

GA 与分层优化结合的掺水集油工艺参数优化

成庆林¹ 谢 宁¹ 孟 岚² 孙 巍¹ 李治东¹ 刘 悦¹

1. 东北石油大学提高采收率教育部重点实验室, 黑龙江 大庆 163318;
2. 大庆油田工程有限责任公司, 黑龙江 大庆 163000

摘 要:为降低进入特高含水阶段油田的掺水集油能耗,对掺水集油工艺参数进行优化。以掺水温度、掺水量、掺水压力为外层决策变量,加热炉和掺水泵运行方案为内层决策变量,以掺水集油工艺综合能耗最低为目标函数,建立掺水集油工艺参数优化模型。提出了一种遗传算法(Genetic Algorithm, GA)与分层优化结合的求解策略,将掺水温度作为染色体上的基因,先优化个体对应加热炉和掺水泵运行方案,得到个体对应的最小集油能耗,再通过种群的不断迭代进化,得到掺水集油工艺的最优参数。研究结果表明,与优化前相比,掺水温度降低 8.3 °C,掺水量减少 131.6 m³/d,掺水压力降低 0.15 MPa,集输吨液综合能耗降低 13.64%,优化效果良好。研究成果可为进入特高含水阶段油田降低掺水集油能耗提供借鉴。

关键词:集油能耗;掺水集油工艺;工艺参数;分层优化;GA

DOI:10.3969/j.issn.1006-5539.2024.03.006

Optimization of water blending and oil gathering process parameters by integrating Genetic Algorithm and hierarchical optimization

CHENG Qinglin¹, XIE Ning¹, MENG Lan², SUN Wei¹, LI Zhidong¹, LIU Yue¹

1. Key Laboratory of Improving Oil and Gas Recovery of Ministry of Education, Northeast Petroleum University, Daqing, Heilongjiang, 163318, China;
2. Daqing Oilfield Engineering Co., Ltd., Daqing, Heilongjiang, 163000, China

Abstract: To minimize the energy consumption of water blending and oil gathering system in oil fields that have entered the ultra-high water cut phase, an optimization of the operational parameters of water blending and oil gathering process was conducted. The optimization model of the operating parameters of the water blending and oil gathering process was developed with water blending temperature, volume, and pressure as the outer-layer decision variables, and the operation schemes of the heat furnaces and water blending pumps as the inner-layer decision variables, aiming for the lowest possible overall energy consumption in water blending and oil gathering process. A solution strategy integrating Genetic Algorithm (GA) and hierarchical optimization was proposed. The water blending temperature was regarded as a gene on the chromosome. Initially, the operation scheme for individual heat furnace and water blending pump was optimized to obtain the minimum oil gathering energy consumption for each corresponding case. Subsequently, through continuous iterative evolution of the population, the optimal operating parameters for the water blending and oil gathering process were obtained. The results indicate that, compared to pre-

收稿日期:2024-03-20

基金项目:国家自然科学基金资助项目“原油罐储多环节关联加热维温体系的焓传递描述与特性分析研究”(52074089)

作者简介:成庆林(1972-),女,黑龙江大庆人,教授,博士,主要从事油气储运工程专业教学与研究工作。E-mail:chengqinglin7212@163.com

optimization levels, the water blending temperature is reduced by $8.3\text{ }^{\circ}\text{C}$, the volume of water blending is reduced by $131.6\text{ m}^3/\text{d}$, the water blending pressure is reduced by 0.15 MPa , and the overall energy consumption for gathering and transporting each ton of liquid is reduced by 13.64% , demonstrating a favorable optimization outcome. The research results can provide reference for reducing the energy consumption of water blending and oil gathering system in oil fields that have entered the ultra-high water cut phase.

Keywords: Oil gathering energy consumption; Water blending and oil gathering process; Operating parameters; Hierarchical optimization; Genetic Algorithm

0 前言

对于进入高含水阶段的油田来说,原油掺水集油环节能耗占地面工程总能耗的 70% 以上^[1],是进行节能减排的首要对象。该环节能量消耗较高的主要原因是掺水集油工艺中参数匹配不合理,因此,研究掺水集油工艺参数优化,使掺水温度、掺水量、掺水压力、加热炉和掺水泵运行方案等参数进行最优匹配^[2],不但有利于油田提质增效,且对节能降耗、实现“双碳”目标具有重要意义。

众多学者针对掺水集油工艺参数优化问题进行了研究。魏立新等人^[3]以加热炉出站温度、泵扬程、油井掺水量为决策变量,以集油能耗费用最小为目标函数建立优化模型,提出了序列二次规划法的求解思路。童志雄^[4]将集油和机采系统当作一个整体,研究了掺水温度、掺水量对集油和机采系统能耗的影响规律,并将集输系统掺水温度、掺水量作为设计变量,以系统能耗最低为目标,优化了单管环状掺水工艺参数。王佳楠^[5]将模糊优化应用于双管掺水集油工艺,建立了模糊参数优化模型,应用最优水平截集法将其转换成2个确定性优化问题进行求解,为掺水集油工艺参数优化提供了新思路。张一凡^[6]通过优化掺水阀门控制来降低加热炉和掺水泵能耗,提出了一种基于深度强化学习的油田掺水管网参数优化控制系统,拓宽了掺水集油工艺参数优化思路。赵洪洋^[7]对聚驱双管掺水集油工艺参数进行优

化,采用粒子群算法求解,得到了优化后的单井掺水量与掺水温度,实现了某转油站的节能降耗。在对掺水集油工艺优化模型求解方面,多采用序列二次规划法^[8]、遗传算法 (Genetic Algorithm, GA)^[9]、粒子群算法^[10-11]、鲸鱼算法^[12]等,这些算法虽取得了一定优化效果,但存在一定局限性,如:序列二次规划法对初始点质量要求较高且需要求解二阶偏导数;GA在变量较多时,求解时间长且局部搜索能力差;粒子群算法常因收敛过早而陷入局部最优解;鲸鱼算法在求解复杂的多峰优化问题易陷入局部最优解。

