

# 基于遗传算法的电力市场环境下电源规划的研究

丁明, 石雪梅

(合肥工业大学电气与自动化工程学院, 安徽省 合肥市 230009)

## Study of Generation Expansion Planning Based on Genetic Algorithms in the Environment of Electricity Market

DING Ming, SHI Xue-mei

(Hefei University of Technology, Hefei 230009, Anhui Province, China)

**ABSTRACT:** The paper puts forward the model and arithmetic through the study of the generation expansion planning in power system under the condition of electricity market. The model based on traditional planning demonstrates the cooperation of reliability, economy and centinuable development. The resolve to the objective function is obtained by the Genetic Algorithms based on Grefenstette coding. In the process of resolving, the model can not only get the best result and hypo-result, but also increase the scale and speed of computation. The obtained results of numeral examples indicate that the model and arithmetic are both reasonable and effective.

**KEY WORDS:** generation expansion planning; electricity market; model; genetic algorithms; Grefenstette coding

**摘要:** 通过对电力市场条件下电力系统电源规划的研究, 提出了市场环境下的电源规划模型和算法, 该模型以传统电源规划为基础, 在体现可靠性与经济性综合运筹的同时兼顾了可持续发展问题。该模型采用 Grefenstette 编码的遗传算法进行求解, 在求解过程中对简单遗传算法的算子进行了部分改进, 不仅能可靠获得全局最优解和次优解, 而且加大了求解规模与速度。给出的算例和结果表明该文提出的模型和算法均合理有效。

**关键词:** 电源规划; 电力市场; 模型; 遗传算法; Grefenstette 编码

## 0 引言

电力系统电源规划的目的主要是根据某一时期的负荷预测需求, 在满足一定的可靠性水平条件下, 寻求一种最经济实用的电源开发方案。即主要解决

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)基金项目(2004CB217905)。

Project Supported by the Special Funds for Major State Basic Research Projects of China (2004CB217905).

何时何地建何种类型多大容量的发电厂的问题<sup>[1]</sup>。随着电力市场化改革的深入, 电力系统电源规划日益受到重视。而我国目前电力市场环境下的电源规划工作面临着许多新难题, 特别是我国近年来的缺电情况, 更是引起人们对电源不足的充分认识, 国内各大电力集团公司纷纷以电力市场为导向, 以提高市场竞争能力、获利能力为目的, 加快发展。与此同时也造成某些地区一些电源项目匆忙上马, 导致电源建设的无序性。因此在综合考虑电力市场需求情况下, 如何使得电源布局和结构合理是规划工作者所面临的重要课题。

电源规划模型和求解要考虑 2 个方面的因素:

①模型的适应性。传统的电源规划模型仅以电厂固定投资与年运行费用最小为目标, 而在电力市场环境下, 项目具有未来不确定性和风险性, 在规划中要充分考虑企业的收益和可持续发展, 以全社会总成本最低和可持续发展以及保持市场竞争力为目标; ②模型的有效求解方法。由于电源规划问题的高离散性, 非线性, 高维数以及电力系统规模巨大等特点, 使得常规的优化算法无法准确对本模型求解, 如混合整数规划法的变量维数较高, 不适用于大型的电力系统规划; 动态规划法由于状态变量的维数较高, 计算速度很慢, 因而在大型系统中也不适用; 而拉格朗日松弛变量法对其算子的选择很困难, 若算子选择不当会使收敛速度减慢, 甚至不收敛。而遗传算法(GAs—genetic algorithms)是 1 种基于自然界自然选择和自然遗传机制的 1 种随机优化方法, 它作为 1 种全局优化搜索算法, 以其简单通用, 强鲁棒性和隐含并行处理等优点而得到广泛应用。

文献[2]提出的电力工业可持续发展的统一规划模型。强调电源与电网实行统一规划,在一定程度上解决了电源结构、布局、电网协调优化以及资源受限、环保等规划问题,且将系列运算理论应用于模型求解,大大减小了计算量,加快了计算速度。但在考虑电力市场的条件约束方面较为欠缺。

本文尝试将可靠性融入经济性,建立一个兼顾计划与市场双重因素的电源规划模型并采用基于Grefenstette染色体编码<sup>[3]</sup>的遗传算法求解,经算例表明本文提出的模型和算法均可行。

