

基于 Queen-bee 进化的遗传算法在电力系统经济调度中应用

秦梁栋

(华中科技大学 电气与电子工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 为提高遗传算法的寻优能力, 引入模拟自然界蜂王繁殖的改进型遗传算法(QEBGA)。概述了 QEBGA 的实现过程, 指出基本遗传算法(SGA)采用轮盘赌选择机制选择种群个体, 以普通变异算子对种群作变异操作; 而 QEBGA 采用启发式选择机制选择种群个体, 按比例分别以普通变异算子和强变异算子对种群作变异操作。详述了电力系统经济调度问题表述为极小化下的总费用函数及约束优化问题。最后, 用 6 台发电机系统和 13 台发电机系统的模拟实验比较了 QEBGA 和 SGA 两种算法在优化性能上的差异, 实验结果说明了相同种群规模下, QEBGA 的寻优时间小于 SGA; 系统规模越大, QEBGA 在计算精度上的优势就越突出。

关键词: Queen-bee 进化; 遗传算法; 经济调度

中图分类号: TM 73; TP 18

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2005)05-0064-03

0 引言

近年来, 遗传算法^[1](简称 GA)作为一种新型的随机优化算法, 已被成功地用来寻找商业、工程和科学领域中问题的满意解。GA 是基于自然选择和遗传学原理的有效搜索方法, 能在存在大量干扰的工业数据大系统中动态寻优, 在给定时间内搜索问题的较好解, 在大系统优化与控制中已得到初步应用。但 GA 在解决更难、更大的系统优化与控制问题时, 面临着计算、搜索时间过长和过早收敛这两个主要困难。因此, 将 GA 与其他算法相结合的混合算法^[2,3]已成为遗传算法发展的趋势。由于遗传算法的结构是开放式的, 与问题本身无关, 所以它很容易和其他算法结合, 本文即采用此策略改进 GA 以提高其性能。

Queen-bee 进化是模拟自然界中蜂王繁殖这一生态行为发展而来。基于 Queen-bee 进化的遗传算法^[4]即根据此原理改进 GA 的选择过程以提高 GA 的寻优能力, 但同时算法可能会由此而陷入早熟性收敛, 因此, 在变异过程中对种群中的某些个体进行强变异是必要的, 它可以提高种群个体的多样性, 在极大程度上减少早熟性收敛现象的发生。

本文以电力系统经济调度问题为背景, 通过模拟系统的实例验算表明了所提出的算法十分有效。

1 基于 Queen-bee 进化的遗传算法实现

基于 Queen-bee 进化的遗传算法实现过程如下:

Step 1. 随机产生初始种群, 假定每代种群规模为 N ;

Step 2. 计算种群中每个个体的适应度值;

Step 3. 根据如下启发式规则选择进入下一代的种群, 即按个体适应度值选取当代种群中最优的个体作为蜂王个体, 则进入下一代的种群中有 $N/2$ 是由蜂王个体构成, 其他 $N/2$ 对应于蜂王个体随机选择;

Step 4. 按 p_c 进行交叉操作, 其中 p_c 为交叉算子;

Step 5. 按 δ 对部分种群个体以 p_m 进行变异操作, 对其他种群个体以 p'_m 进行变异操作, 其中 δ 为参与普通变异的个体在种群中所占比例, p_m 为普通变异算子, p'_m 为强变异算子, 一般, $p_m < 0.1$, $p'_m > p_m$;

Step 6. 若不满足终止条件, 转 Step 2, 否则进入 Step 7;