本文以掺水温度、掺水量、掺水压力为外层决策变量,以加热炉和掺水泵运行方案为内层决策变量,以掺水集油工艺综合能耗最低为目标函数,建立掺水集油工艺参数优化模型,提出一种GA与分层优化相结合的求解策略,将掺水温度作为染色体上的基因,先优化个体对应加热炉和掺水泵运行方案,得到个体对应的最小集油能耗,通过种群不断迭代进化,求解出掺水集油工艺最优参数,通过分层优化减少了GA的变量个数,同时采取线性初始化种群及保留精英策略对GA进行改进,提升GA对掺水集油工艺参数优化模型的求解性能。

1 掺水集油工艺及水力热力模型

1.1 掺水集油工艺概述

中国高寒地区普遍采用掺水集油工艺,见图1。

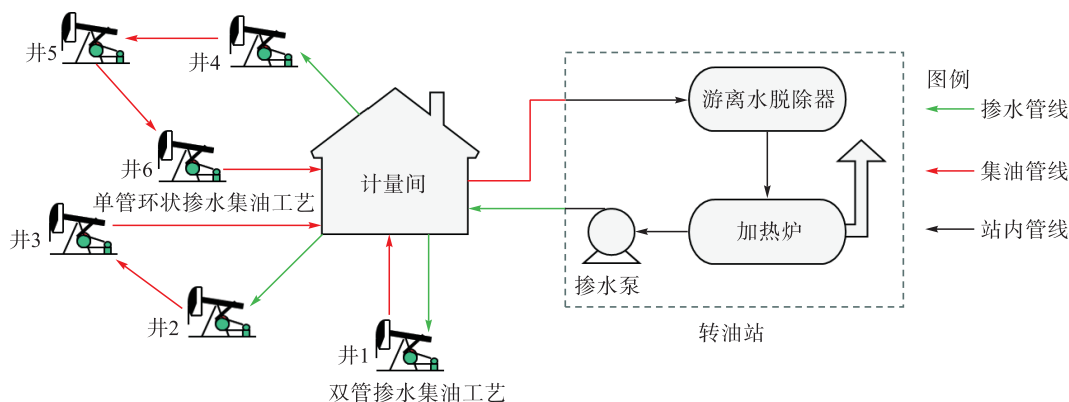


图1 掺水集油工艺图

Fig. 1 Water blending and oil gathering process

常用的掺水集油工艺主要有双管掺水集油工艺和单管环状掺水集油工艺^[5]。对于双管掺水集油工艺,循环水在转油站加热炉加热后通过掺水管线经计量站阀组分配、输送到各井口,进入井口出油管线与采出液混合,通过集油管线输送回转油站。对于单管环状掺水集油工艺,掺水管线、集油管线及多口油井串接组成了集油环,在转油站加热后的循环水经计量站流入集油环与油井产液混合后,一起经计量站输送回转油站。

1.2 水力热力模型及相关参数计算

计算掺水集油工艺各节点的温度、压力、流量是进行掺水集油工艺参数优化的基础,因此,选择合适的水力热力模型、明确相关参数的计算方法尤为重要。

表 1 不同流态下 A 、 m 、 β 值表

Tab. 1 Values of A , m , and β under different flow conditions

流态	A	m	$\beta / (\text{s}^2 \cdot \text{m}^{-1})$
层流	64	1	4.15
紊流			
水力光滑区	0.316 4	0.25	0.024 6
混合摩擦区	$10^{[0.127 \lg(e/d) - 0.627]}$	0.123	0.080 2A
粗糙区	$0.011(e/d)^{0.25}$	0	0.862A

注: e 为管壁的绝对当量粗糙度, m 。紊流流态根据临界雷诺数 Re_1 、 Re_2 的不同划分为水力光滑、混合摩擦和粗糙 3 个区域, Re 为雷诺数, 当 $3\,000 < Re < Re_1$ 时, 为水力光滑区; 当 $Re_1 < Re < Re_2$ 时, 为混合摩擦区; 当 $Re > Re_2$ 时, 为粗糙区。其中 $Re_1 = \frac{59.5}{\varepsilon^{8/7}}$ 、 $Re_2 = \frac{665 - 765 \lg \varepsilon}{\varepsilon}$ 、 $Re = \frac{4Q}{\pi d v}$; ε 为相对当量粗糙度。

1.2.2 热力计算模型

对于掺水集油管网的温降计算, 一般采用舒霍夫温降公式^[13], 见式(3)。

$$T_z = T_0 + (T_R - T_0) e^{-\frac{KD\pi L}{Gc}} \quad (3)$$

式中: T_R 为管线入口温度, $^{\circ}\text{C}$; T_z 为管线出口温度, $^{\circ}\text{C}$; D 为管线外径, m ; G 为管线介质质量流量, kg/s ; T_0 为管线埋深处地温, $^{\circ}\text{C}$; K 为管道总传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$; c 为管线介质比热, $\text{J}/(\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C})$ 。

管线平均温度计算见式(4)。

$$T_{pj} = \frac{5}{12} T_R + \frac{7}{12} T_z \quad (4)$$

式中: T_{pj} 为管线平均温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

1.2.3 相关参数计算

1.2.3.1 井口出液温度

井口出液温度的计算可以依据传热学原理, 根据井口出液从地层经井筒到地面的实际过程建立油、气、水三相的质量守恒方程和能量守恒方程以及本构方程, 根据相应边界条件求出井口出液温度; 也可基于所测井口出液温度实际数据, 确定拟采用经验公式的形式, 采用最小二乘法原理确定经验公式中的待定系数^[14]。由于

