

改进型遗传算法在机组负荷优化组合中的应用

杨 昆, 欧阳光耀, 陈海龙

(海军工程大学 船舶与动力学院, 湖北 武汉 430033)

摘要: 针对某舰用电站机组负荷组合的特点, 提出了一种基于浮点数和二进制数统一编码的改进遗传算法, 并进一步对算法中的编码解码方式、初始种群生成、约束条件处理、遗传算子映射及控制参数调节等作了改进, 解决了机组优化组合的0-1混合整数非线性规划问题. 改进后的算法不仅较好地处理了机组优化组合中的各种约束条件, 同时改善了算法的收敛性. 优化结果表明机组油耗率降幅最大可达2%, 效果显著.

关键词: 遗传算法; 优化分配; 惩罚函数

中图分类号: TP301.6 **文献标识码:** A

Optimization of unit commitment of marine power system using improved genetic algorithm

YANG Kun, OUYANG Guang-yao, CHEN Hai-long

(College of Ship and Power Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan Hubei 430033, China)

Abstract: In accordance with the characteristics of the unit commitment problem in marine power system, we propose an improved genetic algorithm with both float-point coding and binary coding. To apply the nonlinear 0-1 mixed integer programming to the optimization of the unit commitment, other items in the algorithm are modified accordingly, including the coding and decoding modes, initial population creation, constraint conditions disposal, fitness function selection, genetic operators and the control parameters modulation. In the application of this improved algorithm, not only the constraint conditions can be handled more readily, but the convergence speed and the solution precision are also improved. The application advantage is demonstrated by a 2% reduction in average oil consumption rate.

Key words: genetic algorithm; unit commitment; penalty function

1 引言(Introduction)

舰用电站机组燃油消耗率随工况的变化而变化, 如果在不同工况下都能实现机组负荷的优化分配以使总燃油消耗实现对应工况下的最小化, 便可节省大量燃油, 大幅提高舰船的续航能力, 军事经济效益显著.

机组负荷优化分配问题属于大规模、非线性、混合整数规划问题, 很难找出理论上的最优解. 等微增率法^[1], 优先顺序法等较早使用的优化方法, 由于没有严格的理论依据, 仅仅依靠直观的判断或经验, 往往找不到最优解; 动态规划法是解决多阶段决策过程最优化的一种常用数学方法, 但当机组台数及约束条件数目增加时计算规模呈指数关系增长, 存在维数障碍. 拉格朗日松弛法^[1]在求解过程中存在振荡性, 甚至出现奇异.

遗传算法在求解非线性问题时表现出较强的鲁棒性、全局优化性和并行处理性, 在相关问题的求

解中得到了广泛应用. 文献[2~4]中对基本遗传算法在该问题中的应用进行了深入研究, 上述算法的应用中涉及了最优个体保存、惩罚因子动态自适应调整等改进思想, 但还存在优化结果与实际负荷有时不能准确匹配、处理多峰值复杂优化问题时效果不够理想等缺点, 在约束条件处理、保障群体多样性以及收敛准则判定等方面还有待改进.

针对上述传统遗传算法在应用中所存在的缺陷, 本文将二进制-浮点数混合编码、惩罚函数结合部分分解约束、交叉率自适应线性调节等思想融入其中, 提出了一种改进算法, 并将其运用于某舰典型航渡工况下一个调度周期内的负荷优化计算中, 运算结果表明, 该方法收敛性好、适应性强、计算速度快, 能够使计算结果更有效地接近全局最优解.

2 机组优化组合问题数学描述(Unit commitment problem mathematical description)

机组负荷优化分配问题是指在满足电力需求以

及机组运行技术要求情况下,考虑全部机组的油耗特性,确定出一个调度周期内各机组的启停机时间以及机组出力的最优分配,使全舰总燃料耗量实现最小化.设调度周期为24h,并跟据负荷的变化将之分为24h段进行计算,系统中等效机组台数为 G ,各时段的电力系统总负荷为 P_{Dt} ,则其数学模型可描述如下:

1) 目标函数:

$$\min F(U_{it}, P_{it}) = \sum_{t=1}^{24} \sum_{i=1}^G [U_{it} \cdot F_i(P_{it}) + U_{it} \cdot (1 - U_{i(t-1)}) \cdot S_i], \quad (1)$$

式中: U_{it} 表示机组 i 在 t 时段的运行状态,取1时表示机组在运行,取0时表示停机; P_{it} 表示机组 i 在 t 时段的功率变量; S_i 表示机组 i 热态再启动时的启动耗量,它和停机时间 T 的长短有关, $S_i = S_{0i} + S_{1i}(1 - e^{-T/\tau_i})$; S_{0i}, S_{1i}, τ_i 为机组 i 的启动耗量特性参数.

