大 庆 石 油 学 院 学 报 第 30 卷 第 3 期 2006 年 6 月
JOURNAL OF DAQING PETROLEUM INSTITUTE Vol. 30 No. 3 Jun. 2006

大型油田注水系统节能降耗与运行方案优化

刘 扬，袁振中，魏立新
（大庆石油学院 提高油气采收率教育部重点实验室，黑龙江 大庆 163318）

摘 要：油田注水系统注水效率较低、能耗较高. 以注水能耗最小为目标函数，水力平衡约束、注水量约束、注水压力约束等为条件，建立了油田注水系统运行方案优化数学模型. 该模型属于带有离散变量和连续变量的混合优化设计问题，根据模型的结构和特点，将遗传算法、模拟退火算法和分层优化法结合，形成了混合遗传模拟退火算法的求解策略；染色体采用 0－1 编码，在操作过程中采用了改进的自适应交叉和变异方式，并实施了最优保留策略. 现场应用结果表明，注水单耗下降 0.32 kW·h/m^3，节约耗电量为 2.32×10^4 kW·h/d.

关 键 词：油田；注水系统；节能；混合优化；模型；遗传算法；模拟退火算法；分层优化法
中图分类号：TE357.6 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－1891(2006)03－0043－04

油田注水系统运行方案优化涉及注水泵的开启方案和泵的运行参数，其运行状态与注水泵特性、注水管网和实际注水要求密切相关. 文献[1]把注水站内各种型号的注水泵当成一种型号的注水泵，优化注水泵的台数，结果可能出现小数，不能满足实际操作要求. 文献[2]以城市供水系统为研究对象，首先优化注水站的排量，然后根据排量选择开泵，未优化泵运行参数. 文献[3]采用分层优化方法，首先优化注水站的排量，在此基础上采用枚举法确定开泵方案. 由于注水站排量与所辖注水泵的特性有直接关系，将注水站排量和开泵方案优化分开容易失去一些可能较好的运行方案. 针对文献[1－3]研究中存在的不足，拟以注水泵开启方案和运行参数为设计变量，建立油田注水系统运行方案优化数学模型，并根据模型的特点给出混合遗传模拟退火算法的求解方法.

1 优化数学模型

油田注水系统运行方案优化是在管网系统结构和系统服务要求已知的前提下，确定注水泵的开启方案及相应的运行参数，以极小化注水能耗，最大限度提高油田开发经济效益[3]. 其运行方案优化数学模型为

$$\min F(\boldsymbol{\beta},\boldsymbol{\mu}) = \alpha\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n_{pi}}\frac{(H_{ij}-H_{ij0})\mu_{ij}\beta_{ij}}{\eta_{pij}\eta_{eij}}\ , \tag{1}$$

$$Q_{oi}-Q_i-\sum_{j\in I_i}q_{ij}=0, i=1,2,\cdots,n, \tag{2}$$

$$\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n_{pi}}\mu_{ij}\beta_{ij}=\sum_{i\in S_p}Q_i, \tag{3}$$

$$p_i\geqslant[p]\ ,\ \forall i\in S_p, \tag{4}$$

$$\mu_{oi}^{\min}\leqslant\sum_{j=1}^{n_{pi}}\mu_{ij}\beta_{ij}\leqslant\mu_{oi}^{\max},\ i=1,2,\cdots,m, j=1,2,\cdots,n_{pi}, \tag{5}$$

$$\mu_{ij}^{\min}\beta_{ij}\leqslant\mu_{ij}\beta_{ij}\leqslant\mu_{ij}^{\max}\beta_{ij},\ i=1,2,\cdots,m, j=1,2,\cdots,n_{pi}, \tag{6}$$

收稿日期：2005－12－12；**审稿人**：刘巨保；**编辑**：任志平
基金项目：黑龙江省自然科学基金资助项目(E2004－19)，中国石油天然气股份有限公司科技风险创新基金资助项目(油科函字 2004－32)
作者简介：刘 扬(1957－)，男，博士，博士生导师，教授，主要从事油田地面工程优化与节能降耗技术方面的研究.

