

# 多源注水系统泵站优化调度的 双重编码混合遗传算法<sup>1)</sup>

杨建军 刘 扬 魏立新 战 红

(大庆石油学院 大庆 163318)  
(E-mail: dqpiyjj@sohu.com)

**摘 要** 以耗电量最小为目标函数, 排量、压力等限制为约束条件, 建立了多源注水系统泵站优化调度数学模型. 遗传算法采用了二进制编码和实数编码相结合的双重编码, 并调整了适应函数, 采用随机多父辈适应函数值加权交叉和多种变异操作, 结合模拟退火算法, 给出了初温的确定方法, 形成了混合遗传算法. 该算法能够有效地提高收敛速度, 避免早熟收敛. 同时, 在操作过程中给出了泵排量的处理方法, 使各水量约束条件得到满足, 减少了不可行解的产生. 算例显示了该优化方法的有效性.

**关键词** 多源注水系统, 优化调度, 泵站, 混合遗传算法, 双重编码

**中图分类号** TP301.6

## Dual Coding Hybrid Genetic Algorithm for Optimal Schedule of Pumping Stations in Multi-Sources Water Injection System

YANG Jian-Jun LIU Yang WEI Li-Xin ZHAN Hong

(Daqing Petroleum Institute, Daqing 163318)

(E-mail: dqpiyjj@sohu.com)

**Abstract** A mathematical model for the optimal schedule of water injection pumping stations is established, in which the minimum electric power consumption is taken as the objective function, and the restrictions to the displacement and pressure are taken as constraint conditions. In the genetic algorithm dual coding is adopted, the fitness function is adjusted, and random parent-number fitness-weighted cross and many mutation methods are adopted. The simulated annealing algorithm is combined to give the method of determining initial temperature, thus the hybrid genetic algorithm is formed. It can improve the speed of convergence and avoid premature convergence. A processing method of displacement is proposed, so the displacement restrictions are satisfied and the number of infeasible solutions is reduced. Example shows that the algorithm is efficient.

**Key words** Multi-sources water injection system, optimal schedule, pumping station, hybrid genetic algorithm, dual coding

1) 黑龙江省自然科学基金 (E2004-19) 资助

Supported by the Natural Science Foundation of Heilongjiang Province (E2004-19)

收稿日期 2005-5-13 收修改稿日期 2005-10-31

Received May 13, 2005; in revised form October 31, 2005

## 1 引言

注水采油是我国陆上油田主要采油方式之一, 但注水本身也要消耗大量的电能, 在油田开发到中期以后, 注水耗电占油田总耗电的 40% 以上<sup>[1]</sup>, 而且随着原油含水率的增高, 耗电量急剧增加, 因此注水系统节能降耗对于降低油田生产成本具有重要意义.

油田注水系统是多源复杂注水系统, 其泵站优化调度的基本原理是在给定注水管网及注水量的情况下, 通过调整注水泵的开停状态及其排量, 寻找满足注水井配注要求及其它约束条件的最佳注水泵运行状况, 以达到降低系统能量损耗, 改善系统运行状态的目的. 多源注水系统泵站优化调度问题是一个涉及 0-1 变量、连续变量的大型非线性优化问题. [1] 中提出的优化方法, 把开泵台数当成小数, 计算完后再进行圆整, 无法保证结果的最优性. [2~4] 中讨论的优化方法, 均是采用两级优化方法, 基本原理是首先确定出注水站的最佳流量, 然后以此为基础选择站内注水泵开启方案, 这在注水站内没有调速泵的情况下很难求得最优解. [5] 是针对一个注水站内泵的组合方式和运行参数进行优化, 且站的出口扬程和流量给定, 并需逐一判断各组合方案的可行性, 该方法无法应用到多源复杂注水系统中.

本文针对油田注水系统的实际情况, 建立了多源注水系统泵站优化调度数学模型, 并探讨了混合遗传算法 (Hybrid genetic algorithm, 简称 HGA) 实现的技术问题, 及在多源注水系统泵站优化调度问题中的应用.