Step 7. 输出种群中最优的个体作为问题的满意解或最优解。

基于 Queen-bee 进化的遗传算法(QEBGA)与基本遗传算法(SGA)主要有以下两点不同:

a. SGA 采用轮盘赌选择机制选择种群的 N 个个体; 而 QEBGA 采用启发式选择机制, 即令第 $t-1$ 代种群中的最优个体作为蜂王个体, 于是第 t 代种群个体中有 $N/2$ 是由蜂王个体构成, 其他 $N/2$ 则对应于蜂王个体随机选择;

b. SGA 对所有种群个体以 p_m 进行变异操作; 而 QEBGA 按比例 δ 对部分种群个体以 p_m 进行变异操作, 对其余的种群个体则以 p'_m 进行变异操作。

2 电力系统经济调度和约束优化

电力系统经济调度是解决负荷需求满足下最经济的发电机功率分配。若实时电力系统由 n 台发电机组成, 则经济调度问题可表述为极小化如下总费用函数 f :

$$f = \sum_{i=1}^n f_i(P_i) \tag{1}$$

$$f_i(P_i) = c_i + b_i P_i + a_i P_i^2 \tag{2}$$

式中 P_i 和 $f_i(P_i)$ 分别为第 i 台发电机的出力和费用函数; a_i, b_i, c_i 是第 i 台发电机费用函数 f_i 的系数。

经济调度问题满足平衡约束和发电机运行极限:

$$\sum_{i=1}^n P_i = P_D + P_L \tag{3}$$

$$P_{i,\min} \leq P_i \leq P_{i,\max} \tag{4}$$

式中 $P_{i,\min}$ 和 $P_{i,\max}$ 分别为第 i 台发电机的最小和最大出力; P_D 为总的负荷需求; P_L 为线路总的传输损耗。

注意到 f 不必是光滑和凸的, 则电力系统经济调度可转化为如下非光滑约束优化问题:

$$\begin{aligned} \min f(x) \\ \text{s. t. } g_i(x) = 0 \quad i = 1, 2, \dots, p_1 \\ h_j(x) \geq 0 \quad j = 1, 2, \dots, p_2 \end{aligned} \tag{5}$$

式中 x 为代表所有发电机出力向量, 即 $P_1, P_2, \dots, P_n$; g_i 和 h_j 分别代表等式约束(3)和不等式约束(4)。

这类优化问题的求解普遍采用罚函数法。罚函数 $F(x)$ 定义为

$$F(x) = f + \sum_{i=1}^{p_1} \lambda_i g_i^2 + \sum_{j=1}^{p_2} \mu_j [\min(0, h_j)]^2 \tag{6}$$

式中 λ_i 和 μ_j 为适当选择的罚因子, $\lambda_i, \mu_j > 0$ 。

于是, 优化问题(1)就转化为 $F(x)$ 的无约束极小化问题。

3 模拟实验

为了比较 QEBGA 和 SGA 在优化性能上的差异, 本文给出两个电力系统经济调度问题的典型算例(为简明起见, 两个算例都忽略了线路的传输损耗)。在此应用研究中, QEBGA 与 SGA 均采用二进制编码策略, 每个变量的染色体编码长度为 10, 种群个体数目为 100; 应用的进化算子有单点交叉算子($p_c = 0.5$)、单点普通变异算子($p_m = 0.01$), 以及单点强变异算子($p'_m = 0.6$), 参与普通变异的个体在种群中所占的比例($\delta = 0.7$); 适应度函数取为 $K F$ (K 为 1 个较大常量, 用来放大 $1/F$ 的函数值, 使得适应度函数值在遗传选择过程中能在一个较大的范围内变化)。

3.1 算例 1

算例 1 出自文献[5], 有 6 台发电机, 目标函数较为简单。其具体数据如下:

$$\begin{aligned} F_1 &= 0.001\,562P_1^2 + 7.92P_1 + 561.0 & 100 < P_1 < 600 \\ F_2 &= 0.001\,94P_2^2 + 7.85P_2 + 310.0 & 100 < P_2 < 400 \\ F_3 &= 0.004\,82P_3^2 + 7.97P_3 + 78.0 & 50 < P_3 < 200 \\ F_4 &= 0.001\,39P_4^2 + 7.06P_4 + 500.0 & 140 < P_4 < 590 \\ F_5 &= 0.001\,84P_5^2 + 7.46P_5 + 295.0 & 110 < P_5 < 440 \\ F_6 &= 0.001\,84P_6^2 + 7.46P_6 + 295.0 & 110 < P_6 < 440 \end{aligned}$$

