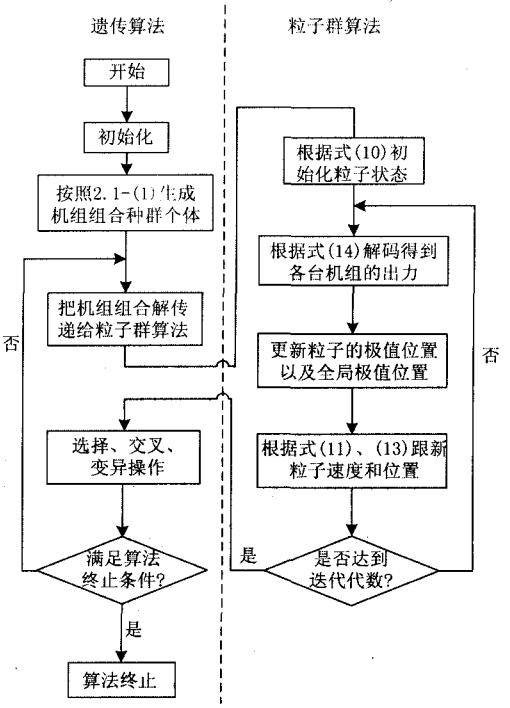

图 1 遗传粒子群混合算法的流程图

Fig. 1 Flow chart of the GA and PSO hybrid algorithm

3 仿真结果与分析

3.1 仿真参数

机组参数、负荷等数据见文献[4]。仿真实验参数如下：遗传算法中，种群个体数为 40，迭代次数 50，交叉算子 0.6，全天变异算子 0.6，单点变异算子 0.5；粒子群算法中，粒子数为 20，迭代次数为 50，惯性权重如式(12)，加速因子 c_1 和 c_2 为 2.05。

3.2 算例结果和分析

用遗传粒子群混合算法(GA-PSO)对10机系统24时段内的机组组合问题进行优化计算，计算46次得到的燃料耗量结果分布如图2所示，得到最差解 80 277.27 t相对于最好解78 862.72 t的偏差为1.79%，且偏差在1%以下的次数达到71.74%。由46次平均计算结果可以得到混合算法的收敛曲线如图3所示。由此可见，提出的混合算法具有较好的寻优能力和收敛性。

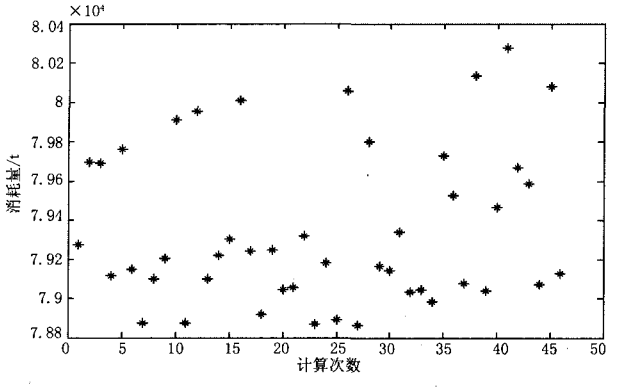

图 2 实验结果分布图

Fig. 2 Distributed chart of experiment results

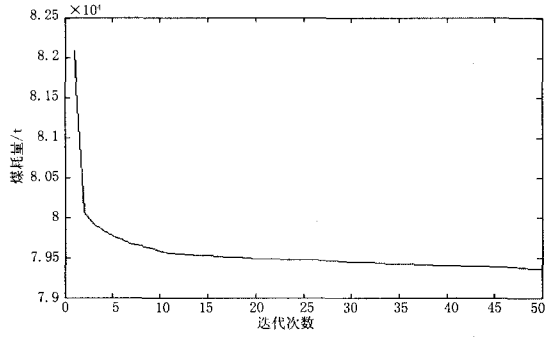

图 3 遗传粒子群混合算法收敛性

Fig. 3 Convergency of the GA and PSO hybrid algorithm

计算 46 次得到的燃料耗量最好结果与拉格朗日松弛算法(LR)[4]、遗传算法(GA)[5]、蚁群算法(ACO)[12]、蚁群粒子群混合算法(ACO-PSO)[13]的结果比较见表 1。10 机系统优化的经济分配结果见表 2，出力为 0 表示停机状态，不为 0 表示开机状态。