## 2 建立目标函数

以注水泵的开停方案及其排量作为设计变量, 注水系统耗电量  $f'$  最小为目标函数, 其数学模型为

$$\min f' = \gamma \sum_{i=1}^N \delta_i \frac{H_i Q_i}{\eta_{pi} \eta_{mi}} \quad (1)$$

式中:  $H_i$  为第  $i$  台注水泵的扬程, 其值为该泵的出口压力  $p_{oi}$  与入口压力  $p_{ei}$  之差;  $Q_i, \eta_{pi}$  为第  $i$  台注水泵的排量和效率;  $\eta_{mi}$  为驱动第  $i$  台注水泵电机的效率;  $N$  为注水泵总数量;  $\delta_i = 1$  或  $0$ ,  $1$  表示第  $i$  台注水泵运行,  $0$  表示停运;  $\gamma$  为单位换算系数.

约束条件为

1) 管网水力平衡条件<sup>[2]</sup>. 对于  $N_N$  个节点的注水管网, 节点  $i$  的平衡方程为

$$u_i - u'_i - \sum_{j \in I_i} s_{ij} \operatorname{sgn}(p_i - p_j) |p_i - p_j|^{1/\alpha} = 0, \quad i = 1, \dots, N_N - 1 \quad (2)$$

式中:  $u_i, u'_i$  为节点  $i$  的输出、输入流量;  $s_{ij}$  为节点  $i$  和  $j$  之间的管道阻力系数;  $p_i, p_j$  分别为节点  $i, j$  的压力;  $I_i$  表示与节点  $i$  相连的节点编号集合;  $\alpha$  为常系数;  $\operatorname{sgn}$  为符号函数, 定义为

$$\operatorname{sgn}(A) = \begin{cases} 1, & A \geq 0 \\ -1, & A < 0 \end{cases} \quad (3)$$

2) 水量平衡约束. 各注水泵的总供水量应等于各注水井的注水量之和 (即系统总用水量  $Q_{ALL}$ ), 即

$$\sum_{i=1}^N \delta_i Q_i = \sum_{j=1}^{N_w} u_j \quad (4)$$

式中:  $N_w$  为注水井总数量.

3) 泵排量约束. 各注水泵必须满足要求的最小和最大排量限制, 即

$$Q_i^{\min} \leq Q_i \leq Q_i^{\max}, \quad i = 1, \dots, N \quad (5)$$

式中:  $Q_i^{\min}, Q_i^{\max}$  分别为第  $i$  台注水泵的最小和最大排量.

4) 注水站供水约束. 注水站内各注水泵排量之和应满足该站的来水量要求, 即

$$\sum_{i \in I_j} Q_i \leq Q_{sj}^{\max}, \quad j = 1, \dots, S \quad (6)$$

式中:  $Q_{sj}^{\max}$  为第  $j$  注水站的最大来水量;  $I_j$  表示第注水站内注水泵的集合;  $S$  为注水站总数量.

5) 注水井压力约束. 各注水井的节点压力不应小于其要求的最低注入压力, 即

$$p_i \geq p_i^{\min}, \quad i = 1, \dots, N_w \quad (7)$$

式中:  $p_i^{\min}$  为第  $i$  口注水井要求的最低注入压力.

在管网仿真计算过程中, 管网水力平衡条件自动得到满足. 而在本文的遗传算法操作过程中水量平衡约束、泵排量约束和注水站供水约束也得到了满足.

利用外部惩罚函数法把式 (1) 和剩余约束条件式 (7) 转化为无约束问题, 则扩展后的目标函数为

$$\min f = f' + M \sum_{i=1}^{N_w} [\min(0, p_i - p_i^{\min})]^2 \quad (8)$$

式中:  $M$  为惩罚因子.

### 3 混合遗传算法实现

#### 3.1 编码

针对优化调度过程中要同时解决最优开泵及其排量两个问题, 本文采用双重编码. 第一行采用二进制编码, 用 1, 0 来表示该泵的开停状态; 第二行采用实数编码, 表示各泵的排量. 这样由一个长度为  $N$  的双重编码构成一条染色体.

