

40 49-54

# 进化规划在计及阀点 负荷的经济调度中的应用

石立宝<sup>①</sup> 徐国禹<sup>①</sup> 丰强<sup>②</sup>

TM732

(<sup>①</sup> 重庆大学电气工程系, 重庆, 400044; <sup>②</sup> 重庆市江北供电局; 第一作者 26岁, 男, 博士生)

**摘要** 探讨了模拟进化优化方法中的进化规划用以求解带有阀点负荷的经济调度问题, 在优化编码、适合度函数和变异量取值方面进行了研究, 进一步拓展了电力系统经济调度计算方法的应用前景, 最后给出一个6节点3机系统算例结果并与遗传算法进行比较, 证明其有效和简捷。

**关键词** 经济调度 / 进化规划; 遗传算法

中国图书资料分类法分类号 TM732; Q349.1

电力系统  
阀点

## 0 引 言

电力系统优化由于数学模型的非线性与离散性带来了计算上的困难, 人工智能方法, 勿需严格的数学模型, 它更适合处理模拟实际物理系统的数学模型中出现的非线性和离散性。

在经济调度 (Economic Dispatch, 简称 ED) 问题中, 发电机费用函数曲线是通过“热运行”实验所得到的数据点绘制而成。当汽轮机的每个蒸汽进汽阀门打开时, 都会产生一个脉动, 在发电机耗量  $F$  特性 (费用) 曲线上表现为一个个“阀点”, 如图 1<sup>[1]</sup> 所示, 大多数经典调度方法一般采用近似平滑的二次费用曲线, 如图 1 中虚线所示, 它忽略了阀点的影响, 这样对 ED 研究结果上导致了某些不精确, 为解决带阀点负荷的 ED 问题, 一种经典的

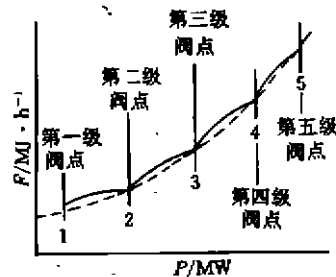


图 1 发电机耗量特性曲线

数学优化方法——动态规划 (Dynamic Programming, 简称 DP) 已经提出<sup>[2]</sup>, 但 DP 在问题中变量个数很多时, 其内存量和计算量都大得成为“灾难”, 造成所谓“维数灾”, 而无法实用, 一种基于生物进化论中自然基因和自然选择机制的模拟进化优化方法——遗传算法 (Genetic Algorithm, 简称 GA) 也已提出<sup>[3]</sup>, 该法以其全局收敛性、固有的并行处理特性、通用性及鲁棒性强等特点, 在解决带有非线性及离散性的问题上显示了其强大的优越性, 同时也为求解大规模问题带来了希望。

本文利用进化规划(Evolutionary Programming, 简称 EP)解决带阀点负荷的 EP 问题。EP 是由美国学者 Fogel L J 在本世纪 60 年代提出的<sup>[4]</sup>,但在 80 年代初期才得到普遍认同。EP 在原理上同 GA 有些相似(GA 的基本原理详见文献[5]),具有同样的优点。EP 以其特有的优化编码及变异方式,对所求解的优化问题无严格的限制,可以是非线性、离散的,方法采用随机优化技术,有较大的概率求得全局最优解,比用 GA 解决该类问题更能显示其优越性,文中的算例中作了验证。

## 1 进化规划

### 1.1 基本思想

EP 在原理上同 GA 相似,也是仿真生物进化的过程,将生物界中“优胜劣汰”规律引入到工程实际中,解决目标函数或约束条件不可微的复杂的非线性优化问题,在具体实现时,EP 与 GA 有两个方面的差别,即:

1) 基因编码方面。在 EP 中,问题的解虽然仍用数字串表示,但不象传统的 GA 那样要转换成二进制,EP 中的数字串表示方式根据问题的解的形式来确定,这样,EP 不象传统 GA 那样需要编码和译码;

2) 遗传操作方面。GA 主要通过交叉运算来模拟两代之间的遗传继承(即染色体继承),而 EP 中不采用交叉算子,它仅通过变异操作来维持两代之间的行为联系,这是 EP 与 GA 之间的显著区别。

### 1.2 主要步骤

EP 包括以下主要的步骤:

1) 将问题的解编码为数字串的形式,编码方式由变量的取值确定,无需转化成二进制。

2) 对变量  $X$  随机产生一个初始解群,初始代用以下方法产生:

$$X_i = \text{RND} \cdot (X_i^{\max} - X_i^{\min}) + X_i^{\min}$$

其中  $X_i, X_i^{\max}, X_i^{\min}$ ——第  $i$  个变量及其上限和下限值;RND—— $[0, 1]$  均匀分布发生器产生的随机数。这样,就可保证所产生的随机数位于  $[X_i^{\min}, X_i^{\max}]$  范围之内。