## 1 电力市场环境下的电力系统电源规划模型

### 1.1 目标函数

传统的电源规划模型仅以电厂固定投资与年运行费用最小为目标,而在电力市场环境下,项目具有不确定性和风险性,在规划中要考虑企业的收益和可持续发展问题,本文将可靠性融入经济性,兼顾了计划与市场的双重因素建立电源规划模型,模型的目标函数为基本投资、环境投资和保持市场竞争力投资的和,具体表达式为

$$\min B = \sum_{t=1}^N [(\sum_{i=1}^{N_f} a_{it} X_{it} + \sum_{j=1}^{N_h} b_{jt} Y_{jt}) + CRF(\sum_{i=1}^{N_f} C_{it} X_{it} + \sum_{j=1}^{N_h} d_{jt} Y_{jt} + \sum_{k=1}^{N_{f0}} e_{kt}) + \sum_{l=1}^{N_p} (V_{el} Q_l + V) + I_i \sum_{x=1}^{N_p+N_h} (Z_{prx} + Z_{compz})] \quad (1)$$

式中:  $\min B$  为目标函数;  $N$  为规划年;  $N_f$  为待建火电机组数;  $N_h$  为待建水电机组数;  $X_{it}$  为火电厂  $i$  在第  $t$  年投产机组台数;  $CRF$  为资金回收系数;  $a_{it}, C_{it}$  分别为火电厂  $i$  在第  $t$  年投产每台机组的固定费用、年运行费用现值总和;  $b_{jt}, d_{jt}$  分别为水电厂  $j$  在第  $t$  年投产每台机组的固定费用、年运行费用现值总和;  $e_{kt}$  为原有火电厂燃料费用;  $Z_{prz}$  为存货成本(裕度容量成本)等价发电机;  $Z_{compz}$  为缺货成本(切负荷损失赔偿费用)等价发电机;  $V_{el}$  为第  $l$  项污染物的环境价值)元/kW;  $n$  为污染物总数;  $Q_l$  为第  $l$  项污染物的排放量;  $V$  为减排污染物所付的成本费用(元);  $I_i$  为状态变量,  $i=1$  时,投产机组  $Z_{prz}$ ;  $i=0$  时投产机组  $Z_{compz}$

### 1.2 约束条件

(1) 由定义可知投资决策  $X, Y$  必须为整数且不小于零:  $X \geq 0, Y \geq 0$ 。

(2) 火电厂  $i$  的总装机台数不应超过最终给定的装机台数  $\sum_{t=1}^{N_f} X_{it} \leq N_{if} (i=1, 2, \dots, N_f)$ 。

(3) 火电厂每年投产机组的台数应受施工和及制造能力所容许投产台数的限制  $X_{it} \leq M_{it} (t=1, 2, \dots, N_t, i=1, 2, \dots, N_f)$ 。

(4) 在规划年的最小技术出力约束。

最小技术出力约束将在随机生产模拟的典型日运行方式模型中校验,如果不满足则要增加调峰措施,重新进行电源投资决策。

(5) 电力市场环境下的电力平衡。

$$\sum_{t=1}^t (\sum_{i=1}^{N_f} X_{it} W_i + \sum_{j=1}^{N_h} X_{jt} W_j) = P_t \quad (2)$$

式中:  $P_t$  为系统在第  $t$  年的负荷需求, kW; 且

$P_t = D_m^t (1 + R_{dt}) - \sum_{k=1}^{N_{g0}} W_{kt}$ ;  $D_m^t$  为第  $t$  年系统最大负荷;  $R_{dt}$  为容量备用系数;  $W_{kt}$  为原有机组  $K$  在第  $t$  年的出力或预想出力;  $N_{g0}$  为原有发电厂数。

(6) 电力市场条件下的电量平衡。

$$\sum_{t=1}^t (\sum_{i=1}^{N_f} X_{it} W_i H_i^{(t)} + \sum_{j=1}^{N_h} X_{jt} W_j H_j^{(t)}) = E_t \quad (3)$$

式中:  $E_t$  为系统在第  $t$  年需要新建发电厂新增发电量, 且

$$E_t = E_{kt} (1 + R_{et}) - \sum_{k=1}^{N_{g0}} W_{kt} H_k^t$$

其中:  $E_{kt}$  为第  $t$  年系统总需求电量;  $H_k^t$  为原有发电厂第  $t$  年的年利用小时数;  $R_{et}$  为电量备用系数, 即系统在第  $t$  年需要新建发电厂新增的发电量应等于第  $t$  年新增的可用电量。