#### 3.2 产生初始解

随机产生  $pop\_size$  (群体规模) 个长度为  $N$  的双重编码, 作为初始种群. 为了减少不可行解的产生, 产生初始解时各泵排量要同时满足水量平衡约束、泵排量约束和注水站供水约束. 对于某一个初始解产生时, 首先产生一个二进制编码, 并对其进行基本可行性判断: 1) 分别求出各编码为 1 的基因位对应泵的最小排量与最大排量之和, 并令其等于  $Q_{ALL}^{\min}, Q_{ALL}^{\max}$ , 判断  $Q_{ALL}$  是否在  $[Q_{ALL}^{\min}, Q_{ALL}^{\max}]$  范围内; 2) 分别求出各站中编码为 1 的基因位对应泵的最小排量之和, 并判断其值是否小于  $Q_{S_j}^{\max}$ . 如果满足上述两个条件, 则该开泵方案理论可行; 否则, 不可行, 需重新产生二进制编码. 利用  $U_k$  表示二进制编码为 1 的基因在染色体中的位置,  $k = 1, \dots, kn$ ,  $kn$  为二进制编码中为 1 的基因总个数. 然后, 随机产生各二进制编码对应的排量, 各实数编码的产生方法为

1) 在各泵排量约束范围内随机产生各基因位的值  $Q_{U_k}$ ;

2) 求出  $U_1 \sim U_{kn}$  基因位的排量之和  $Q_{ALL}^{kn}$ , 并根据  $Q_{ALL}$  的值, 在各泵排量约束范围内调整  $Q_{U_k}$  值, 使  $Q_{ALL}^{kn} = Q_{ALL}$ ;

3) 对各注水站内泵排量之和进行判断和处理, 对于超出供水量约束的站把多余水量调整到其它站。

当对应的二进制编码为 0 时, 先把排量统一设为其最小排量, 其值参加遗传算法的操作, 但在计算目标函数时不予考虑, 即依然通过二进制编码为 1 的基因位及其实数编码来表示系统的运行状况。

### 3.3 确定适应函数

适应函数值  $F_i$  是遗传算法指导搜索方向的依据, 目标函数的优化方向需对应适应函数值增加的方向, 同时为了改善遗传算法的优化性能, 对适应函数值进行适当的拉伸是必要的。本文采用的变换拉伸方式如下

$$F_i = \exp\left(\frac{f_i}{t}\right) \quad (9)$$

式中:  $t$  为与模拟退火算法结合后的温度参数。经此变换后, 当采用轮盘赌方式进行选择复制时, 调整后的适应函数在温度高时 (遗传算法早期) 计算出的各染色体适应函数值差异较小, 染色体被选择复制的概率相近, 这样避免了个别好的染色体充斥整个种群, 造成早熟; 而当温度不断下降时, 目标函数值相近的染色体适应函数值差异逐渐增大, 从而使得优秀染色体的优势更加明显, 避免了种群进化停滞不前<sup>[6]</sup>。

### 3.4 确定初温及退温操作

根据调整后的适应函数, 初温的确定从考虑初始种群的相对性能出发, 设定初始种群中最小适应函数值相对于最大适应函数值的比值为  $p_r \in (0, 1)$ , 则经推导可得初温的表达式为

$$t_0 = (f_{\min} - f_{\max}) \ln p_r \quad (10)$$

式中:  $f_{\min}, f_{\max}$  为初始种群中最小和最大目标函数值。这样确定的初温利用了初始种群的相对性能, 避免了过高或过低的初温对算法计算时间或优化质量的影响<sup>[7]</sup>。

退温函数选用常用的  $t_{n+1} = \alpha t_n$  形式, 其中  $0 < \alpha < 1$ 。

### 3.5 交叉操作

对于常用的两父辈交叉, 如果交叉的父个体是近亲, 则交叉后产生的新个体基本不变, 在问题的解空间上不增加新的解, 减少了群体的多样性, 近亲交叉易引起早熟。为了避免上述缺点, 本文采用随机多父辈适应函数值加权交叉<sup>[8]</sup> (Random parent-number fitness-weighted crossover, 简称 RPFWX), 以改善交叉效果, 提高进化速度。

Srinivas<sup>[9]</sup> 等人提出了一种自适应遗传算法 (Adaptive genetic algorithm, 简称 AGA), 根据其原理并考虑种群的整体性能, 交叉率  $P_c$  的自适应计算公式采用以下形式

$$P_c = k_1 \frac{F_{\max} - F_{\text{avg}}}{F_{\max} - F_{\min}} \quad (11)$$

式中:  $k_1$  为常数;  $F_{\max}, F_{\text{avg}}, F_{\min}$  分别为当前代进化群体的最大、平均和最小适应函数值。