2) 机组运行耗量特性. 机组的运行耗量特性采用3次多项式形式:

$$F_i(P_{it}) = a_i P_{it}^3 + b_i P_{it}^2 + c_i P_{it} + d_i, \quad t = 1, 2, \dots, 24; i = 1, 2, \dots, G, \quad (2)$$

式中 a_i, b_i, c_i, d_i 为机组 i 的运行耗量特性参数.

3) 功率平衡约束. 将网损作常数处理,则功率平衡方程为:

$$\sum_{i=1}^G U_{it} \cdot P_{it} = 1.1 P_{Dt}, \quad t = 1, 2, \dots, 24, \quad (3)$$

式中 P_{Dt} 表示全舰在 t 时段的总负荷,假定机组发电效率为10%.

4) 机组出力上下限约束:

$$P_{i \min} \leq P_{it} \leq P_{i \max}, \quad t = 1, 2, \dots, 24, \quad (4)$$

式中: $i = 1, 2, \dots, G, P_{i \max}, P_{i \min}$ 为机组出力上下限.

5) 机组运行效率约束. 按系统总负荷的8%考虑机组出力容量:

$$\sum_{i=1}^G U_{it} \cdot P_{i \max} \geq R_t, \quad t = 1, 2, \dots, 24. \quad (5)$$

这里备用容量取 $R_t = 1.08 \times 1.1 \times P_{Dt}$.

6) 发电机组的启停约束:

$$\sum_{t=1}^{24} |U_{it} - U_{i(t-1)}| \leq M_i, \quad i = 1, 2, \dots, G, \quad (6)$$

$$(U_{it} - U_{i(t-1)}) \sum_{j=t-T_1}^{t-1} (1 - U_{ij}) \geq T_1, \quad t = 1, 2, \dots, 24, i = 1, 2, \dots, G, \quad (7)$$

$$(U_{it} - U_{i(t-1)}) \sum_{j=t-T_2}^{t-1} (1 - U_{ij}) \geq T_2, \quad t = 1, 2, \dots, 24, i = 1, 2, \dots, G. \quad (8)$$

式中 M_i 为第 i 号机组在计算周期内机组允许的最大启停次数; T_1 为机组允许的最小连续停运小时数; T_2 为机组允许的最小连续运行小时数.

可见, 机组优化组合的问题是一个有整形变量 U_{it} , 连续变量 P_{it} 及非线性函数 $F_i(P_{it})$ 的混合整数非线性规划问题.

3 遗传算法及其改进(Genetic algorithm and its improvement)

传统遗传算法在解决单峰值函数优化时比较有效,但对多峰值复杂函数优化问题往往搜索停止在未成熟阶段. 机组负荷优化分配问题是一个峰值点非常多的复杂优化问题,每一种可能的运行机组组合都至少有一个峰值点,因此当机组台数较多时,传统遗传算法往往很难找到全局最优解. 为加快寻优速度,避免算法过早收敛,本文将最优个体保存、自适应交叉概率等思想融入到算法中,以一个调度周期(暂定为24h)内总燃油耗量最少为进化方向,对算法中的编码解码方式、初始种群生成、约束条件处理等均作了改进,提高了算法的寻优效率,在精度上亦能够保证寻优结果非常接近全局最优解.

3.1 求解中对遗传算法的改进(Improvement upon genetic algorithm)

1) 染色体编码方法.

采用浮点数编码表示机组有功功率,则对每个时段 $t(t \leq 24)$,可以用 G 个浮点数来表示一条染色体,其中第 i 个($i \leq G$)浮点数表示机组 i 在 t 时段的出力. 由于发电机组的启停状态只有两种,因此可用二进制位来表示其对应状态,则第 i 台机组共有24位,其中第 j 位($j = 1, 2, \dots, 24$)表示机组 i 在第 j 时段的启停机状态. 按机组编号顺序排列得 G 台机组的二进制编码,作为群体中的一个个体如图1所示.