1.2.1 水力计算模型

对于掺水集油管网的压降计算, 一般采用列宾宗公式^[13], 见式(1)~(2)。

$$h_1 = \beta \frac{Q^{2-m} \nu^m}{d^{5-m}} L \quad (1)$$

$$\beta = \frac{8A}{4^m \pi^{2-m} g} \quad (2)$$

式中: h_1 为沿程摩阻损失, m ; Q 为管线介质体积流量, m^3/s ; ν 为管线介质运动黏度, m^2/s ; L 为管线长度, m ; d 为管道内径, m ; g 为重力加速度, m/s^2 ; A 、 m 为计算系数。

不同流态下 A 、 m 、 β 值见表 1。

井口出液从地层经井筒到地面的过程中流动, 传热过程复杂, 使得该方法过于繁琐, 故采用根据现场实测数据拟合的方法确定井口出液温度。

油田常用井口出液温度拟合公式见式(5)。

$$T[G'(1+W), \zeta] = \frac{G'(1+W) - A'}{B + CG'(1+W)} + D \quad (5)$$

式中: T 为井口出液温度, $^{\circ}\text{C}$; G' 为油井产液量, t/d ; W 为含水率; ζ 为待定系数, 代指 A' 、 B 、 C 、 D 。

假设某区块所测井口出液温度实际数据为 (x_0, y_0) , (x_1, y_1) , $\dots$, (x_n, y_n) , 根据最小二乘法原理得到井口出液温度公式待定系数优化模型, 见式(6)~(7)。

$$\min Q(\zeta) = \sum_{i=0}^n (y_i - T(x_i, \zeta))^2 \quad (6)$$

$$x_i = G'_i(1 + W_i) \quad (7)$$

式中: y_i 为第 i 组井口出液温度测量值, $^{\circ}\text{C}$; G'_i 为第 i 组井口出液质量流量, t/d ; W_i 为第 i 组井口出液含水率。

该模型属于无约束规划问题^[15], 可采用拟牛顿法^[16]、共轭梯度法^[17]、Levenberg-Marquardt 算法^[18]等求解, 从而求出待定系数 A' 、 B 、 C 、 D , 得到某区块井口出液温度计算公式。

1.2.3.2 井口出液比热

井口出液比热可按油水比热加权平均求得,权值为油、水质量流量与总质量流量的比值,计算见式(8)^[19]。

$$c_L = W_L c_w + (1 - W_L) c_o \quad (8)$$

式中: c_L 为井口出液比热, $J/(kg \cdot ^\circ C)$; W_L 为井口出液含水率; c_w 为水比热, $J/(kg \cdot ^\circ C)$; c_o 为原油比热, $J/(kg \cdot ^\circ C)$ 。

1.2.3.3 集油管网井口参数

集油管网井口参数与井口出液和所掺热水的物性有关。比热、流量、温度的计算见式(9)~(11)。

$$c_m^s = \frac{\sum_{s=1}^s c_L^s G_L^s + c_w G_w}{\sum_{s=1}^s G_L^s + G_w} \quad (9)$$

$$G_m^s = \sum_{s=1}^s G_L^s + G_w \quad (10)$$

$$T_m^s = \frac{\sum_{s=1}^s c_L^s G_L^s T_L^s + c_w G_w T_w}{\sum_{s=1}^s c_m^s G_m^s} \quad (11)$$

式中: c_m^s 为第 s 口油井井口处集油管线介质比热, $J/(kg \cdot ^\circ C)$; c_L^s 为第 s 口油井出液比热, $J/(kg \cdot ^\circ C)$; G_L^s 为第 s 口油井出液质量流量, kg/s ; G_w 为单井所掺热水质量流量, kg/s ; G_m^s 为第 s 口油井井口处集油管线介质

质量流量, kg/s ; T_m^s 为第 s 口油井井口处集油管线介质温度, $^\circ C$; T_L^s 为第 s 口油井出液温度, $^\circ C$; T_w 为单井所掺热水温度, $^\circ C$ 。

假设集油环内油井数为 h , 当 $h=1$ 时, 为双管掺水集油流程; 当 $h>1$ 时, 为单管环状掺水集油流程。

1.2.3.4 掺水量

掺水量是影响掺水集油工艺能耗的重要参数, 计算流程见图2。对于管网布局确定的掺水集油工艺, 当进间温度与井口回压一定时, 掺水量由掺水温度决定, 当给定掺水温度 T'_w 时, 掺水量可按以下步骤求解。

1) 令计量间1掺水量取值区间左右端点 Q_{jL} 、 Q_{jR} 分别为0、 Q_{jmax} 。

2) 当不满足终止条件时, 计量间1掺水量 $1Q_{j0}$ 为 $\frac{Q_{jL} + Q_{jR}}{2}$, 根据温降公式计算计量间1掺水温度 $1T_{jw1}$ 。

令单井1掺水量取值区间左右端点 Q_{dL} 、 Q_{dR} 分别为0、 Q_{dmax} 。当不满足终止条件时, 单井1掺水量 Q_{d0} 为 $\frac{Q_{dL} + Q_{dR}}{2}$, 若满足进间温度 T_h 大于允许进间温度且井口回压 p_m^R 小于井口回压限值 p_{max} , 则 $Q_{dR} = Q_{d0}$, 否则 $Q_{dL} = Q_{d0}$ 。当区间满足终止条件时, 输出井1掺水量 Q_{d1} , 同理, 可计算出计量间1下辖所有油井掺水量, 从而计算出