交叉操作将产生  $\text{pop\_size} \times P_c$  个新个体。对于每一个新个体的 RPFWX 生成方法, 其具体操作分 2 步: 1) 在父代种群中随机确定  $kc (2 \leq kc \leq \text{pop\_size})$  个参与交叉的父代个体, 组成一个集合  $I_{kc}$ , 这些父代个体共同生成一个子个体; 2) 根据父代个体的适应函数值生成子代个体的基因值, 具体生成方法为: ①第一行的二进制编码交叉: 对于父代个体集合  $I_{kc}$  中第  $j$  个染色体  $c^j = (c_1^j, \dots, c_N^j)$  的各基因值处理方法为

$$c_i^{j'} = \begin{cases} 1, & c_i^j = 1 \\ -1, & c_i^j = 0 \end{cases} \quad (12)$$

生成新个体  $cc = (cc_1, \dots, cc_N)$ , 方法为

$$cc'_i = \text{sgn} \left( \sum_{j \in I_{kc}} W_j c'_i \right) \quad (13)$$

$$cc_i = \begin{cases} 1, & cc'_i = 1 \\ 0, & cc'_i = -1 \end{cases} \quad (14)$$

其中

$$W_j = \frac{F_j}{\sum_{i \in I_{kc}} F_i} \quad (15)$$

二进制编码交叉后需对新生成染色体的二进制编码进行基本可行性判断, 如果可行, 则进行实数编码的交叉, 否则, 重新确定参与交叉的个体; ②第二行的实数编码交叉: 新基因值的计算方法为

$$cc_i = \sum_{j \in I_{kc}} W_j c_i^j \quad (16)$$

实数编码交叉后需对系统注水总量和站供水量进行处理, 方法与产生初始解时相同.

交叉后用新生成的  $pop\_size \times P_c$  个新个体替换原种群中较差的旧个体. RPFWX 操作综合了更多父代个体信息, 因而可能获得更好的解空间搜索效率和寻优质量.

### 3.6 变异操作

随机选择一染色体进行变异, 其自适应变异率  $P_m$  的计算公式为

$$P_m = k_2 + \frac{k_3(F_{\max} - F_i)}{(F_{\max} - F_{\min})} \quad (17)$$

式中:  $k_2, k_3$  为常数.

为了提高遗传算法对复杂函数的优化性能, 采用多种变异操作来扩展算法的搜索结构. 变异时需同时对二进制编码和实数编码进行操作, 根据注水系统的实际情况, 随机选择以下 3 种变异方法中的一种.

1) 增开或停泵. ①当二进制编码的第  $i$  位由 0 变为 1, 即增开一台泵时, 首先判断该编码的可行性, 如果可行, 则在其它编码为 1 的基因对应的实数编码上减去  $Q_i$  值 (需保证其泵排量约束和站供水量约束). ②当二进制编码的第  $i$  位由 1 变为 0, 即减少一台泵时, 首先判断该编码的可行性, 如果可行, 则把  $Q_i$  值加到编码为 1 的基因对应的实数编码上.

2) 开停泵两点互换. 设二进制编码的第  $i$  位由 1 变为 0, 同时随机选择了第  $j$  位由 0 变为 1, 判断该编码可行性, 如果可行, 则交换  $Q_i, Q_j$  值, 并判断该值是否在其排量约束范围内, 如果超出, 则需在保证水量约束的情况下对各泵排量进行调整.

3) 两开泵附加扰动. 同时随机选择两位二进制编码为 1 的基因位  $i, j$ , 在保证其排量约束和注水站供水量约束的前提下进行如下操作

$$\begin{cases} Q_i = Q_i + \Delta \\ Q_j = Q_j - \Delta \end{cases} \quad (18)$$

式中:  $\Delta$  为一较小的随机扰动量.