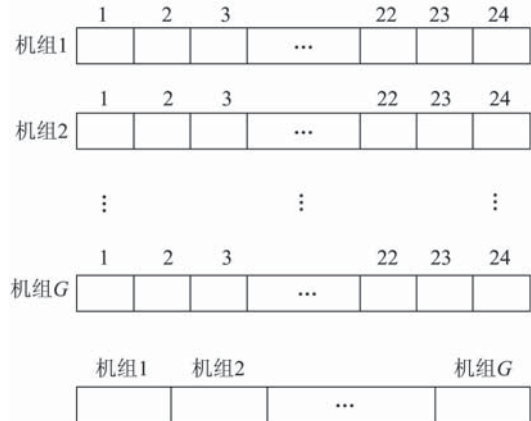


图1 机组组合的二进制编码

Fig. 1 The binary representation of unit commitment

2) 种群初始化.

为防止算法达到预置的最大代数限制时算法还不能收敛,算法在初始化机组状态 U_{it} 时,不是单纯

随机产生0-1序列作为机组运行状态的初始解,而是在赋值后首先判断这一序列的合理性,当全舰电力负荷位于这一序列机组的可能最高负荷与可能最低负荷闭区间内时则为合理的机组运行状态组合,否则重新初始化机组的运行状态,直到生成所有初始解为止,这保证了初始解群中的每一个个体都是满足一定约束条件的可行解.

3) 对适应函数及约束条件的处理.

a) 适应度函数.

对处于“开”状态的机组用浮点遗传算法进行负荷分配.本文考虑通过罚函数法将原问题转化为只含不等约束的规划问题,令其增广目标函数为:

$$\min F(U_{it}, P_{it}) + \sum_{t=1}^{24} \sum_{i=1}^G \sum_{k=1}^4 \sigma_{(i,t,k)} R_{(i,t,k)}, \quad (9)$$

$$R_{(i,t,k)} = \begin{cases} |g_{(i,t,k)}(x)|, & g_{(i,t,k)}(x) \text{ 为等约束,} \\ \max(0, g_{(i,t,k)}(x)), & g_{(i,t,k)}(x) \text{ 为不等约束.} \end{cases} \quad (10)$$

式中: $F(U_{it}, P_{it})$ 为机组组合目标函数; $\sigma_{(i,t,k)}$ 为第 k 种约束的惩罚系数; $R_{(i,t,k)}$ 为第 k 种约束形式.

式(9)中包含了机组备用约束、启停次数、最短连续运行时间和最短停机时间等,而发电功率上下限约束等均在最优负荷分配时考虑.将式(9)中的最小化问题转化为最大化问题得到机组组合优化的适应度函数:

$$f = \frac{1}{F + \sum_{t=1}^{24} \sum_{i=1}^G \sum_{k=1}^4 \sigma_{(i,t,k)} R_{(i,t,k)}}. \quad (11)$$

根据个体适应度确定个体的选择概率,个体适应度越大被容易被遗传到下一代的概率就越高.

b) 部分解约束.

在编制负荷优化分配软件过程中发现单纯采用罚函数法解约束的方法存在问题:即由于初始化的可行解太少会引起优秀基因被过早淘汰而引起早熟^[5].因而算法在约束条件的处理中又加入了部分解除约束的改进思想:

i) 在初始化过程中,各机组随机分配负荷,最后一台运行状态的机组的负荷设置如下:

$$P_G = P_{Dt} - \sum_{i=1}^{G-1} U_{it} P_{it}, t = 1, 2, \dots, 24, \quad (12)$$

$$\text{If } P_G < L \text{ then } P_G = L,$$

$$\text{If } P_G > H \text{ then } P_G = H.$$

式中 H, L 为第 G 台机组负荷的上下限.

ii) 在每次交叉、变异后同样执行一次上述操作.

通过这一操作使不满足约束的个体基因也接近可行解的边界,因此各个体基因的优劣基本能得到体现,而不会被惩罚函数的作用掩盖.

4) 选择算子.

为防止在染色体平均适应值不断提高的同时,各代最佳染色体适应度值却下降的情况发生,引入了最优个体保存策略,这样可减少算法迭代代数.

5) 交叉算子.

a) 对机组状态组合0-1代码串的交叉操作:

为防止无效交叉的发生,对二进制代码串进行有选择的交叉,即规定交叉的位置必须进行在各时段块之间而不允许在某时段块内进行,这样做保证了那些满足了约束条件的时段块在交叉中不会被破坏掉,从而使交叉后的子代仍能满足约束条件.

b) 实数部分交叉操作:

采用单点交叉算子既能使新个体满足约束,将解向量限制在可行域内,又保持了群体多样性.