系统的总负荷需求分别为 800 MW, 1 200 MW, 1 800 MW。

用 SGA 和 QEBGA 分别求得该经济调度问题的结果如表 1 所示。

表 1 6 机系统经济调度结果比较
Tab.1 Economic dispatch results of 6-unit system by SGA and QEBGA

方法	P_L /MW	P_{G1} /MW	P_{G2} /MW	P_{G3} /MW	P_{G4} /MW	P_{G5} /MW	P_{G6} /MW	$C_{Tot}/\text{\$}$	t/s
SGA	800	109.17	104.08	52.04	305.05	114.83	114.83	8 232.89	11.46
QEBGA	800	104.89	102.87	51.74	314.18	113.16	113.16	8 231.03	2.62
SGA	1 200	142.55	117.80	58.90	515.20	182.78	182.78	11 493.74	14.83
QEBGA	1 200	131.50	129.05	52.08	494.08	200.61	200.61	11 480.03	4.43
SGA	1 800	222.42	190.73	95.36	555.63	367.92	367.92	16 589.05	16.66
QEBGA	1 800	250.49	215.43	109.92	572.84	325.66	325.66	16 585.85	7.44

注: $P_L, P_{G1} \sim P_{G6}$ 分别为系统总负荷及 6 台发电机出力; C_{Tot} 为总费用; t 为计算时间。

3.2 算例 2

算例 2 出自文献[6], 有 13 台发电机, 目标函数较为复杂。该发电机费用函数中包含正弦项, 由如下非光滑函数表示:

$$f(P) = c + bP + aP^2 + |e \sin[\rho(P_{\min} - P)]| \tag{7}$$

发电机费用系数及最大和最小出力如表 2 所示。用 SGA 和 QEBGA 分别求得该经济调度问题的结果如表 3 所示。

表 2 发电机费用系数
Tab.2 Cost coefficients of generators

发电机号	a	b	c	e	$P_{\min}$ /MW	$P_{\max}$ /MW	$\rho/(\text{rad} \cdot \text{MW}^{-1})$
1	0.000 28	8.10	550	300	0	680	0.035
2	0.000 56	8.10	309	200	0	360	0.042
3	0.000 56	8.10	307	200	0	360	0.042
4~9	0.003 24	7.74	240	150	60	180	0.063
10, 11	0.002 84	8.60	126	100	40	120	0.084
12, 13	0.002 84	8.60	126	100	55	120	0.084

注: 系统的总负荷需求为 2 520 MW。

表 3 13 机系统经济调度结果比较
Tab.3 Economic dispatch results of 13-unit system by SGA and QEBGA

方法	P_L /MW	P_{G1} /MW	P_{G2} /MW	P_{G3} /MW	P_{G4} /MW	P_{G5} /MW	P_{G6} /MW	P_{G7} /MW	P_{G8} /MW	P_{G9} /MW	P_{G10} /MW	P_{G11} /MW	P_{G12} /MW	P_{G13} /MW	C_{Tot} /\$
SGA	2 520	638.60	357.29	357.15	110.88	152.51	160.06	161.45	161.21	116.09	76.63	75.00	60.00	93.13	24 703.32
QEBGA	2 520	628.32	356.80	359.45	159.73	109.86	159.73	159.73	159.73	159.73	76.92	75.00	60.00	55.00	24 398.63