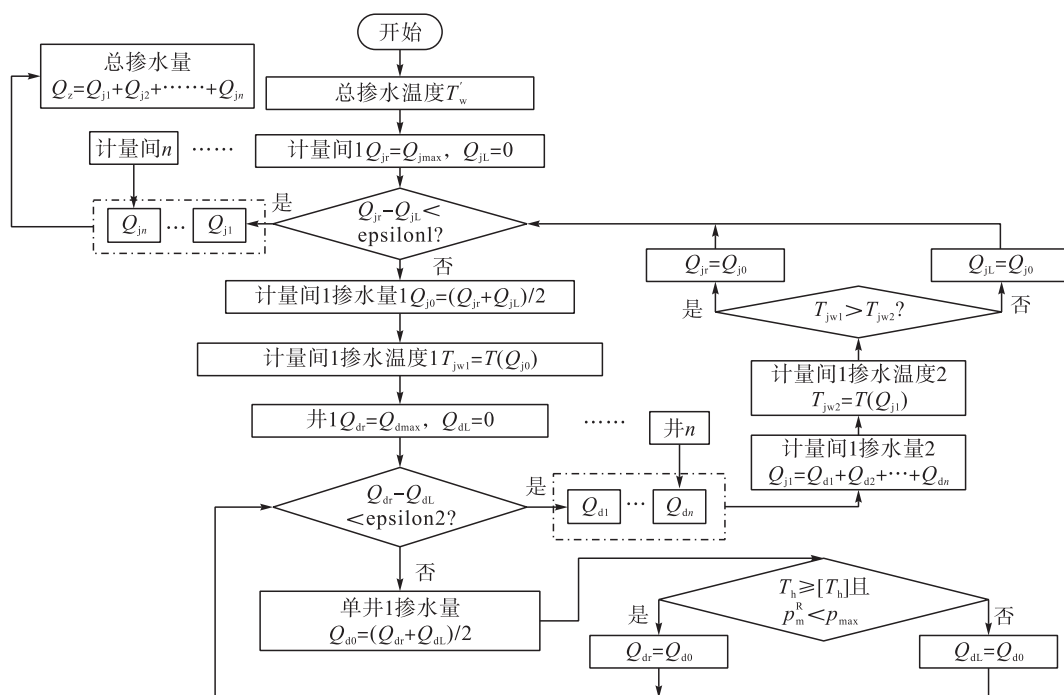


图2 掺水量计算流程图

Fig. 2 Water blending volume calculation process chart

注: Q_z 为总掺水量, m^3/d ; Q_j 为计量间掺水量, m^3/d ; T'_w 为总掺水温度, $^\circ C$; Q_{jL} 、 Q_{jR} 分别为计量间1掺水量1取值的左右端点, m^3/d ; Q_{jmax} 为计量间最大掺水量, m^3/d ; Q_{j0} 为计量间1掺水量1, m^3/d ; T_{jw1} 为计量间1掺水温度1, $^\circ C$; Q_{dL} 、 Q_{dR} 分别为单井掺水量取值的左右端点, m^3/d ; Q_{d0} 为单井掺水量, m^3/d ; Q_{j1} 为计量间1掺水量2, m^3/d ; T_{jw2} 为计量间1掺水温度2, $^\circ C$; T_h 、 $[T_h]$ 分别为进间温度、许用进间温度, $^\circ C$; p_{max} 为井口回压限值, MPa ; p_m^R 为井口回压, MPa ; ϵ_1 、 ϵ_2 为不同计算精度; n 取正整数。

计量间1掺水量 $2Q_{j1}$,根据温降公式计算计量间1掺水温度 $2T_{jw2}$;当 $T_{jw1} > T_{jw2}$ 时, $Q_{jr} = Q_{j0}$,否则 $Q_{jL} = Q_{j0}$ 。

3)当满足终止条件时,输出计量间1掺水温度,同理,可计算转油站下辖所有计量间掺水量,从而计算出转油站总掺水量,最终得出单井掺水量、计量间掺水量、总掺水量。

1.2.3.5 掺水压力

掺水压力是影响掺水泵电能消耗的关键因素,计算见式(12)。

$$p_c = p_j + \delta + p_1 + p_2 \quad (12)$$

式中: p_c 为掺水压力,MPa; p_j 为油井井口回压,MPa; δ 为常数,一般取 $0.2 \sim 0.4 \text{ MPa}^{[20]}$; p_1 为热水从转油站到计量间摩阻损失,MPa; p_2 为热水从计量间到井口摩阻损失,MPa。

2 掺水集油工艺参数优化模型建立

2.1 目标函数

对掺水集油工艺而言,其集油能耗来源主要为循环水升温消耗的热能和循环水增压消耗的电能。掺水温度、掺水量、掺水压力以及加热炉和掺水泵运行方案等参数的选择对热能、电能的消耗影响较大。以掺水集油工艺综合能耗最低为目标函数,建立掺水集油工艺参数优化模型,优化掺水温度、掺水量、掺水压力以及加热炉和掺水泵运行方案等参数,目标函数见式(13)。

$$\min f(\{T_c\}, \{Q_c\}, \{p_c\}, \{\varphi_p^h\}) = \sum_{k=1}^{n_z} \left(\sum_{i=1}^{n_{hk}} \frac{cG_{ki}^h(T_{k,out} - T_{k,in})\beta_{ki}^h}{\eta_{ki}^h} + \sum_{j=1}^{n_{pk}} \frac{Q_{kj}^p(p_{k,out} - p_{k,in})\beta_{kj}^p}{\eta_{kj}^p \eta_{kj}^{p'}} \right) \quad (13)$$