此外,由于交叉概率 P_c 是影响算法性能的重要参数,采取自适应交叉方式可较好地改善遗传算法性能.因此本算法采用了不等交叉概率搜索的方法,采用逐步减小的交叉概率进行交叉次数的控制,这样操作能使子代个体均匀分布在优化空间中,从而提高了整个算法的收敛速度^[6].具体操作如下:

$$P_c = P_{c0} - P_{c\text{-step}} \times k, \quad (13)$$

其中: P_{c0} 为初始交叉概率; $P_{c\text{-step}}$ 为交叉概率减少步长; k 为遗传代数.

6) 变异算子.

同交叉运算一样,变异部分也分别进行:

a) 二进制方面:

模仿上述分块交叉方法,将变异操作控制在随机选取的一个时段内进行,同时对已发生变异的块内部分约束条件进行检查,不满足的令其重新变异,直到满足为止.

b) 实数变异方面:

设个体 x 是被随机选中的变异父本, j 为变异点,保持其它负荷不变则可得 P_j 的取值范围

$$[\max(P_{Dt} - P_{G\text{max}} - \sum_{i=1, i \neq j}^{G-1} P_i, P_{j\text{min}}), \min(P_{Dt} - P_{G\text{min}} - \sum_{i=1, i \neq j}^{G-1} P_i, P_{j\text{max}})],$$

在此范围内随机选择一个值代替 P_j 原来的值以实现变异,进行这样的变异操作后得到的新个体仍然是满足所有约束条件的.

7) 收敛判据的改进.

传统的GA仅以最大遗传代数作为终止进化的准则,势必会使最优解在早于最大遗传代数之前出现的情况时浪费时间,因此本文以最优个体最少保留代数与最大遗传代数相结合作为终止进化的判据,避免了单因素控制准则的缺陷.

4 算例结果分析(Analysis of the results)

本文对某舰用电站1#~3#3台260kW发电机组的运行数据进行实例研究, 其中1#机组的油耗曲线如图2所示, 其它两台机组的油耗曲线略有差别但趋势基本一致, 由图可见用等微分量法等求解无法满足其对函数性态的要求, 因而本文选用遗传算法进行求解, 基于前面所述改进遗传算法的思想, 依据该电力系统典型负荷曲线, 用MATLAB语言编制了该系统机组优化组合程序, 为验证所提方法的正确性与有效性, 本文对机组功率分配进行了优化计算, 并与机组实际耗量进行了比较, 其结果如下表1、表2和表3所示. 表2、表3为一个调度周期内典型负荷曲线下的优化结果, 由优化结果可知机组优化最大工况处平均油耗率降幅可达2%, 则若该舰按此典型工况

周期航行的情况下, 一次出航就可节省数吨燃油, 节油效果显著.

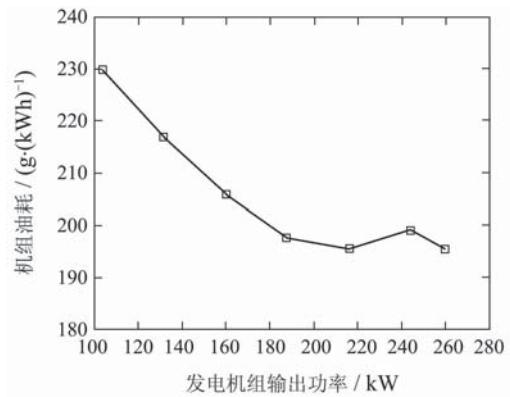


图 2 单台机组油耗曲线

Fig. 2 The oil rate curve of the unit

表 1 系统负荷及储备功率数据

Table 1 The system load and the deposited power data

T/h	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
P_{Dt}/kW	750	743	728	712	690	701	682	637	566	528	495	450
P_R/kW	66	65	64	63	61	62	60	56	50	46	44	40

T/h	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
P_{Dt}/kW	450	435	427	435	472	517	585	637	682	712	731	746
P_R/kW	40	38	38	38	42	45	51	56	60	63	64	66

表 2 机组负荷分配组合结果

Table 2 The commitment results of the unit load

U_{it}

T/h	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
1# 机组	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2# 机组	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
3# 机组	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1