表 1 采用不同算法得到的燃料消耗量结果

Tab. 1 Results of fuel consumption by different algorithms

算法	LR	GA	ACO	ACO-PSO	GA-PSO
燃料耗量/t	81 245.5	79 807	79 455.46	79 010.1	78 862.72

表 2 机组组合经济分配

Tab. 2 Economic dispatch of unit commitment

时刻	机组出力/MW							
	机组 1~3	机组 4	机组 5	机组 6	机组 7	机组 8	机组 9	机组 10
1	0.0	120.0	76.8	174.4	207.3	424.1	500.3	497.1
2	0.0	119.9	0.0	186.0	214.9	435.5	515.7	508.0
3	0.0	120.0	0.0	176.5	209.1	422.2	517.1	495.1
4	0.0	120.0	0.0	171.1	205.9	417.5	494.8	490.7
5	0.0	120.0	0.0	164.6	196.8	397.1	484.7	476.7
6	0.0	120.0	0.0	174.2	200.5	404.7	489.4	481.1
7	0.0	120.0	0.0	166.9	192.5	397.6	477.4	465.6
8	0.0	119.8	0.0	157.6	175.6	376.1	437.3	433.7
9	0.0	120.0	0.0	0.0	177.4	362.4	425.1	425.1
10	0.0	120.0	0.0	0.0	161.8	334.4	395.2	398.7
11	0.0	0.0	0.0	0.0	166.9	341.4	405.2	406.5
12	0.0	0.0	0.0	0.0	150.2	310.1	368.4	371.3
13	0.0	0.0	0.0	0.0	149.7	309.8	369.5	371.0
14	0.0	0.0	0.0	0.0	144.2	299.5	356.5	359.8
15	0.0	77.4	0.0	0.0	129.9	276.5	325.7	330.5
16	0.0	80.1	0.0	0.0	134.7	278.4	331.3	335.4
17	0.0	95.3	0.0	0.0	145.0	300.8	357.9	361.1
18	0.0	113.5	0.0	0.0	158.0	326.5	393.3	388.7
19	0.0	120.0	0.0	0.0	182.4	369.8	444.3	443.6
20	0.0	119.7	0.0	150.5	182.1	369.6	439.7	438.5
21	0.0	120.0	0.0	170.5	193.7	398.7	469.5	467.5
22	0.0	120.0	0.0	169.9	205.9	418.7	494.9	490.6
23	0.0	120.0	0.0	183.4	209.3	433.4	500.6	503.3
24	0.0	120.0	0.0	179.7	221.7	445.0	520.0	503.6

通过表 1 可以看出，智能算法的结果优于传统算法，而混合智能算法又优于单一智能算法。GA-PSO 算法计算出的运行耗量为 78 655.44 t 标准煤，启动耗量为 207.280 5 t 标准煤，总耗量为 78 862.7 t 标准煤。较文献[4]LR 算法节省 2.932 8%(2 382.779 t 标准煤)。较文献[5]一般 GA 节省 1.183 2%(944.279 2 t 标准煤)。较文献[13]ACO-PSO 节省 0.186 5% (147.379 2 t 标准煤)。如果不设置全天变异操作，则 GA-PSO 求得的耗量最低为 80594.02 t 标准煤，通过负荷经济分配结果发现，这时小机组还有一台开机，且大机组没有能够全天开机，这可能是造成总耗量高的原因。

4 结语和展望

按照节能调度“上大压小”的思路，在 GA 中设置了全天变异算子，达到了多开大机组，少开小机组的目的，提高了寻优能力。在 PSO 中设置了自适应惯性权重，改善了收敛性能，防止负荷经济分配陷入局部最优。下一步工作，将按照节能调度排序规则，将机组按照能耗水平排序，那么 PSO 进行负荷经济分配时，对式(4)就可以避免使用罚函数，机组出力和小于负荷时，由低能耗到高能耗依次提高机组的出力，大于时就由高能耗到低能耗依次降低机组的出力，直至满足式(4)，最后的结果则更能体现节能原则。

参考文献

[1] Swarup K S，Yamashiro S. Unit Commitment Solution Methodology Using Genetic Algorithm[J]. IEEE Trans on Power Systems，2002，17(1)：87-91.

[2] Padhy N P. Unit Commitment–a Bibliographical Survey[J]. IEEE Trans on Power Systems，2004，19(2)：1196-1205.

[3] Snyder W L，Powell H D Jr，Rayburn J C. Dynamic Programming Approach to Unit Commitment[J]. IEEE Trans on Power Systems，1987，2(2)：339-350.

[4] 韩学山，柳焯. 考虑发电机组输出功率速率限制的最优机组组合[J]. 电网技术，1994，18(6)：11-16.
HAN Xue-shan，LIU Zhuo. Optimal Unit Commitment Considering Unit's Ramp-rate Limits[J]. Power System Technology，1994，18(6)：11-16.

[5] 蔡超豪，蔡元宇. 机组优化组合的遗传算法[J]. 电网技术，1997，21(1)：44-47.
CAI Chao-hao，CAI Yuan-yu. Optimization of Unit Commitment by Genetic Algorithm[J]. Power System Technology，1997，21(1)：44-47.

[6] 孙力勇，张焰，蒋传文. 基于矩阵实数编码遗传算法求解大规模机组组合问题[J]. 中国电机工程学报，2006，26(2)：82-87.