式中: n_z 为转油站数目,座; n_{hk} 为第 k 座转油站内加热炉台数,台; G_{ki}^h 为第 k 座转油站内第 i 台加热炉的质量流量,kg/s; $T_{k,in}$ 、 $T_{k,out}$ 分别为第 k 座转油站内加热炉进、出口温度,℃; β_{ki}^h 为第 k 座转油站内第 i 台加热炉的启停状态, $\beta_{ki}^h = 1$ 表示启, $\beta_{ki}^h = 0$ 表示停; η_{ki}^h 为第 k 座转油站内第 i 台加热炉热效率; n_{pk} 为第 k 座转油站内掺水泵台数,台; Q_{kj}^p 为第 k 座转油站内第 j 台掺水泵的体积流量, m^3/d ; $p_{k,in}$ 、 $p_{k,out}$ 分别为第 k 座转油站内掺水泵进、出口压力,MPa; β_{kj}^p 为第 k 座转油站内第 j 台掺水泵的启停状态, $\beta_{kj}^p = 1$ 表示启, $\beta_{kj}^p = 0$ 表示停; η_{kj}^p 为第 k 座转油站内第 j 台掺水泵效率; $\eta_{kj}^{p'}$ 为第 k 座转油站内第 j 台掺水泵电机效率。

2.2 约束条件

对管网布局一定的掺水集油工艺进行参数优化时,为保证工艺的安全运行,其参数需满足温度、压力、单井掺水量的约束条件。

2.2.1 温度约束

1)进站温度。为保证顺利集油,避免发生原油凝固,集油管线进站温度一般高于原油凝点 $3 \sim 5 \text{ }^\circ\text{C}$,见式(14)。

$$T_m^Z \geq [T_m] = T_s + \delta' \quad (14)$$

式中: T_m^Z 为集油管线进转油站温度,℃; $[T_m]$ 为转油站许用进站温度,℃; T_s 为原油凝点,℃; δ' 为常数,一般取 $3 \sim 5 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

2)掺水温度。为保证回液进站温度,掺水温度应高于某一下限,且应小于加热炉设计温度,见式(15)。

$$T_l \leq T_w^R \leq T_d^h \quad (15)$$

式中: T_l 为掺水温度下限,℃; T_w^R 为掺水管线出转油站温度,℃; T_d^h 为加热炉设计温度,℃。

2.2.2 压力约束

1)井口回压。为保证采出液顺利进入转油站,井口应具有一定的回压^[19],井口回压应小于许用回压,见式(16)。

$$p_m^R < [p_m] \quad (16)$$

式中: p_m^R 为井口回压,MPa; $[p_m]$ 为许用井口回压,MPa。

2)井口掺水压力。为保证循环水顺利进入油井出油管线,井口掺水压力应大于集油管线井口回压,见式(17)。

$$p_w^Z > p_m^R + \delta \quad (17)$$

式中: p_w^Z 为井口掺水压力,MPa。

2.2.3 单井掺水量约束

出于经济考虑,管径一定时,管内液体流速应小于某值,因此存在单井最大掺水量,见式(18)。

$$0 \leq Q_s \leq Q_h \quad (18)$$

式中: Q_s 为实际掺水量, m^3/d ; Q_h 为管线最大掺水量, m^3/d 。

2.3 掺水集油工艺参数优化模型

掺水集油工艺参数优化模型见式(19)。

$$\min f(\{T_c\}, \{Q_c\}, \{p_c\}, \{\varphi_p^h\}) = \sum_{k=1}^{n_z} \left(\sum_{i=1}^{n_{hk}} \frac{cG_{ki}^h(T_{k,out} - T_{k,in})\beta_{ki}^h}{\eta_{ki}^h} + \sum_{j=1}^{n_{pk}} \frac{Q_{kj}^p(p_{k,out} - p_{k,in})\beta_{kj}^p}{\eta_{kj}^p \eta_{kj}^{p'}} \right) \quad (19)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} T_m^Z \geq [T_m] \\ T_l \leq T_w^R \leq T_d^h \\ p_m^R < [p_m] \\ p_w^Z > p_m^R + \delta \\ 0 \leq Q_s \leq Q_h \end{cases}$$

3 模型求解

掺水集油工艺参数优化模型属于多变量有约束的非线性规划问题,变量间具有依赖性和关联性。当掺水

温度一定时,掺水量可按图2计算流程确定,掺水压力按式(12)计算,此时,可以计算出掺水集油工艺中由加热炉和掺水泵提供的有效能量,而实际的热力能耗与电力能耗与加热炉和掺水泵的实际运行状态有关。因此,本文提出一种GA与分层优化结合^[21]的求解策略:将掺水温度作为染色体上的基因,先优化出个体对应的掺水量、掺水压力,接着计算出加热炉有效热负荷及掺水泵提供的有效压能,然后通过枚举法优化出此个体得到该有效能量时加热炉和掺水泵的最小集油能耗及设备运行状态,最后经种群的不迭代进化得到掺水集油工艺的最优参数,该策略可减少GA中变量个数,降低优化难度,提高GA优化速度。

3.1 GA 概述

GA是通过研究自然选择和生物进化过程提出的一种进化算法^[22]。GA通过初始化种群、复制操作、交叉操作、变异操作等步骤,模拟自然界生物进化过程中的繁殖行为与竞争行为,繁衍出下一代个体,再根据适应度大小进行个体的优胜劣汰,提高新一代群体的质量,通过种群的不迭代进化,逐步逼近所求问题的最优解。遗传算子是GA的核心操作^[23],其过程如下。

1) 选择算子。对群体中的个体进行优胜劣汰操作。根据个体的适应度值来确定被选中的概率,适应度较高的个体有更大的机会成为父代,从而保留有利的遗传信息。

2) 交叉算子。相互配对的染色体按照交叉概率的某种方式相互交换部分基因,形成2个新的个体,是产生新个体的主要方法,可以显著提高寻优能力^[24]。

3) 变异算子。按照变异概率改变个体编码串中的某些基因值,形成1个新的个体,有助于提高局部搜索能力。

3.2 GA 实现与流程图

为了扩大GA的搜索范围并提高其收敛速度,本文采取线性初始化种群及保留精英策略,GA与分层优化结合的求解策略具体操作步骤如下。

1) 编码。根据掺水集油工艺参数优化模型特点,掺水量是掺水温度的隐函数,掺水压力受掺水量、掺水温度影响较大,即掺水量、掺水压力与掺水温度具有对应关系。当掺水温度确定时,其对应的最优掺水量、掺水压力可通过计算求解,此时的集油能耗与加热炉与掺水泵运行方案有关,此时存在一个能耗最低的运行方案,本文中该方案通过枚举法进行求解,从而将转油站参数优化模型转化为只含有掺水温度1个设计变量。本文采用浮点数编码方式,将掺水温度作为染色体上的基因。