### 3.7 改进的选择复制操作

根据适应函数值的大小, 运用轮盘赌选择法和模拟退火算法中基于 Metropolis 判别准则的复制策略<sup>[10]</sup>相结合的方法进行群体选择, 产生下一代群体. 首先应用轮盘赌法选择

一个染色体  $i$ , 然后在剩余群体中随机选择一个染色体  $j$ ,  $i$  和  $j$  竞争进入下一代群体的准则采用 Metropolis 判别准则: 令  $\Delta f = F_i - F_j$ , 若  $\Delta f \leq 0$ , 则把染色体  $j$  复制到下一代群体; 否则产生  $[0,1]$  之间的随机数  $r$ , 如果  $r < \exp(-\Delta f/t_n)$ , 则同样把染色体  $j$  复制到下一代群体, 否则, 把染色体  $i$  复制到下一代群体.

基于 Metropolis 判别准则的复制策略, 在接受优质解的同时, 有限度的接受劣质解, 保证了群体的多样性, 进一步避免了算法陷入局部最优解的可能性.

为了保证遗传算法的全局收敛性, 同时实施了最优保留策略<sup>[11]</sup>. 即运算开始时, 把初始种群中最优染色体记录在数组的第 0 位, 每代进化完后进行比较和更新. 染色体数组的第 0 位只起记录功能, 不参与遗传运算.

3.8 终止规则

算法收敛时的终止规则要满足 2 个条件: 首先, 最优染色体连续  $q$  ( $q$  为算法终止规则中允许最优染色体保持的最大代数) 代没有发生变化; 其次, 最优染色体对应的惩罚项应小于给定精度  $\varepsilon$ . 当同时满足这两个条件时, 即可认为算法收敛, 停止计算, 输出最优解; 否则执行退温操作, 并增大惩罚因子, 令循环次数加 1, 返回遗传算法的操作. 同时为了防止算法不收敛时无法退出循环, 设定最大循环代数  $n_{\max}$ , 当不能满足上述条件, 但循环次数达到最大循环代数时, 停止循环, 以当前最优解作为最终结果输出.

4 优化算例

根据本文算法, 用 C++ 语言编制了多源注水系统泵站优化调度程序, 并以大庆油田某采油厂深度注水系统为例进行了试算. 该注水系统信息如下: 注水站 13 座, 可用不同型号注水泵 22 台, 现运行 10 台, 注水井 607 口, 注水量为  $75420\text{m}^3/\text{d}$ . 优化前系统耗电量为  $491740\text{kWh}/\text{d}$ (注水单耗为  $6.52\text{kWh}/\text{m}^3$ ). 利用 [3] 中的方法进行优化后, 系统运行 10 台注水泵, 系统耗电量为  $485810\text{kWh}/\text{d}$ (注水单耗为  $6.44\text{kWh}/\text{m}^3$ ). 而采用本文混合遗传算法优化后, 系统运行 9 台注水泵, 系统耗电量为  $481195\text{kWh}/\text{d}$ (注水单耗为  $6.38\text{kWh}/\text{m}^3$ ). 优化前后注水泵的运行情况见表 1. 优化结果中, 不但注水单耗下降了  $0.14\text{kWh}/\text{m}^3$ , 而且, 注水井的运行压力达到要求配注压力的比例由优化前的 96.4% 上升到 100%, 系统的运行状况得到了明显改善.

表 1 优化调度前后结果对比表  
Table 1 Results of before and after optimal schedule

| 注水站编号 | 可用泵号 | 运行现状 |                              | [3] 方法优化结果 |                              | 本文方法优化结果 |                              |
|-------|------|------|------------------------------|------------|------------------------------|----------|------------------------------|
|       |      | 运行泵号 | 排量 ( $\text{m}^3/\text{d}$ ) | 运行泵号       | 排量 ( $\text{m}^3/\text{d}$ ) | 运行泵号     | 排量 ( $\text{m}^3/\text{d}$ ) |
| 1     | 1    | 1    | 6594                         | 1          | 6785                         | 1        | 7825                         |
| 2     | 1,2  | 2    | 6918                         | 无          |                              | 无        |                              |
| 3     | 1    | 1    | 8043                         | 1          | 7950                         | 1        | 7659                         |
| 4     | 1,2  | 2    | 7636                         | 2          | 7843                         | 2        | 8210                         |
| 5     | 1,2  | 2    | 7684                         | 1          | 7562                         | 1,2      | 7903,9285                    |
| 6     | 1    | 无    |                              | 1          | 6502                         | 无        |                              |
| 7     | 1,2  | 1    | 7992                         | 无          |                              | 无        |                              |
| 8     | 1    | 无    |                              | 1          | 7980                         | 1        | 8188                         |
| 9     | 1,2  | 1    | 7268                         | 1          | 7874                         | 无        |                              |
| 10    | 1,2  | 1    | 8115                         | 无          |                              | 2        | 9680                         |
| 11    | 1,2  | 1    | 7890                         | 1          | 6975                         | 无        |                              |
| 12    | 1,2  | 1    | 7280                         | 2          | 8012                         | 2        | 8125                         |
| 13    | 1,2  | 无    |                              | 1          | 7937                         | 1        | 8545                         |