式(1～6)中：m 为注水站数量；n_{pi} 为第 i 座注水站内注水泵数量，$i=1,2,\cdots m$；$\boldsymbol{\beta}$ 为注水泵开停方案向量，$\boldsymbol{\beta}=\{\beta_{ij}\mid i=1,2,\cdots,m;j=1,2,\cdots,n_{pi}\}$，其中 β_{ij} 为第 i 注水站内第 j 台注水泵的开停方案，1 为开启，0 为停止；$\boldsymbol{\mu}$ 为注水泵排量向量，$\boldsymbol{\mu}=\{\mu_{ij}\mid i=1,2,\cdots,m;j=1,2,\cdots,n_{pi}\}$，其中 μ_{ij} 为第 i 注水站内第 j 台注水泵的排量；α 为单位换算系数；H_{ij}，H_{ij0} 分别为第 i 座注水站内第 j 台注水泵的出口压力和入口压力；η_{pij}，η_{eij} 分别为第 i 座注水站内第 j 台注水泵的效率和电机效率；Q_{oi}，Q_i 分别为节点 i 的输入流量和输出流量；I_i 为管网中与节点 i 相连的节点标号集合；q_{ij} 为节点 i 输往节点 j 的流量；n 为管网中的节点总数；S_p 为注水井节点集合；p_i 为管网系统中第 i 节点的注水压力；$[p]$为许用注水压力；μ_{oi}^{max}，μ_{oi}^{min} 分别为第 i 座注水站供水量约束的上、下限；μ_{ij}^{max}，μ_{ij}^{min} 分别为第 i 座注水站内第 j 台注水泵最大、最小排量.

目标函数为注水能耗最小，式(2)为节点流量平衡约束，式(3)为供注水量平衡约束，式(4)为注水压力约束，式(5)为供水能力范围约束，式(6)为注水泵排量约束.

2　求解方法

在注水系统运行方案优化数学模型中，注水泵开停方案变量属于 0－1 变量，注水泵排量属于连续变量，目标函数和约束条件是包含有设计变量的非线性函数关系，因此，该问题属于非线性混合变量优化设计. 对于大型注水系统，设计变量的数目一般为几十个，等式和不等式约束条件的数目一般为几百个，直接求解困难. 根据问题的结构和特点，将遗传算法、模拟退火算法和分层优化法结合，构造一种混合遗传模拟退火算法的求解策略. 它将问题划分为 2 层[4]：第 1 层通过遗传模拟退火算法确定注水泵的开停方案；第 2 层确定其最优运行参数. 通过这种方法，能够有效地搜索各种可能的注水泵开停方案，以找到全局最优或近全局最优解.

2.1　编码方案

注水泵的开停状态属于 0－1 变量，染色体采用二进制串形式，其表达式为

$$c^k=[\beta_{11}^k,\beta_{12}^k,\cdots,\beta_{1n_{p1}}^k,\beta_{21}^k,\beta_{22}^k,\cdots,\beta_{2n_{p2}}^k,\cdots,\beta_{m1}^k,\beta_{m2}^k,\cdots,\beta_{mm_{pm}}^k],$$

其中，$(\beta_{i1}^k,\beta_{i2}^k,\cdots,\beta_{im_{pi}}^k)$ 为第 i 座注水站内相应的注水泵在第 k 个染色体中的位置，$i=1,2,\cdots,m$.

2.2　非可行染色体判断

注水泵排量有一定的工作范围，并且注水系统需要满足一定的服务质量，因此，由初始化、交叉和变异产生的染色体开泵方案有时并不可行. 对于某些明显不可行的染色体，采取丢弃的方式，然后用随机产生的新染色体代替. 判断染色体可行性的准则：如果染色体 c^k 满足要求，则认为该染色体可行；否则，为不可行，即

$$\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n_{pi}}\mu_{ij}^{min}\beta_{ij}^k\leqslant\sum_{i\in S_p}Q_i\leqslant\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n_{pi}}\mu_{ij}^{max}\beta_{ij}^k. \tag{7}$$