(7) 考虑可持续发展约束。

$$Q_i \leq y_i$$

其中:  $Q_i = r_i E_t$ ,  $i$  为污染物项目;  $r_i$  为火电厂每单位发电量所排放的污染物的排放量, 即火电厂  $SO_2$ ,  $NO_x$  等污染物的排放量  $Q_i$  不应超过国家规定标准  $y_i$ 。

(8) 可靠性约束。

可靠性约束在生产优化模型中校验,并将校验结果反馈到电源投资决策中来。

(9) 保持市场竞争力投资约束<sup>[4-6]</sup>。

$$\begin{cases} Z_{prz} = C_A a(p) R_{dt} P_{kt} \\ Z_{compz} = \sum_{i=1}^{8760} P_{*} c_{ut} \Delta P_i(P) \end{cases} \quad (4)$$

式中： $a(p)$  为存货成本价格，与存货值大小有关，存货越多，此值越大； $C_A$  为商业可用系数<sup>[7]</sup>； $p_s$  为年缺货概率； $C_{ut}$  为切负荷单位赔偿费用(元/kW)<sup>[8]</sup>； $\Delta P_i(P)$  为不同时段切负荷容量

## 2 模型的求解<sup>[9-10]</sup>

### 2.1 模型求解的流程

基于遗传算法的电力市场环境下的电源规划模型的原理框图如图 1 所示。

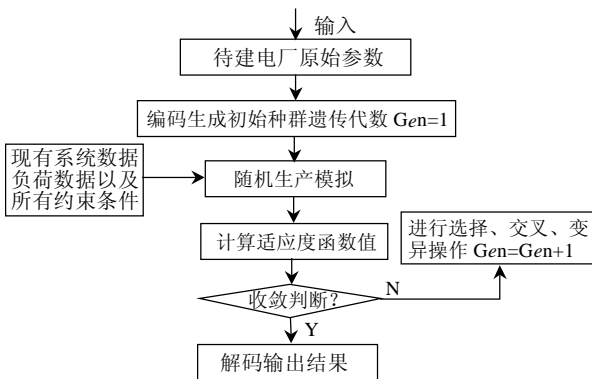


图 1 基于遗传算法的电力市场环境下的电源规划模型求解流程图

Fig. 1 The flow chart on the model of generation expansion planning based on GAs under the environment of electricity market

### 2.2 编码与解码方法

染色体编码是用遗传算法求解问题的基础,因而它是遗传算法能否应用于电源规划模型的关键。染色体编码必须遵循下列原则:①完备性,即问题空间中所有点(候选解)都能用 GA 空间中的点(染色体)表现;②健全性,即 GA 空间中的染色体都能对应问题空间中的所有候选解;③非冗余性,即染色体和候选解一一对应。

根据以上原则和电源规划模型的具体要求,本文采用 Grefenstette 编码法对模型进行染色体编码。使用该法编码能够使得任意的基因型个体都能够对应于一条具有实际意义的电源投建顺序,有效避免了无效染色体的产生。具体编码过程为:事先假定一个发电厂投产顺序  $T=(t_1, t_2, \dots, t_n)$ , 规定每投产一个发电厂,就从列表  $T$  中将该发电厂去掉,则用第  $i(i=1,2,3,\dots,n)$  个投建的发电厂  $t_i$ , 在所投建的发电厂列表  $T=(t_1, t_2, \dots, t_{i-1})$  中的对应位设置序号  $g_i(1 \leq g_i \leq n-i+1)$ , 就可表示具体投建的那个发电厂的基因编码,如此直至处理完所有待建发电厂,将全部的  $g_i$  顺序排列就表示事先假定的投建顺序的染