表 3 机组功率优化分配结果

Table 3 The optimization results of the unit power

T/h	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1# 机组/kW	260.0	260.0	257.6	260.0	215.9	260.0	209.8	212.9	189.6	175.6	236.1	260.0
2# 机组/kW	260.0	241.0	260.0	260.0	260.0	219.6	260.0	211.1	189.6	176.2	259.9	190.0
3# 机组/kW	230.0	242.9	210.4	192.0	216.0	220.4	210.2	212.0	188.7	176.2	0.0	0.0
实际油耗/(g·(kWh)⁻¹)	198.7	198.9	199.1	198.7	197.7	198.2	197.0	195.1	197.2	200.6	198.9	196.5
优化油耗/(g·(kWh)⁻¹)	195.9	197.8	195.7	195.7	195.4	195.7	195.2	195.1	197.2	200.6	196.9	196.2

T/h	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
1# 机组/kW	260.0	217.8	214.1	217.8	260.0	260.0	194.5	212.9	209.8	260.0	260.0	260.0
2# 机组/kW	190.0	218.2	213.9	218.2	212.0	257.0	194.5	211.1	260.0	260.0	260.0	241.0
3# 机组/kW	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	194.9	212.0	210.2	192.0	212.0	242.9
实际油耗/(g·(kWh)⁻¹)	196.5	159.6	195.2	195.6	198.5	196.3	196.2	195.1	197.0	198.7	199.1	198.9
优化油耗/(g·(kWh)⁻¹)	196.2	195.6	195.2	195.6	198.2	196.2	196.2	195.1	195.2	195.7	195.3	197.8

5 结论(Conclusions)

本文以某舰用电站系统为例,介绍了改进遗传算法求解电站机组负荷优化模型的方法和步骤.实例运算结果表明:作为一种优化算法,遗传算法确实具有很强的寻优性能,虽然相对于其它负荷分配方法,在求解大规模的机组组合优化问题时遗传算法可能要多花费几秒钟时间,但本方法可用于解决目标函数不可微、甚至不连续的问题,因此该算法具有较高的工程应用价值及推广意义.

参考文献(References):

- [1] 陈皓勇,王锡凡. 机组组合问题的优化方法综述[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(4): 51 - 56.
(CHEN Haoyong, WANG Xifan. A survey of optimization-based methods for unit commitment[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 1999, 23(4): 51 - 56.)
- [2] 冉鹏,张树芳. 基于遗传算法的热电厂负荷优化计算方法[J]. 汽轮机技术, 2006, 48(1): 17 - 20.
(RAN Peng, ZHANG Shufang. Genetic algorithm for thermal power generating unit load optimal distribution[J]. *Turbine Technology*, 2006, 48(1): 17 - 20.)
- [3] 张伯泉,杨宜民,宋宗峰. 基于遗传算法的风-光互补发电系统的动态优化[J]. 中国电力, 2007, 40(4): 78 - 81.
(ZHANG Boquan, YANG Yimin, SONG Zongfeng. Dynamic optimization of wind/photovoltaichybrid power systems based on genetic algorithms[J]. *Electric Power*, 2007, 40(4): 78 - 81.)
- [4] KAZARLIS S A, BAKIRTZIS A G, PETRIDIS V. A genetic algorithm solution to the unit commitment problem[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 1996, 11(1): 83 - 92.
- [5] 周克民,胡云昌. 遗传算法计算效率的改进[J]. 控制理论与应用, 2002, 19(5): 812 - 814.
(ZHOU Kemin, HU Yunchang. Improvement of computational efficiency for genetic algorithms[J]. *Control Theory & Applications*, 2002, 19(5): 812 - 814.)
- [6] 陈长征,王楠. 遗传算法中交叉和变异概率选择的自适应方法及作用机理[J]. 控制理论与应用, 2002, 19(1): 41 - 43.
(CHEN Changzheng, WANG Nan. Adaptive selection of crossover and mutation probability of genetic algorithm and its mechanism[J]. *Control Theory & Applications*, 2002, 19(1): 41 - 43.)

作者简介:

杨 昆 (1981—), 男, 博士研究生, 上尉, 目前研究方向为动力机械及热力系统的建模、仿真及优化使用, Email: yangkundexiangzi@sina.com;

欧阳光耀 (1964—), 男, 教授, 博士生导师, 大校, 目前研究方向为动力机械的结构设计与优化方法, Email: ouyanggy@126.com;

陈海龙 (1983—), 男, 博士研究生, 上尉, 目前研究方向为动力机械的控制理论与技术, Email: chenhailong1125@163.com.