注： $P_L, P_{G1} \sim P_{G13}$ 分别为系统总负荷及 13 台发电机的出力； C_{Tot} 为总费用。

3.3 SGA 与 QEBGA 比较

比较表 1 及表 3 中的计算结果,可以得到 3 点结论。

a. 在相同种群规模的情况下,QEBGA 的寻优时间要小于 SGA。

b. 随着系统规模的增大,QEBGA 的计算精度要远优于 SGA。当系统规模较小时,QEBGA 在计算精度上的优势并不明显,即如在算例 1 所示的 6 机系统中,对于 3 种不同的负荷需求,SGA 相对 QEBGA 的计算误差最大仅为 0.12 % ;而一旦系统规模增大,则 QEBGA 在计算精度上的优势就得以充分体现,即如在算例 2 所示的 13 机系统中,SGA 相对 QEBGA 的计算误差就已经达到了 1.25 % ;

c. 两种算法的结果都位于最小值附近,说明这 2 种算法的优化性能都很好。

此外,文献[4]指出,参与普通变异的个体在种群中所占的比例 δ 对算法的性能有着显著的影响。对于具有许多局部最优点的问题而言, δ 的取值不宜过大,以防发生早熟性收敛。

4 结语

本文基于 Queen-bee 进化提出一种改进遗传算法,并以经济调度问题为背景,分别在 6 机和 13 机 2 个测试系统上验证了该算法的可行性。实验结果表明,该算法不仅能保留 SGA 随机全局并行搜索等特点,还能有效地克服 SGA 中出现的早熟性收敛等现象,使 GA 的全局收敛性及收敛速度两方面均得到提高,显示了该算法在电力系统经济调度领域具有

很大的应用潜力。

参考文献:

[1] 王小平,曹立明. 遗传算法——理论、应用与软件实现 [M]. 西安:西安交通大学出版社,2002.

[2] FUNG C C, CHOW S Y, WONG K P. Solving the economic dispatch problem with an integrated parallel genetic algorithm [A]. **Proceedings of International Conference on Power System Technology** [C]. Perth: IEEE, 2000. 1257 – 1262.

[3] ONGSAKUL W, RUANGPAYOONGSAK N. Constrained dynamic economic dispatch by simulated annealing genetic algorithms [A]. **Proceedings of International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies** [C]. Sydney: IEEE, 2001. 510 – 517.

[4] SUNG H J. Queen-bee evolution for genetic algorithms [J]. **Electronics Letters**, 2003, 39(6): 575 – 576.

[5] YALCINOZ T, ALTUN H, UZAM M. Economic dispatch solution using a genetic algorithm based on arithmetic crossover [A]. **IEEE Power Tech. Conference** [C]. Porto: IEEE, 2001. 581 – 584.

[6] WONG K P, WONG Y W. Genetic and genetic/simulated-annealing approaches to economic dispatch [J]. **IEEE Proceedings on Transmission and Distribution**, 1994, 141(5): 507 – 513.

(责任编辑:汪仪珍)

作者简介:

秦梁栋(1978 -),男,湖北武穴人,硕士研究生,主要从事进化算法在电力系统中的应用研究 (E-mail: qinliangdong@sohu.com)。

Queen-bee evolution based genetic algorithm to economic dispatch

QIN Liang-dong

(Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: A Queen-bee evolution based genetic algorithm (QEBGA), which simulates the reproduction of the queen-bee, is introduced to improve the optimization capability of the genetic algorithm. SGA selects individuals by the roulette mechanism and uses common mutation operator, while QEBGA adopts the heuristic mechanism and different mutation operators according to set proportions. The minimal total cost function and constraint optimization for power system economic dispatch are expounded. The simulative experiments for 6-unit system and 13-unit system are carried out to compare the optimization capability between QEBGA and SGA. Results show that, in same population size, the optimal searching time of QEBGA is less than that of SGA, and the larger the system is, the better the precision of QEBGA shows.

This project is supported by the National Natural Science Foundation of China (NSFC 50007002).

Key words: queen-bee evolution; genetic algorithm; economic dispatch