2) 初始化种群。设定种群规模 M ,为提高GA的搜索范围,采用线性初始化种群策略,使个体均匀地分布在搜索空间。

3) GA与分层优化结合部分。先优化出个体对应掺水量、掺水压力,计算出加热炉有效热负荷及掺水泵提供有效压能;接着利用枚举法优化出此个体得到该有效能量时加热炉和掺水泵的最小实际能耗及设备运行状态,为计算个体适应度奠定了基础,通过分层优化,减少了GA中变量个数,降低了优化难度,提高了GA优化速度。

4) 适应度计算。以转油站内加热炉实际热负荷与掺水泵实际消耗电功率之和的倒数作为掺水集油工艺参数优化模型的适应度函数,适应度值越大说明掺水集油工艺综合能耗越小,转油站参数选择越好。

5) 选择操作。采用保留精英策略,将每代中适应度最大的个体视为精英个体,不用参与交叉、变异操作,直接作为下一代个体,其余个体采用轮盘赌法,确保了下一代个体优于上一代个体,提高了算法的收敛速度。

6) 交叉操作。采用单点交叉算子,依设定的交叉概率在随机确定的交叉点位处相互交换2个个体的部分染色体,从而产生出2个新的个体。交叉概率通常在0.4~0.99取值^[25]。

7) 变异操作。采用基本位变异算子,随机确定发生变异的基因点,以变异概率进行变异操作。考虑到变异结果的未知性,可能对个体产生较大影响,变异概率通常在0.0001~0.1取值^[26]。

8) 中止条件判断。判断是否满足中止条件,若是,则输出结果,若否,则返回步骤3)。

GA与分层优化结合的求解策略流程见图3。

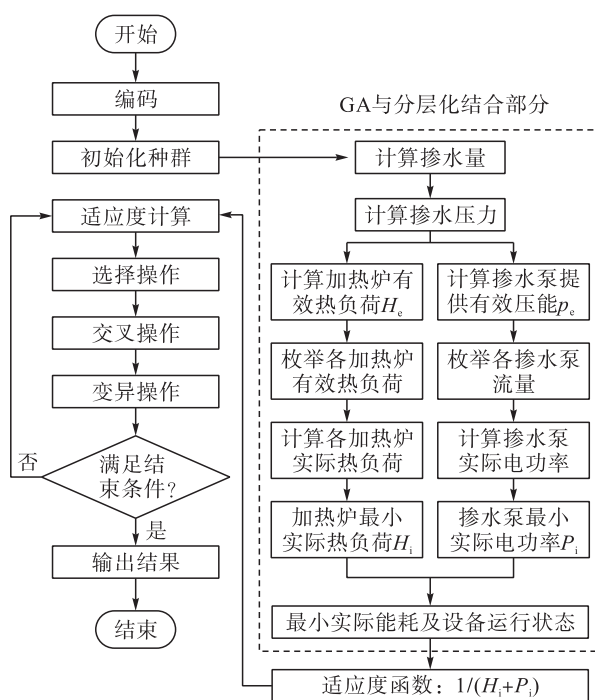


图3 GA与分层优化求解策略流程图

Fig.3 Flowchart of Genetic Algorithm and Hierarchical Optimization Solution

4 优化实例

中国高寒地区某转油站管辖计量站 10 座,油井 170 余口,该转油站的掺水集油工艺既包含双管掺水集油工艺又包含单管环状掺水集油工艺,其中单管环状掺水集油工艺中每个集油环最多串接 3 口油井。工艺流程与前文集油工艺概述相同。该转油站 10 月份掺水温度为 61.0 ℃,掺水泵出口压力为 1.8 MPa,各单井掺水总量为 2 103 m³/d,井口出液进转油温度为 41.3 ℃,原油凝点为 27.1 ℃,加热炉燃料气消耗量为 7 412.3 m³/d,掺水泵电能消耗量为 924 kW·h/d。该转油站的参数设置方案使采出液进转油温度高于其规定温度较多,增大了吨液集输综合能耗,导致能量损耗极大。

为有效验证 GA 与分层优化结合的求解策略对掺水集油工艺参数优化模型的适用性,以中国高寒地区某转油站 10 月份实际生产数据为例,使用传统 GA 和与分层优化结合的 GA 分别对掺水集油工艺参数优化模型进行求解。优化基础参数:优化时管道埋深处地温为 10 ℃;井口出液温度计算见式(20)。

$$T(G',W) = \frac{G'(1+W)+77.186}{144.353-0.34G'(1+W)}+23.525$$

(20)

算法收敛对比见图 4。

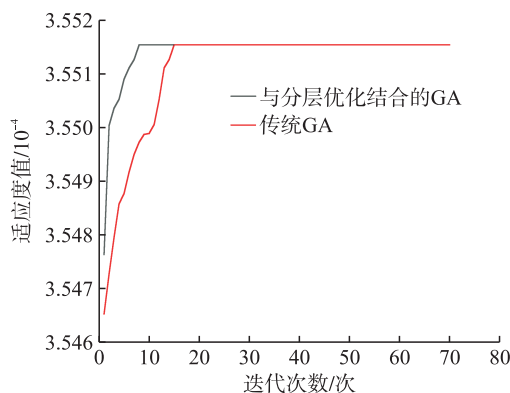


图 4 算法收敛对比图

Fig.4 Convergence comparison of algorithms

由图 4 可以看出,与分层优化结合的 GA 和传统 GA 分别在第 8、15 迭代达到全局最优,可见与分层优化结合的 GA 在获得全局最优适应度值的同时,收敛速度更快,而传统 GA 收敛速度较慢,但也得到了全局最优适应度值。因此,本文提出的 GA 与分层优化相结合的求解策略及线性初始化种群和保留精英策略能够以更快收敛速度得到全局最优适应度值,提升了 GA 对模型求解的适用性,对掺水集油工艺参数优化模型的求解具有一定优势。