色体编码。根据上述原理,可以对待建发电厂的任一投入次序进行编码。现举例说明编码过程:例如某系统包括 8 个待建发电厂,编号分别为 1~8,定标初始母序为 Object 为 12345678。若待建发电厂的投建次序依次为 75286143, 则其染色体编码过程为:首先投入发电厂 7, 对应 Object 的第 7 位, 故染色体的首位编码为 7, 即  $code=7*****$ , 然后从初始母序中去掉发电厂 7, 则此时的 Object 为 1234568。接着投入发电厂 5, 对应当前 Object 的第 5 位, 故染色体的第二位编码为 5,  $code=75*****$ , 从应当前 Object 中去掉 5 后, Object 为 123468。依次类推, 电厂 2 的编码为 2, 电厂 8 的编码为 5, 电厂 6 的编码为 4, 电厂 1 的编码为 1, 电厂 4 的编码为 2, 电厂 3 的编码为 1, 染色体编码为 75254121。

解码过程为编码的逆过程, 限于篇幅, 不予阐述。

### 2.3 对产生初始种群的处理

基于区域电力系统中长期电源规划的特点, 本文对初始种群的群体规模(POPSIZE (取为 30~100, 如果在规划期内投建的电厂较多, POPSIZE 取较大值, 以利于收敛到全局最优解, 反之就取一较小值, 以加快收敛速度。其产生方法使用随机数生成法, 虽然遗传算法对于初始个体没有要求, 但是本文是通过预先设置进化代数来结束循环的。为了防止对于预先设置的代数迭代后不能够收敛, 本文在结合上述编码规则的基础上, 对生成初始种群的方法作了一点改进, 即在产生初始个体的同时, 用部分关键的约束条件来检验, 将不满足这些条件的初始个体放弃, 重新产生直到达到群体规模为止。

### 2.4 适应值的处理

本模型优化的目标是在满足各种约束条件下使系统在整个规划期综合支出最小。而基本遗传算法求解的是目标函数最大值。故本文所建模型目标函数必需作一些相应的转化才能运用遗传算法进行求解。本文构造适应度函数方法如下:

(1) 函数简化形式。

$$O_{Obi} = \sum_{t=1}^T (Z_{it} + U_{it} + G_{it}) r(1+r)^t / (1+r)^{(t-1)} + \sum_{s=1}^M b_k P_{fis} \quad (5)$$

式中:  $T$  为规划期;  $O_{Obi}$  为种群中个体  $i$  的目标函数值;  $Z_{it}$  为个体  $i$  在规划期  $t$  年新建各类电源及相应电网的总投资等年值;  $U_{it}$  为个体  $i$  在规划期  $t$  年用于

可持续发展方面总费用的等年值； $G_{it}$  为个体  $i$  在规划期第  $t$  年为保持市场竞争力总投资的等年值； $r(1+r)^t / (1+r)^t - 1$  为资金回收系数； $b_k$  为惩罚系数，通常取很大值，如  $10^8$  或者比  $10^8$  更大的数； $P_{fs}$  为个体  $i$  不满足约束条件的计算值。

## (2) 适应度函数。

遗传算法是根据适应度函数值大小实现迭代的一种算法，式(2)不能直接作为适应度函数，为此利用公式(2)构造适应度函数  $A_{AFi}$  如下：

$$A_{AFi} = (\sum_{k=1}^N O_{OBk} - O_{OBi}) / [(N-1) \sum_{k=1}^N O_{OBk}] \quad (6)$$

其中  $N$  为种群规模，由式(3)知目标函数越小，相应的适应度函数值  $A_{AFi}$  越大，且  $A_{AFi}$  满足

$$0 < A_{AFi} < 1, \sum_{i=1}^N A_{AFi} = 1。$$

## 2.5 基本遗传操作与改进<sup>[11-13]</sup>

### 2.5.1 基本选择操作与改进

常见的个体选择方法有多种，如确定式采样选择，无回放随机选择，排序选择等。本文根据适应度的特点，采用有退还随机选择，即赌盘选择。采用这种选择算子的优点是个体被选中的概率与该个体适应度大小成正比，即适应度较高的个体被遗传到下一代的概率较大，适应度较小的个体被遗传到下一代的概率较小。从理论上讲，最终是能够选出最优个体作为最终规划要求的结果，但是由于遗传操作是依概率采样，随机性比较大，因此选择下一代的优父本必然会出现误差，甚至误差较大，即一些适应度较高的个体有可能却被淘汰。为了减小这种随机操作带来的误差，本文通过大量的试验计算分析比较，认为采用稀疏度随机数选择法，就能够较好地减小这种误差。所谓稀疏度随机数选择法就是在模拟赌盘操作产生的 0—1 之间的随机数时，根据经验拟定期望值和方差，使得产生的随机数在期望值附近分布密，远离期望值的分布较稀疏。算例结果表明作此改进以后，振荡幅度与振荡频率明显下降，收敛趋势相对平稳。