2.3　染色体评估

染色体给定之后，注水泵的开停状态 $\boldsymbol{\beta}^k$ 亦相应确定. 为了计算该开泵方案下的注水系统能耗，还需要解决注水泵的最优运行参数子问题，其目标函数为

$$\min D(\boldsymbol{\mu}^k)=F(\boldsymbol{\beta}^k,\boldsymbol{\mu}^k)=\alpha\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n_{pi}}\frac{(H_{ij}-H_{ij0})\mu_{ij}^k\beta_{ij}^k}{\eta_{pij}\eta_{eij}}, \tag{8}$$

约束条件见式(2～6). 其中：$\boldsymbol{\beta}^k$，$\boldsymbol{\mu}^k$ 分别为染色体 c^k 对应的开泵方案和注水泵的运行参数.

采用惩罚函数法求解该优化子问题. 根据系统水力平衡的分析过程[5]，确定约束条件(2)，(3)得到满足，因此，惩罚函数形式为

$$F_D(\boldsymbol{\mu}^k)=D(\boldsymbol{\mu}^k)+M_K(f_p+f_{\mu 1}+f_{\mu 2}+f_{\mu o1}+f_{\mu o2}), \tag{9}$$

式中：$f_p=\sum_{i\in S_p}\max([p]-p_i,0)$；$f_{\mu 1}=\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n_{pi}}\max(\mu_{ij}^{min}\beta_{ij}^k-\mu_{ij}^k\beta_{ij}^k,0)$；$f_{\mu 2}=\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n_{pi}}\max(\mu_{ij}^k\beta_{ij}^k-\mu_{ij}^{max}-\mu_{ij}^k,$

0);$f_{\mu o1}=\sum_{i=1}^{m}\max(\mu_{oi}^{\min}-\sum_{j=1}^{n_{pi}}\mu_{ij}^{k}\beta_{ij}^{k},0)$;$f_{\mu o2}=\sum_{i=1}^{m}\max(\mu_{ij}^{k}\beta_{ij}^{k}-\mu_{oi}^{\max},0)$;$M_K$ 为惩罚因子,随着遗传迭代的进行,M_K 逐渐变大.

2.4　初温及退温操作

初温的确定选择 $t_0=K\delta$ 的形式,其中,K 为充分大的数,$\delta=f_s^{\max}-f_s^{\min}$,$f_s^{\max}$,$f_s^{\min}$ 分别为初始种群中最大和最小目标函数值. 退温函数选用 $t_{n+1}=\lambda t_n$ 的形式,其中 λ 为退温操作因数,$0<\lambda<1$.

2.5　适应值函数设计

式(9)对应的最优目标函数值即为染色体 c^k 对应开泵方案下的最佳注水能耗,可以作为评价该染色体优劣的指标. 由于注水系统运行方案优化属于最小化问题,即目标函数值越小,对应的方案越优. 遗传算法的选择操作是以染色体的适应值为依据的,即适应值大的染色体被选中的概率大,其优化方向对应适应值增加的方向. 因此,需要采取一定的变换方式对染色体 c^k 对应的目标函数值作适当变换. 为了防止超级染色体霸占选择过程,采用动态标定技术,其形式为

$$\mathrm{fitness}(c^k)=\frac{f_{\max}-f(c^k)+\gamma}{f_{\max}-f_{\min}+\gamma},\tag{10}$$

式中:$f(c^k)$为染色体 c^k 对应的目标函数值,即对应开泵方案下的最佳注水能耗;$f_{\max}$,$f_{\min}$分别为当前代进化群体中最大和最小的目标函数值;γ 为小正数,$\gamma\in(0,1)$.

2.6　基因操作——交叉、变异

即使对于同一问题,交叉率 P_c 和变异率 P_m 取值不同也会对优化产生不同的结果. 采用 SRINIVAS M 等人提出的 P_c,P_m 随适应值自动改变的方法[5],根据种群的进化情况动态地调整 P_c 和 P_m,以克服过早收敛及加快搜索速度.