3) 对当前解群中每个个体进行变异产生子个体,具体表现为:

$$X' = X + \delta(\delta \sim N(0, \sigma^2))$$

$X', X$ ——子代及父代中的个体。

其中变异量  $\delta$  取均值为 0,方差为  $\sigma^2$  的高斯随机变量,式中  $\sigma^2$  可根据该个体的适应函数值来确定。由高斯随机分布曲线(如图 2 所示)可知,高斯分布的方差反映了分布分散的程度,对适合度越大的个体,其变异量应越小,而适合度越小的个体,其变异量应越大,这才符合生物进化过程。

4) 计算子个体的适合度函数值,适合度函数与所求解问题的目标函数和约束有关,视具体优化问题的模型而定。

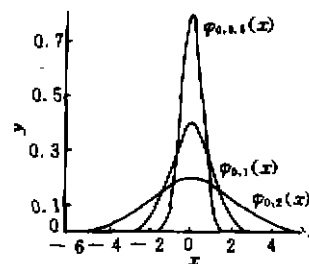


图 2 高斯分布密度  $\varphi_{\sigma}(x)$  曲线( $\sigma$  取 0.5, 1, 2 时)

5) 利用选择方法选出新一代解群后, 返回步骤 3), 重复此过程, 直至获得满意解或给定的迭代次数已达到。

### 1.3 选择方法

采用什么选择方法形成匹配集(从当前种群中选出适应值较大的  $n$  个串, 称这  $n$  个串的集合为一个匹配集)对 EP 的性能有很大的影响, 选择的方法多种多样, 如轮盘赌法(Roulette wheel method)<sup>[5]</sup>、竞争法(Tournament Method)<sup>[5]</sup>等。其中, 采用轮盘赌法, 数字串入选匹配集的概率是与其适应值大小成比例的。而这种与适应值大小成比例的选择方法时常会遇到两个方面的问题:

1) 超级数字串或超级个体(Super individual)问题。超级数字串在解群中占主导地位, 繁殖机会很多, 这样很有可能收敛到局部最优解。

2) 多个相似数字串问题, 也称封闭竞争(Close race)。“相似”在这里指的是数字串的结构和适应值的大小都相似或接近, 这样搜索过程就不能有效地进行, 从而难以找到全局最优解。

本文曾用两种方法作了初步计算<sup>[6]</sup>, 比较后用两两竞争的选择方法, 即每次从种群中随机选取两个串, 将适应值大的串加入匹配集, 如果两个串的适应值相等, 则任取其中的一个加入匹配集。重复此过程, 直至匹配集中包括  $n$  个串为止, 这样就避免了每个数字串入选的概率与其适应值的大小直接成比例, 同时又保证了加入匹配集中的串具有较大的适应值, 是一种比较好的方法。

## 2 EP 在计及阀点负荷的有功经济调度中的应用

### 2.1 计及阀点负荷的有功经济调度的数学模型

一般 ED 中, 目标函数为采用二次费用曲线的总耗量  $\sum F_i(P_i)$  最小, 当采用计及阀点的发电机耗量特性曲线时(如图 1 所示), 那么在调度模型中, 目标函数中相应增加了计及阀点影响的附加项  $\Delta F_i$ 。

计及阀点负荷的有功经济调度基本模型为

$$\left\{ \begin{array}{l} \min F(P) = \sum_{i=1}^S F_i(P_i) + \sum_{i=1}^S \Delta F_i(P_i) = \\ \quad \sum_{i=1}^S (c_i + b_i P_i + a_i P_i^2) + \sum_{i=1}^S |e_i \sin(f_i(P_i - P_{i0}))| \\ \text{s. t. } P_D + P_L = \sum_{i=1}^S P_i \\ \quad P_i \leq P_i \leq P_i \end{array} \right.$$

其中  $P_i$ —— 每台发电机出力;  
 $P_D$ —— 系统总负荷;  
 $P_L$ —— 系统网损;  
 $P_i, P_i$ —— 发电机出力下限和上限值;  
 $a_i, b_i, c_i$ —— 费用特性系数;

式中, 经整流的周期正弦项  $|e_i \sin(f_i(P_i - P_{i0}))|$  为计及阀点影响的附加项  $\Delta F_i$ ;

$e_i, f_i$ —— 阀点特性系数。

在上述模型中,系统总负荷  $P_D$  为固定值;网损  $P_L$  可采用系统总负荷的百分值估算或  $B$  系数的方法计算。

## 2.2 用 EP 求解 ED 的几个说明

EP 用于计及阀点负荷的有功经济调度模型时,在解算过程中将要遇到的一些问题作以下几点说明:

1) 确定编码方式。在 ED 中,取发电机出力作为变量,它为连续变量,本文采用浮点数编码方式,每台发电机出力构成一个码串,其具体表现形式如图 3 所示

$$\overline{X_1 \quad X_2 \quad \dots \quad X_i \quad \dots \quad X_s}$$

图 3 编码示意图

每台发电机出力构成码串的一个单位长度,总长度为  $S$ ,即系统总发电机台数。这样,采用发电机实际出力进行编码比采用二进制编码所需码串长度要短,且勿需解码。

2) 确定适合度函数,ED 是求极小值问题,而 EP 要求适合度函数越大越好,故本文采用如下形式的适合度函数:

$$h = K/F_E \quad (2)$$

式中  $K$ —— 放大因子(常数),为使染色体的适合度函数有更宽的范围;

$F_E$ —— 增广费用函数。

3) 增广目标函数及约束项的处理,在适合度函数中,等式约束以惩罚项的方式引入到增广费用函数  $F_E$  中,如:

$$F_E = \sum_{i=1}^S F_i(P_i) + C_E(\max(0, \sum_{i=1}^S P_i - P_D - P_L)) \quad (3)$$

$C_E$ —— 惩罚因子。

不等式约束的处理在形成初始种群及在变异中予以考虑,满足不等式约束的码串予以保留,不满足由淘汰。

4) 变异操作中方差  $\sigma^2$  的确定。在对当前种群中每一个个体进行变异时,高斯分布的方差  $\sigma^2$  的取值直接影响到最终的解,根据高斯随机分布曲线及适合度和变异量的关系,本文利用指数关系来描述方差  $\sigma^2$  随适合度  $h$  的变化情况:

$$\sigma_{i,j}^2 = A \cdot e^{B/h_{i,j}} \quad (i = 1, 2, \dots, \text{最大遗传代数}; j = 1, 2, \dots, \text{种群规模}) \quad (4)$$

其中  $A, B$ —— 系数;  $h_{i,j}$ —— 第  $i$  代中第  $j$  个子串的适合度值。

式(4)说明了适合度  $h$  越大,方差  $\sigma^2$  越小,变异量  $\delta$  越小,即发生变异的概率主经越小,如何控制好适合度  $h$  与方差  $\sigma^2$  的关系,系数  $A, B$  起到了相当重要的作用;利用系数  $B$  可以降低  $B \cdot h_{i,j}$  的值,防止因  $h_{i,j}$  较大而导致  $\sigma_{i,j}^2$  过早趋于零所引起的变异不充分;系数  $A$  则确保了对适合度值小的码串给予充分的变异,而抑制了适合度值大的码串的变异。本文算例中的寻优动态响应曲线(如图 4 所示)给出了  $\sigma^2$  随  $h$  的变化情况。

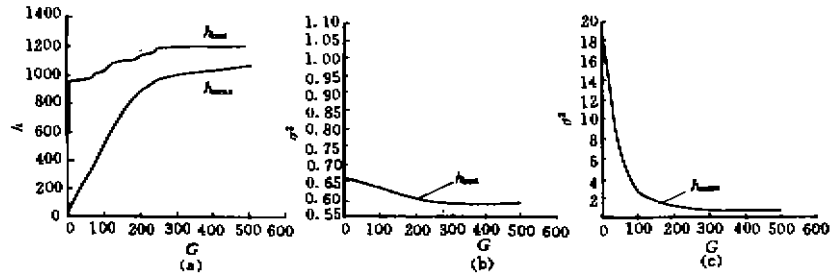


图 4 寻优动态响应曲线

### 3 实例分析

以文献[3]的 6 节点 3 机系统为例,系统数据详见该文献,系统总的有功负荷为  $P_D = 850$  MW;EP 执行环境参数如下所示:

种群规模  $N = 100$ ;遗传代数  $G = 500$ ;系数  $A = 20, B = 0.003$ .