SUN Li-yong，ZHANG Yan，JIANG Chuan-wen. A Solution to the Unit Commitment Problem Based on Matrix Real-coded Genetic Algorithm[J]. Proceedings of the CSEE，2006，26(2)：82-87.

[7] Habib R M，Hasan M S，Caro L. A New Genetic Algorithm with Lamarckian Individual Learning for Generation Scheduling[J]. IEEE Trans on Power Systems，2003，18(3)：1181-1186.

[8] 娄素华，余欣梅，熊信艮，等. 电力系统机组启停优化问题的改进 DPSO 算法[J]. 中国电机工程学报，2005，25(8)：30-35.
LOU Su-hua，YU Xin-mei，XIONG Xin-yin，et al. Unit Commitment Using Improved Discrete Particle Swarm Optimization Algorithm[J]. Proceedings of the CSEE，2005，25(8)：30-35.

[9] 李丹，高立群，王珂，等. 电力系统机组组合问题的动态双种群粒子群算法[J]. 计算机应用，2008，28(1)：104-107.
LI Dan，GAO Li-qun，WANG Ke，et al. Dynamic Double-population Particle Swarm Optimization Algorithm for Power System Unit Commitment[J]. Computer Applications，2008，28(1)：104-107.

[10] 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 Trans on Power Systems，2006，21(1)：411-418.

[11] 吴金华，吴耀武，熊信艮. 基于退火演化算法和遗传算法的机组优化组合算法[J]. 电网技术，2003，27(1)：26-29.
WU Jin-hua，WU Yao-wu，XIONG Xin-yin. Optimization of Unit Commitment Based on Annealing Evolutionary Algorithm and Genetic Algorithm[J]. Power System Technology，2003，27(1)：26-29.

[12] 郝晋，石立宝，周家启，等. 基于蚁群优化算法的机组最优投入[J]. 电网技术，2002，26(11)：26-31.
HAO Jin，SHI Li-bao，ZHOU Jia-qi，et al. Optimal unit Commitment Based on Ant Colony Optimization Algorithm[J]. Power System Technology，2002，26(11)，26-31.

[13] 陈烨，赵国波，刘俊勇，等. 用于机组组合优化的蚁群粒子群混合算法[J]. 电网技术，2008，32(6)：52-56.
CHEN Ye，ZHAO Guo-bo，LIU Jun-yong，et al. An Ant Colony Optimization and Particle Swarm Optimization Hybrid Algorithm for Unit Commitment Based on Operate Coding[J]. Power System Technology，2008，32(6)：52-56.

收稿日期：2008-06-24；　修回日期：2008-07-14

作者简介：

张　炯(1981-)，男，硕士研究生，研究方向为电力系统稳定与控制；E-mail：johnjohn20081204@126.com

刘天琪(1962-)，女，博士，教授，博士生导师，IEEE会员，研究方向为电力系统分析计算与稳定控制，高压直流输电和调度自动化；

苏　鹏(1985-)，男，硕士研究生，研究方向为电力系统稳定与控制。

（上接第 24 页　continued from page 24）

DING Xiao-qun，SUN Jun，YUAN Ning-bo. A New Method of Preprocessing the Input Data in BP Network[J]. Power System Technology，1998，22(11)：62-63.

[12] 张周胜，肖登明. 油溶解气体色谱分析中的小型真空在线脱气技术[J]. 电力系统自动化，2007，31(11)：92-96.
ZHANG Zhou-sheng，XIAO Deng-ming. A Small Vacuum Online Extraction Technology for the Automatic Chromatographic Analysis of Gas Dissolved in Insulating Oil[J]. Automation of Electric Power Systems，2007，31(11)：92-96.

[13] 周利军，吴广宁，张星海，等. 基于加权模糊度时间序列分析的大型变压器故障预报[J]. 电力系统自动化，2005，29(13)：53-56.
ZHOU Li-jun，WU Guang-ning，ZHANG Xing-hai，et al. Prediction of Power Transformer Faults Based on Time Series of Weighted Fuzzy Degree Analysis[J]. Automation of Electric Power Systems，2005，29(13)：53-56.

[14] 中华人民共和国国家经济贸易委员会. DL/T722-2000. 变压器油中溶解气体分析和判断导则[M]. 北京：中国电力出版社，2001.

[15] 中华人民共和国电力工业部.DL/T596—1996.电力设备交接和预防性试验规程[M].北京：中国电力出版社，2000.

[16] 中华人民共和国电力工业部，DL/T 572—1995，电力变压器运行规程[M].北京：中国电力出版社，1995.

收稿日期：2008-06-17

作者简介：

潘　超（1981-），男，硕士研究生，研究方向为优化算法在电力系统中的应用；

马成廉（1983-），男，硕士研究生，研究方向为电力系统故障诊断技术。E-mail:alian0220224@163.com