2.7　基于 Metropolis 判别准则的复制策略

根据适应函数值,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相结合的方法,选择并产生下一代群体. 该选择策略的主要优点是能够在接受优质解的同时,有限度的接受劣质解,保证群体的多样性,进一步避免算法陷入局部最优解的可能性. 为了保证算法能够收敛到全局最优解,在选择操作时实施最优保留策略.

2.8　算法收敛准则

混合遗传模拟退火算法是通过多次进化逐渐逼近最优解,而不是恰好等于最优解,因此需要给定算法收敛准则,判断进化过程是否终止. 这里采用 2 种收敛准则:一是给定最大迭代次数,二是监测最优个体目标函数值的变化. 当迭代次数达到规定的最大迭代次数,或者最优个体目标函数值连续若干步没有明显变化时,认为算法已经满足收敛条件,可结束群体进化过程.

混合遗传模拟退火算法结构流程见图 1.

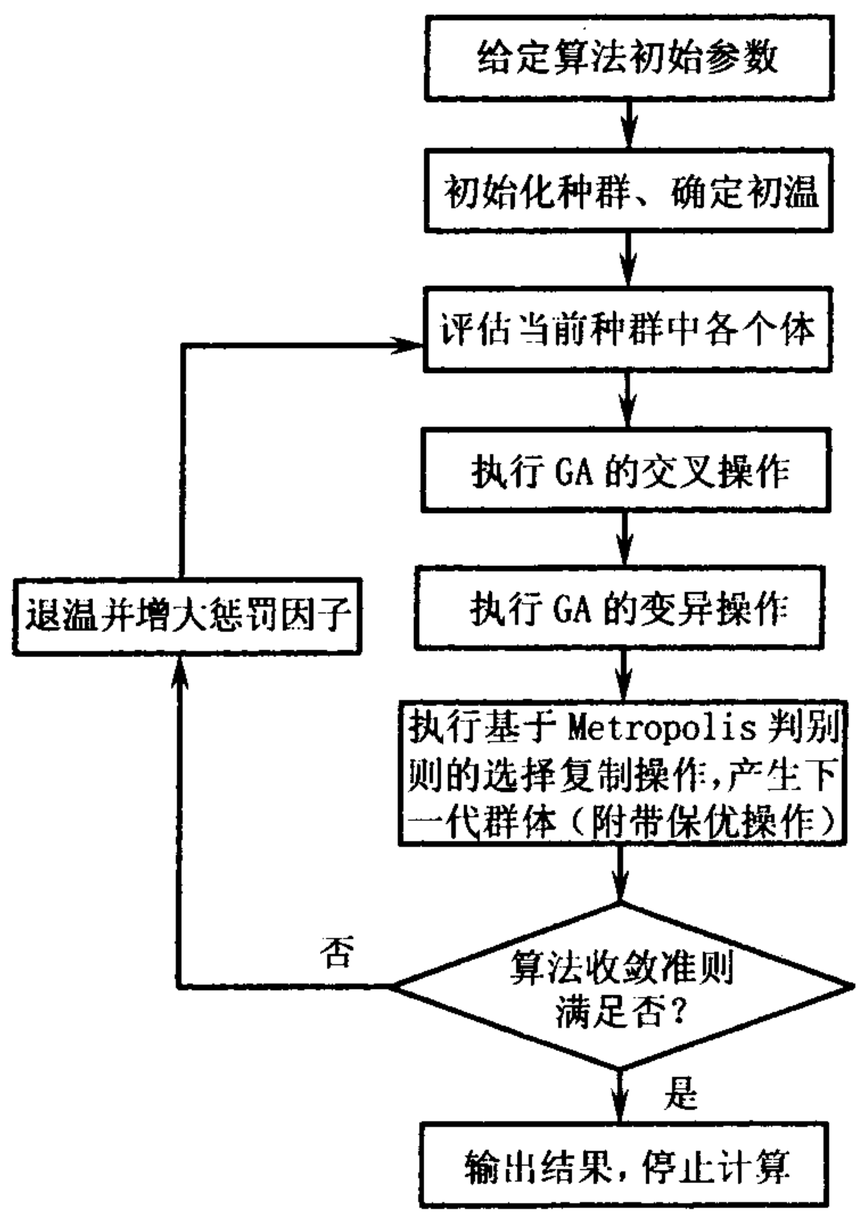


图 1　混合遗传模拟退火算法结构流程

3　计算实例

某油田深度注水系统包括注水站 12 座,配水间 68 座,注水井 552 口,管段 783 条,配有多种类型的注水泵,共计 24 台,注水量为 72 580 $m^3\cdot d^{-1}$. 采用文中方法优化该系统运行方案,计算时群体规模取 60,$\lambda=0.8$,经过 64 次循环,得到的计算结果见表 1. 由表 1 可以看出,优化后的注水泵开泵台数比优化前减少 1

台，注水泵效率平均提高 2.5%，注水单耗下降 0.32 kW·h·m^{-3}，可节省耗电量为 2.32×10^4 kW·h·d^{-1}，经济效益非常显著.

表 1　某深度注水系统优化运行前后参数

注水站	优化前				优化后			
	开泵类型	排量/($m^3\cdot d^{-1}$)	泵效/%	耗电量/(kW·h·d^{-1})	开泵类型	排量/($m^3\cdot d^{-1}$)	泵效/%	耗电量/(kW·h·d^{-1})
1 号	2	5 192	66.3	38 872	2	7 598	78.1	46 060
2 号	1	6 930	76.6	44 007	1	5 672	70.4	40 186
3 号	2	4 791	66.0	36 466	2	7 205	77.8	43 642
4 号	1	6 850	76.5	43 527	1	5 590	70.3	39 694
5 号	1	4 990	66.1	37 660	全关	0	0	0