### 2.5.2 交叉操作

本文采用单点交叉，其实现过程是：随机选择已经进行了选择操作的染色体作为父本，随机配对以后，对每一对相互配对的个体再随机设置某一基因座后的位置为交叉点，若染色体长度  $n$ ，则有  $n-1$  个交叉点位置，对每一对相互配对的个体，依给定的交叉概率  $p_c$  在其交叉点处相互交换 2 个个体的部

分染色体，从而产生 2 个新的个体。例如：下列 2 个染色体，当随机选取交叉点在第 5 位时，交叉后产生的 2 个新染色体如下所示。

$$\begin{bmatrix} 75254: & : & :121 \\ 41324: & : & :311 \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} 75254: & : & :311 \\ 41324: & : & :121 \end{bmatrix}$$

由 2.1 节编码和解码规则可知，上述一点交叉操作将电源投入顺序 7 5 2 8 6 1 4 3 和 4 1 5 3 8 7 2 6 两个父本改变成投入顺序分别为 7 5 2 8 6 4 1 3 和 4 1 5 3 8 2 7 6 的 2 个新的个体。

### 2.5.3 变异操作与改进

本文采用改进常规变异(改进基本位变异)，即对个体基因座依变异概率  $P_m$  选择变异点，随机选择已经进行交叉的染色体作为父本，再依概率随机选择个体的某一位进行等概率加一变异操作，如果变异点刚好取染色体首位基因且首位基因为初始模板的最后基因座，为防止溢出，则采用取模法变异该基因以形成一条新的染色体。例 1：对于个体 41324311，若随机选择变异点在第 2 位进行加 1 操作，则产生的新染色体为 42324311。显然此操作将电源投产顺序为 41538726 的父本改变为投产顺序为 42538716 的新染色体。例 2：对于个体 7413311，若随机选择变异点在第 1 位，则对该基因进行取模操作，使得产生的新染色体为 1413311，通过此变异操作将电源投产顺序为 7415623 的父本改变为投产顺序为 1526734 新的投产顺序。能够有效抑制无效个体的产生，增强寻优速度。

### 2.5.4 约束条件的处理

遗传算法中处理约束条件的常用方法有 3 种：搜索空间限定法，可行解变换法，罚函数法。本文采用罚函数法，对于不满足约束条件的个体，在计算适应度时处以 1 个罚函数，从而降低该个体的适应度，使其被遗传到下一代的机会减少。即对于不满足约束条件  $s$  的个体  $i$ ，记惩罚系数为  $b_k$ ，具体处理方法如下：如：目标函数  $\min B = f(x)$ ，约束  $A_x < B$ ； $C_x < D$  则  $Y = f(x) - b_k \cdot \max\{(A_x - B), (C_x - D) - \dots\}$  其中  $b_k$  为惩罚系数。

## 3 算例分析

### 3.1 不同的方案计算下的总投资结果

为说明问题，本文先利用规模较小的系统进行

研究，重点研究 3 个问题：①不同的方案计算下的总投资结果；②不同求解方法的计算结果和计算时间比较；③改进前后遗传算法的收敛特性。

计算中遗传参数设置的原则如下：根据试验结果分析比较，选择率的设置不能太大也不能太小，太大则容易导致种群中的优秀个体过渡集中，出现局部收敛；太小则容易导致有些优秀个体无法获选，致使寻优时间加长，甚至无法收敛，经过反复试验，取选择率为 0.65；交叉率为 0.78；变异率为 0.05；随机数种子为 0.68。