掺水温度、掺水量、掺水压力优化及转油站综合能

耗结果见表 2,优化后加热炉和掺水泵运行状态见表 3,优化前后能耗对比见表 4。

表 2 优化前后转油站运行参数对比表

Tab.2 Comparison of pump station operational parameters before and after optimization

类别	掺水温度 / ℃	掺水量 / (m ³ ·d ⁻¹)	掺水压力 / MPa	转油站综合能耗 / MJ
优化前	61.0	2 103.0	1.80	239 391.92
优化后	52.7	1 971.4	1.65	207 610.44

表 3 优化后加热炉和掺水泵运行状态表

Tab.3 Operating status of heater and water injection pump after optimization

项目	加热炉			掺水泵	
	1#	2#	3#	1#	2#
运行状态	启	启	停	停	启
流量 /(m ³ ·d ⁻¹)	985.7	985.7	0	0	1 971.4

表 4 优化前后能耗对比表

Tab.4 Comparison of energy consumption before and after optimization

项目	耗气量 / (m ³ ·d ⁻¹)	耗电量 / (kW·h·d ⁻¹)	吨液集输综合 能耗 /(MJ·t ⁻¹)
优化前	6 118	1 185.4	51.58
优化后	5 423	995.0	44.55

优化后,掺水温度为 52.7 ℃,掺水量为 1 971.4 m³/d,掺水压力为 1.65 MPa;与优化前相比,优化后掺水温度降低 8.3 ℃,掺水量减少 131.6 m³/d,掺水压力降低 0.15 MPa;回液进站温度由 41.3 ℃下降为 32.4 ℃,减少了能量浪费,日均自耗气下降 11.36%,日均耗电量下降 16.1%,吨液集输综合能耗下降 13.64%,优化效果良好。

掺水温度的降低,减小了循环水与周围介质的温差,减少了热能损失。掺水量的减少,降低了掺水压力,减少了电能消耗。掺水温度的降低、掺水量的减少,使回液进站温度符合安全要求的同时又不至产生过高温 度富裕,由此可见,在一定范围内,降低掺水温度、减少掺水量有助于油田节能降耗。

5 结论

1) 提出 GA 与分层优化结合的求解策略,将掺水温度作为基因,先优化个体对应的加热炉和掺水泵运行方案,再通过种群的不断迭代进化,得到掺水集油工艺最优参数,并采用线性初始化种群和保留精英策略对 GA

进行改进,提升其收敛速度,增强了GA的全局寻优能力。

2)建立了以转油站掺水集油工艺综合能耗最低为目标函数的运行参数优化模型,采用GA与分层优化结合的求解策略对掺水集油流程运行参数进行优化,优化后掺水温度降低8.3℃,掺水量减少131.6 m³/d,掺水压力降低0.15 MPa,日均自耗气下降11.36%,日均耗电量下降16.1%,集输吨液综合能耗下降13.64%,优化效果良好。

3)随着中国陆上老油田进入特高含水开发阶段,油井产液增加而产油减少,降低集油能耗成为必然。对于采用掺水集油油田来说,使用GA与分层优化结合的求解策略优化其运行参数,对实现节能减排、提质增效具有一定优势。

参考文献:

- [1] 张雪芹. 油气集输系统能耗评价及优化技术研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2018.
ZHANG Xueqin. Research on energy consumption evaluation and optimization technology of oil and gas gathering and transportation system [D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2018.
- [2] 崔之健, 王菁, 张晓阳, 等. 基于遗传算法的油气集输管网运行效率优化[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2008, 23(6): 59-62.
CUI Zhijian, WANG Jing, ZHANG Xiaoyang, et al. Optimization of the operation efficiency of oil-gas gathering pipeline network based on genetic algorithm [J]. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition), 2008, 23(6): 59-62.
- [3] 魏立新, 刘扬. 油气集输系统生产运行方案优化方法[J]. 大庆石油学院学报, 2005, 29(3): 47-49.
WEI Lixin, LIU Yang. Optimization method of oil-gas gathering and transporting system operation [J]. Journal of Daqing Petroleum Institute, 2005, 29(3): 47-49.
- [4] 童志雄. 基于机采和集油系统整体的掺水参数优化[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2015.
TONG Zhixiong. Optimization of water cut parameters based on the integration of mechanized mining and oil gathering system [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2015.
- [5] 王佳楠. 油气集输系统生产运行参数模糊优化技术研究[D]. 大庆: 东北石油大学, 2017.
WANG Jianan. Research on fuzzy optimization technology of production and operation parameters of oil and gas gathering system [D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2017.
- [6] 张一凡. 一种基于深度强化学习的油田掺水管网参数优化控制系统[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2019.
ZHANG Yifan. An oilfield water cut pipeline network parameter optimization control system based on deep reinforcement learning [D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2019.
- [7] 赵洪洋. 聚驱油气集输系统低温集输工艺技术研究[D]. 大庆: 东北石油大学, 2020.
ZHAO Hongyang. Research on low temperature gathering process technology of polymer flooding oil and gas gathering system [D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2020.
- [8] 汪凤月, 汪芳宗, 胡佳怡. 基于序列二次规划法的分布式电源优化配置研究[J]. 计算技术与自动化, 2012, 31(3): 76-79.
WANG Fengyue, WANG Fangzong, HU Jiayi. Optimal placement of distributed generations using sequential quadratic programming [J]. Computing Technology and Automation, 2012, 31(3): 76-79.
- [9] 吴振, 吴红兰. 基于改进遗传算法的无人机航路规划[J]. 电子测量技术, 2021, 44(24): 52-58.
WU Zhen, WU Honglan. UAV route planning based on improved genetic algorithm [J]. Electronic Measurement Technology, 2021, 44(24): 52-58.
- [10] 白响恩, 孙广志, 徐笑锋. 基于改进粒子群算法的海流环境下无人水面艇路径规划[J]. 上海海事大学学报, 2023, 44(4): 1-7.
BAI Xiang'en, SUN Guangzhi, XU Xiaofeng. Path planning of unmanned surface vessels in marine environment based on improved particle swarm algorithm [J]. Journal of Shanghai Maritime University, 2023, 44(4): 1-7.
- [11] 王浩杰, 王晓强, 朱其萍, 等. 基于粒子群算法的超声滚挤压工艺参数多目标优化[J]. 塑性工程学报, 2022, 29(12): 47-55.
WANG Haojie, WANG Xiaoqiang, ZHU Qiping, et al. Multi-objective optimization of ultrasonic rolling extrusion process parameters based on particle swarm algorithm [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2022, 29(12): 47-55.
- [12] 周强, 魏立新, 李达, 等. 基于改进鲸鱼算法的转油站运行参数优化[J]. 天然气与石油, 2023, 41(6): 14-20.
ZHOU Qiang, WEI Lixin, LI Da, et al. Optimization of operation parameters for oil transfer station based on improved whale optimization algorithm [J]. Natural Gas and Oil, 2023, 41(6): 14-20.
- [13] 冯叔初, 郭揆常. 油气集输与矿场加工[M]. 东营: 中国石油大学出版社, 2006: 149-157.
FENG Shuchu, GUO Kuichang. Oil and gas gathering and mine processing [M]. Dongying: China University of Petroleum Press, 2006: 149-157.
- [14] 亓福香, 汪寿琴, 吴瑾. 井口出液温度计算方法与应用