6 号	2	7 465	78.0	45 811	1	7 480	78.0	45 830
7 号	1	7 283	77.9	44 719	1	7 296	77.9	44 726
8 号	1	4 797	71.2	34 080	1	5 132	72.3	35 536
9 号	2	4 998	66.1	37 666	2	7 420	78.0	44 932
10 号	2	5 504	69.7	39 559	1	7 932	78.7	46 302
11 号	1	7 080	77.2	44 907	2	5 818	71.0	41 062
12 号	1	6 700	75.9	42 627	1	5 437	70.2	38 776
合计	开泵台数：12 台 平均泵效：72.29% 总注水量：72 580 $m^3\cdot d^{-1}$ 总耗电量：489 901 kW·h·d^{-1} 注水单耗：6.75 kW·h·m^{-3}				开泵台数：11 台 平均泵效：74.79% 总注水量：72 580 $m^3\cdot d^{-1}$ 总耗电量：466 746 kW·h·d^{-1} 注水单耗：6.43 kW·h·m^{-3}			

4　结论

(1)针对大型油田注水系统，以降低能耗为目的建立了系统运行方案优化数学模型. 该模型充分考虑了供水、注水以及注水泵特性对系统可能造成的影响，比较全面地反映了注水系统的实际运行工况.

(2)根据大型注水系统的结构和特点，采用混合遗传模拟退火算法对油田注水系统运行方案进行优化. 对某油田深度注水系统运行方案优化后，注水泵效率平均提高 2.5%，注水单耗降低 0.32 kW·h·m^{-3}，可节约耗电量为 8.45×10^6 kW·h·a^{-1}.

参考文献：

[1] 丰国斌. 油田注水系统节能[J]. 石油规划设计，1996，7(2)：7－9.

[2] 陈森鑫，刘铁男，司光宇. 大型注水系统的建模、优化和控制[J]. 石油规划设计，1995，6(3)：34－36.

[3] 郭俊忠，常玉连，高胜. 注水系统运行方案优化研究[J]. 系统工程理论与实践，2002，22(12)：127－130.

[4] 玄光男，程润伟. 遗传算法与工程设计[M]. 北京：科学出版社，2000：15－24.

[5] SRINIVAS M，PATNAIK L M. Adaptive probabilities of crossover and mutation in genetic algorithms[J]. IEEE Trans，Syst. Man and Cybernetics，1994，24(4)：656－667.