**方案 1** 运用本文所述算法和模型对某电力系统 12 个待建电源进行 7 年规划

**方案 2** 规划过程中不考虑提高市场竞争力部分和可持续发展部分，即仅仅针对该系统进行传统简单规划，其他条件与方案 1 同。

**方案 3** 规划过程仅不考虑可持续发展部分，其他条件与方案 1 同。

**方案 4** 不考虑电力市场环境因素的影响，其他条件与方案 1 同。

由表 1 可得到以下结论：

(1) 采用的投资决策模型不同，而总的投资费用有明显的差别，其中方案 3 与方案 1 相比由于考虑排污染所需费用一项，而多投资近 109.6 亿元。这项增加的投资主要用于购买安装火电厂脱硫装置以及治理火电厂的  $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_x$ 、 $\text{CO}_2$  等污染物排放对大气构成的污染，本文采用文献[14] 所列参数与方法计算出燃煤电厂的环境成本，作为处理污染费用，为说明问题，仅主要考虑  $\text{SO}_2$  项。

(2) 方案 2 与方案 1 相比，总投资虽然大为降低，但是由于我国具体的地理环境条件和其他影响规划的因素较多，如果不顾具体情况，规划出来的结果就缺少参考价值。方案 4，由于考虑了上马电源的商业可用条件与存缺货成本等诸多因素，使得总成本与方案 1 相差不多。

(3) 选择不同的规划方案得出的电厂投建顺序不同。方案 3 和方案 1 相比产生差别主要是因为当考虑到环境污染即可持续发展问题时所选厂址的远近与当地地理环境以及投建电厂的类型等都会影响投资量。

(4) 方案 4 和方案 3 相比产生差别的原因是，考虑电力市场诸多因素的牵制与约束，使得发电系统的稳定运行<sup>[15]</sup>与发电商利润最大化之间出现冲突，解决这一冲突目前比较有效的方法是引入商业

可用系数，将发电系统安全可靠融入经济性中。这样虽然一次性投资加大，但却兼顾了电能质量，电力市场，上网电价 3 个方面的因素，对于保持市场竞争力非常有利。

(5) 计算时间也会随着模型的复杂化而相应增加。模型所涉及到的变量越多，维数就越高，约束条件就会相应增加，这样在软件算法实现上就会增加长度和难度，使得计算时间必然增加。此外，本文在程序实现时使用了 2 种不同编程语言，存在不同语言之间的调用问题，因此，计算速度也相应受到了一定影响。为此，在后续工作中对该调用方式作出改进是一项比较紧迫的任务。

表 1 各方案的经济性指标

Tab. 1 The economic and delicacy indices of each case

方案	经济性指标			
	运行费用/亿元	总投资/亿元	各个电厂投建顺序	计算时间/h
1	515.7936	840.3468	3,7,1,8,12,5,2,4,9,10,11,6	5.3710
2	319.5167	644.0699	3,7,12,9,1,8,2,4,5,10,11,6	1.0320
3	406.1273	730.6805	1,6,3,7,12,9,8,2,5,10,4,11	3.6807
4	514.3508	838.9040	3,7,1,8,12,5,2,6,9,10,11,4	5.1435

### 3.2 不同求解方法规划结果和计算速度比较

由表 2、3 可得出如下结论：

(1) 由表 2 可以看出运用本模型规划所得最优投产顺序和动态规划完全一致，同时还表明本文所述的模型、算法不仅能够可靠地收敛到全局最优解，且还同时能够输出一组或多组次优解以供特殊情况下作参考用。

(2) 表 3 和图 2 给出了模型计算速度，由图 2 可以看出本文模型收敛速度与待建电源数近似呈线性关系，这种模型求解更有利于对于电力系统进行中长期规划。动态规划模型则近似呈指数关系，当系统待建电源数超过一定数目时，其计算速度优越性大大降低。

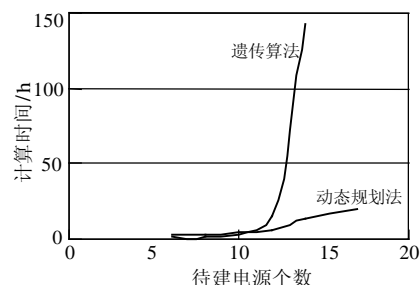


图 2 计算速度与待建电源数关系曲线

Fig. 2 The relationship between computation time and plants to be constructed

表2 规划结果一览表  
Tab. 2 Each case of optimal results

规划期	遗传算法最优解	次优解 1	次优解 2	动态规划法
1	3,7	8,7	3,7	3,7
2	1,8	1,3	1,8	1,8
3	12,5	12,5	12,5	12,5
4	2	2,4	11,4, 9	2
5	4,9,10	9,10	2	4,9,10
6	11	11	6	11
7	6	6	10	6
总成本/亿元	840.3468	840.8973	843.9762	837.9637