## 5 结论

根据油田注水系统的实际情况,在充分考虑各种约束条件的基础上,建立了多源注水系统泵站优化调度数学模型,利用外部惩罚函数法将其转换为无约束优化问题.并采用混合遗传算法进行求解,操作过程中根据问题需要采用了双重编码,对适应函数进行了拉伸,初温的确定利用了群体的相对性能,改进的交叉和变异操作能够增加群体的多样性,从而使得该算法具有一定的自适应性和避免陷入局部最优解的能力.计算过程中给出了泵排量的处理方法,大大减少了不可行解的产生,提高了算法的优化性能.

## References

- 1 Li Cong-Xin, Liu Xian-Mei, Chen Miao-Xin. Operation optimization of large-scale water injection systems. *Acta Petrolei Sinica*, 2001, **22**(6): 69~72
- 2 Zhong Wei-Jun. Optimal Control and Design for Urban Water Supply System. Nanjing: Southeast University Press, 1995. 25~26
- 3 Guo Jun-Zhong, Chang Yu-Lian, Gao Sheng. Research on optimization of routing plan of water flooding pipeline network system. *Systems Engineering Theory and Practice*, 2002, **22**(12): 127~130
- 4 Zheng Da-Qiong, Wang Nian-Shen, Yang Jun. The optimization of large water supply system with multi-sources. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2003, **34**(3): 1~7
- 5 Liao Li, Zhang Cheng-Hui, Lin Jia-Heng, Li Hong-Bin. Optimal scheduling of water-supply pumping stations based on cell excluding double population genetic algorithm. *Control Theory and Applications*, 2004, **21**(1): 63~69
- 6 Wang Xiao-Ping, Cao Li-Ming. Genetic Algorithm—Theories, Applications and Software Realizing. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2002. 78~79
- 7 Wang Ling, Zheng Da-Zhong. A class of improved evolutionary programming and its optimization performances analysis. *Computer Engineering and Applications*, 2002, **38**(1): 8~10
- 8 Gong Dao-Xiong, Ruan Xiao-Gang. A new crossover operator. *Computer Engineering and Applications*, 2004, **40**(6): 7~10
- 9 Srinivas M, Patnaik L M. Adaptive probabilities of crossover and mutation in genetic algorithms. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 1994, **24**(4): 656~667
- 10 Ponnambalam S G, Jawahar N, Aravindan P. A simulated annealing algorithm for job shop scheduling. *Production Planning and Control*, 1999, **10**(8): 767~777
- 11 Xing Wen-Xun, Xie Jin-Xing. Modern Optimization Computing Methods. Beijing: Tsinghua University Press, 1999. 181~182

**杨建军** 大庆石油学院博士研究生,研究方向为油田地面工程仿真与优化,优化算法.

(**YANG Jian-Jun** Ph.D. candidate at Daqing Petroleum Institute. His research interests include simulation and optimization of oilfield surface engineering, optimization algorithm.)

**刘 扬** 教授,博士生导师,研究方向为智能控制,油田地面工程仿真与优化等.

(**LIU Yang** Professor at Daqing Petroleum Institute. His research interests include intelligent control, simulation and optimization of oilfield surface engineering.)

**魏立新** 博士,研究方向为系统计算与控制.

(**WEI Li-Xin** Ph.D. His research interests include system computation and control.)

**战 红** 硕士,研究方向为油田地面工程仿真与优化.

(**ZHAN Hong** Master. Her research interests include simulation and optimization of oilfield surface engineering.)