这里给出 EP 计算结果,并与文献[3]采用二进制编码方案较好的方案 A 的 4 次 GA 算法(即使用 4 次不同的随机初始种群)所得的结果作为对比,见表 1. 表 1 中还给出了不计阀点负荷的经典拉格朗日法(Classical Lagrangian Algorithm, 简称 CLA)计算结果与上述两种方法计算结果作为对比。

表 1 EP、GA 及 CLA 法对 ED 的仿真结果[均未计及网损]

| EP              | GA       |          |          |          | CLA     |         |         |         | —        |
|-----------------|----------|----------|----------|----------|---------|---------|---------|---------|----------|
|                 | 1        | 2        | 3        | 4        | 1       | 2       | 3       | 4       |          |
| 运行次数            | 1        | 2        | 3        | 4        | 1       | 2       | 3       | 4       | —        |
| 发电机号            | 1        | 2        | 3        | 4        | 1       | 2       | 3       | 4       | —        |
| 1               | 399.509  | 299.933  | 499.653  | 400.225  | 498.4   | 299.1   | 398.7   | 392.1   | 393.086  |
| 2               | 251.339  | 397.140  | 249.658  | 399.119  | 250.4   | 399.0   | 399.6   | 308.4   | 334.536  |
| 3               | 199.152  | 152.927  | 100.690  | 50.656   | 100.5   | 150.8   | 50.1    | 149.7   | 122.199  |
| 系统总负荷 $P_D$ /MW | 850.000  | 850.000  | 850.001  | 850.000  | 849.3   | 848.9   | 848.4   | 850.2   | 849.821  |
| 总费用(美元)         | 8 258.15 | 8 271.72 | 8 243.41 | 8 243.77 | 8 249.0 | 8 239.2 | 8 240.3 | 8 425.7 | 8 192.72 |

由表 1 可以看出,EP 在找到最优解的同时又严格满足等式及不等式约束,GA 虽也找到最优解,但等式约束并不严格满足;同时,EP 不需要编码和译码,且不采用交叉算子,在编程效率和计算效率上,EP 要优于 GA,表 1 中还给出了不计阀点的经典法计算结果,由结果可知,阀上喷在经济调中将产生一定的影响。

为了说明 EP 的寻优过程及其收敛情况,同时观察  $\sigma^2$  和  $h$  的变化情况,图 4 给出了 EP 求解 ED 的寻优动态响应曲线。其中,图 4(a)给出了每一代中最好的个体适合度  $h_{max}$  和每一代的平均适合度  $\bar{h}$  两个指标随遗传代数的变化曲线,由曲线可知,随着遗传代数的增大,而逐步趋近最优解;图 4(b),(c)分别给出了相对于图 4(a)中两种适合度的方差  $\sigma^2$  随遗传代数的变化情况,由图 4(a)及(4)式可以看出,随着遗传代数增大时,图 4(b),(c)反映了  $\sigma^2$  及  $h_{max}$  及  $\bar{h}$  的增大呈递减趋势,图 4 所示均为 EP 第一次运行时的情况,其余运行情况与此类似,故未给出。

## 4 结 论

本文介绍了EP在电力系统有功经济调度中的应用前景,并对算法中的优化编码、适合度函数及变异量取值方面进行了探讨。指出了该法适合于求解任何类型发电机耗量特性曲线的ED问题,从而突破了传统经典法的限制;同时也指出,由于EP不象传统GA那样需要编码和译码,且仅采用变异算子,经实例研究表明EP比GA更适合于处理该问题。由于EP属模拟进化优化方法,也存在计算耗时长长的缺点。但是,计算机技术的发展及其内在的并行计算特性的开发弥补这个不足。

### 参 考 文 献

- 1 El-Hawary M E, Christensen G S. Optimal Economic Operation of Electric Power Systems. New York, San Francisco, London: ACADEMIC PRESS, 1979. 5~35
- 2 Shoultz R R, Venkatesh S V. A Dynamic Programming Based Method for Developing Dispatch Curves When Incremental Heat Rate Curves are Non-monotonically Increasing. IEEE Trans, 1986, PWRS-1(1): 10~16
- 3 David C W, Gerald B S. Genetic Algorithm Solution of Economic Dispatch with Valve Point Loading. IEEE Trans, 1993, PWRS-8(3): 1 325~1 332
- 4 Fogel L J, Qwers A J, Walsh M J. Artificial Intelligence Through Simulated Evolution. New York: John Wiley&Sons, 1966. 135~155
- 5 Goldberg D E. Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning. Michign: Addison-Wesley, 1989. 7~262
- 6 石立宝,牟道槐,华智明等.基于有功安全经济调度的遗传算法数值特性分析.电力情报,1997,(2):15~18

## Evolutionary Programming Solution of Economic Dispatch with Valve Point Loading

*Shi Libao Xu Guoyu Feng Qiang*

(Department of Electrical Engineering, Chongqing University)

**ABSTRACT** This paper describes an application of evolutionary programming (EP) to economic dispatch with valve point loading. Some technical problems (representations of candidate solutions, evaluation function, mutation operator) have been solved to expand the applicability prospects of the computational methods of economic dispatch. The proposal method is applied to a 6-bus-3-generator system and compared with the genetic algorithm (GA). Numerical results demonstrate the validity and effectiveness.

**KEYWORDS** economic load dispatching / evolutionary programming; genetic algorithm