表3 模型计算速度  
Tab. 3 CPU time

待建电源数	本模型耗时/h	动态规划耗时/h
6	2.65341	0.98516
8	3.20873	1.47213
12	5.37102	15.6493

### 3.3 改进前后遗传算法的收敛特性

由图3~5所示曲线对比可得如下结论:

(1) 未加任何改进的遗传算法大约遗传到100代才开始收敛;若对产生初始种群和选择加以改进,大约到65代就开始收敛,收敛速度明显加快。

(2) 当初始种群选择方法、选择、变异均加以改进以后,曲线振荡频率明显降低,振荡幅度明显减小,收敛趋势相对平稳,从而有效地提高了寻优效率。

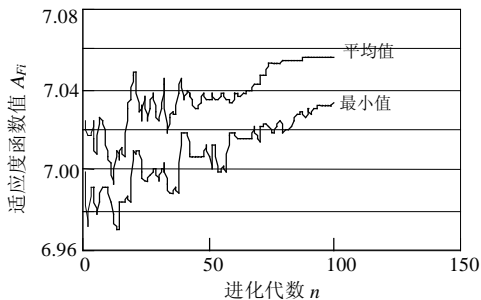


图3 对选择过程加以改进后的收敛曲线  
Fig. 3 Convergent curves of GA in amending selection operator

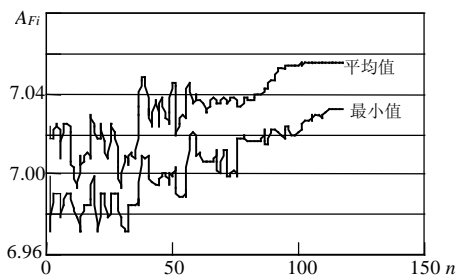


图4 对选择过程未加改进的收敛曲线  
Fig. 4 Convergent curves of GAs without amending selection operator

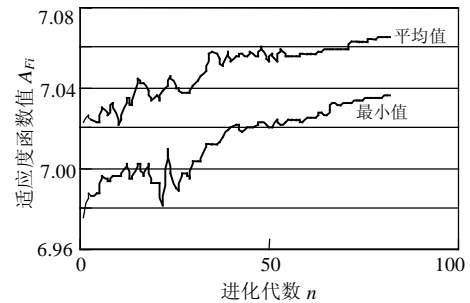


图5 对产生初始种群、选择、变异均加以改进后的收敛曲线

Fig. 5 Convergent curves of IGAs

## 4 结论

本文研究论述了电力市场环境电源规划的问题,主要结论如下所述:

(1) 本文模型的特点。

1) 在传统电源规划的基础上考虑可持续发展问题与电力市场环境因素,使得规划结果更加准确且有实用价值;

2) 目标函数中综合考虑了发电系统可靠性与经济性之间的协调,将  $C_A$  引入模型;

(2) 遗传算法作为一种具有“搜索+检测”的迭代全局优化搜索算法,其优越于其他算法最大特点是:群体搜索策略和群体之间的信息交换与搜索不依赖于梯度信息。故这种算法非常适用于电源规划这样高离散的非线性结构优化问题。本文针对实际情况对基本 GAs 算法作了部分改进,尤其是采用了 Grefenstette 编码法和约束条件初选随机种群,极大地降低了染色体冗余,提高寻优速度与准确度。

(3) 采用了基于半不变量法<sup>[6]</sup>的随机生产模拟计算,该算法具有计算速度快、占用储存容量小等特点,特别适用于中、大型电力系统。

(4) 本研究综合考虑了电力市场条件下可能出现的新情况、新问题,在建立了更为合理模型的同时采用更为合理算法进行求解,能够为电力部门提供更加经济、实用的规划方案。模型和算法已经编制成实用软件,对于系统的电源规划具有普遍适用性。

(5) 面对电力系统电源规划面临新的任务和挑战,本文虽然提出了一定的新思路和求解方法,但是由于电源规划本身具有的复杂性和不确定因素太多,因此无论是对于模型还是算法都有待进一步研究和改进,以便为市场形式下的电力规划建设提供更加有力的依据。

## 参考文献

- [1] 王锡凡. 电力系统优化规划[M]. 北京: 水利电力出版社, 1990.
- [2] 周安石, 康重庆, 洪元瑞, 等. 电力工业可持续发展的统一规划模型 [J]. 电力系统自动化, 2005. 29(7): 28-32.  
Zhou AnShi, Kang ChongQing, Hong YuanRui, et al. The unitive programming modle on power industrial continuable development [J]. automatiomg of electric power systems, 2005. 29(7): 28-32(in Chinese).
- [3] 周明, 孙树栋. 遗传算法的原理及应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1999.
- [4] 于尔铿, 韩放, 谢开, 等. 电力市场[M]. 北京: 中国电力出版社, 1998.
- [5] 龙军, 吴杰康, 王辑祥. 电力市场中实现生产成本最小化的策略性竞标与数学模型[J]. 电力系统自动化学报, 2003, 15 (5): 35-38.  
LongJun,Wu JieKang,Wang JiXiang. The mathematic model and the strategic bidding for realizing the mininal cost of production in electricity market[J]. Proceedings of the CSU-EPSSA, 2003, 15 (5): 35-38.
- [6] 陈建华, 李华, 蒋锦峰. 电力市场条件下发电设备可靠性与经济性关系探讨[J]. 中国电力, 2001, 34(7): 1-3.  
Cheng JianHua,Li Hua,Jiang Jingfeng. The discussing about the relation of reliability and economy on dynamoelectric equipments in electricity market[J]. Electric Power, 2001, 34(7): 1-3.
- [7] 谭伦农. 市场环境下电力系统安全性与经济性问题的探讨[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2003, 25 (4): 335-337.  
Tan LunNong. The discussing of security and economy in power system under the condition of electricity market[J]. Proceedings of the Khanxia University, 2003, 25 (4): 335-337(in Chinese).
- [8] 谭伦农, 张保会. 市场环境下的事故备用容量[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22 (11): 55-58.  
Tan LunNong, Zhang BaoHui. The fault spare capability under the condition of electricity market[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22 (11): 55-58(in Chinese).
- [9] 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.
- [10] 熊信银, 吴耀武. 基于遗传算法的电源规划模型[J]. 电网技术, 1999, 23(3): 11-14.  
Xiong Xinying , Wu Yaowu. The model of generationg expansion planning based on genetic algorithms[J]. Power System Technology, 1999, 23(3): 11-14(in Chinese).
- [11] TeixeiraFirmo H, Fernando L, Lggey L. Generation. expansion planning : an iterative genetic algorithm approach[J]. IEEE Transactions on Power Systems 2002, 17(3): 901-906.
- [12] Park J B, Pack Y M, Won J R. An improved gnetic algorithm for generation expansion planning[J]. IEEE. Transactions on Power Systems, 2000, 15(3): 916-922.
- [13] Park Y, Won J, Park J, et al. An improved genetic algorithm for generation expansion planning[J]. IEEE Trans. on Power Systems, 2000, 15: 916-922(in Chinese).
- [14] 魏学好, 周浩. 中国火力发电行业减排污染物的环境价值标准估算 [J]. 环境科学研究, 2003, 16(1): 53-56.  
Wei XueHao, Zhou Hao. The environment value standard of decrease pollution in thermal power plants in China[J]. Environment Science Study, 2003, 16(1): 53-56(in Chinese).
- [15] 丁明, 冯永清. 发输电设备联合检修安排模型及算法研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(5): 18-23.  
Ding Ming, Feng Yongqing. The modle and arithmetic on the maintenance scheduling of generate electricity combine with transmit power[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(5): 18-23(in Chinese).
- [16] 丁明, 冯永清, 宋云亭. 电源规划概率评估软件的设计与应用[J]. 电网技术, 2004, 28(4): 6-10.  
Ding Ming, Feng Yongqing, Song Yunting. The software and desige of probability evaluation on generationg expansion planning[J]. Power System Technology, 2004, 28(4): 6-10(in Chinese).

收稿日期: 2006-05-18.

作者简介:

丁 明(1956—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事电力系统可靠性、规划及新能源方面的研究, [charmingfox@126.com](mailto:charmingfox@126.com);  
石雪梅(1974—), 女, 硕士研究生, 主要从事电力市场与电力系统规划等方面的研究。

(编辑 王彦骏)