- 分析[J]. 油气田地面工程, 2015, 34(8): 34-36.
- QI Fuxiang, WANG Shouqin, WU Jin. Calculation method and application analysis of wellhead liquid temperature [J]. Oil-Gas Field Surface Engineering, 2015, 34 (8): 34-36.
- [15] 魏立新, 刘 扬, 杨建军, 等. 油井出油温度最优化拟和方法[J]. 大庆石油学院学报, 2004, 28(2): 54-56.
- WEI Lixin, LIU Yang, YANG Jianjun, et al. Optimization fitting method of oil well head flowing temperature formula [J]. Journal of Daqing Petroleum Institute, 2004, 28 (2): 54-56.
- [16] 曹邦兴. 拟牛顿法在求解无约束多维函数极值中的应用[J]. 大理大学学报, 2019, 4(6): 1-4.
- CAO Bangxing. The application of Quasi-Newton Method in solving the unconstrained multidimensional function extremum [J]. Journal of Dali University, 2019, 4 (6): 1-4.
- [17] 郭 航. 无约束优化的混合非线性共轭梯度法研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2023.
- GUO Hang. Research on hybrid nonlinear conjugate gradient method for unconstrained optimization [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2023.
- [18] 王 琪. 求解非线性方程组的 Levenberg-Marquardt 方法[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2018.
- WANG Qi. Levenberg-Marquardt Method for solving nonlinear equation systems [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2018.
- [19] 黄作男. 油田多相混输管道热力水力特性及常温集输半径计算方法研究[D]. 大庆: 东北石油大学, 2020.
- HUANG Zuonan. Research on thermal-hydraulic characteristics and constant temperature gathering radius calculation method of multiphase mixed transportation pipeline in oilfield [D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2020.
- [20] 鲍云波, 刘 扬, 魏立新, 等. 葡萄花油田转油站系统生产运行方案优化[J]. 大庆石油学院学报, 2008, 32 (4): 66-69.
- BAO Yunbo, LIU Yang, WEI Lixin, et al. Operation scheme optimization of transfer station system of Putaohua oil field [J]. Journal of Daqing Petroleum Institute, 2008, 32 (4): 66-69.
- [21] 黄朝志, 张文进, 李海雯, 等. 多目标算法分层优化策略在开关磁阻电机中的应用[J]. 电子测量与仪器学报, 2024, 38(1): 124-133.
- HUANG Chaozhi, ZHANG Wenjin, LI Haiwen, et al. Application of multi-objective algorithm layered optimization strategy in switched reluctance motor [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2024, 38 (1): 124-133.
- [22] 姚泽玮, 林嘉雯, 胡俊钦, 等. 基于 PSO-GA 的多边缘负载均衡方法[J]. 计算机科学, 2021, 48(增刊2): 456-463.
- YAO Zewei, LIN Jiawen, HU Junqin, et al. PSO-GA based approach to multi-edge load balancing [J]. Computer Science, 2021, 48 (Suppl 2): 456-463.
- [23] 宿 辉, 孙焯远, 赵宇飞, 等. 基于 GA-PSO 混合优化 BP 的面板堆石坝爆破料压实质量评价[J]. 人民黄河, 2023, 45(6): 137-142.
- SU Hui, SUN Heyuan, ZHAO Yufei, et al. Compaction quality evaluation of blasting material of concrete face rockfill dam based on BP neural network which optimized by GA-PSO [J]. Yellow River, 2023, 45 (6): 137-142.
- [24] 熊聪聪, 王 静, 宋 鹏, 等. 遗传算法在多模式集成天气预报中的应用[J]. 天津科技大学学报, 2008, 23 (4): 80-84.
- XIONG Congcong, WANG Jing, SONG Peng, et al. Application of genetic algorithm in multimode integrated weather forecast [J]. Journal of Tianjin University of Science & Technology, 2008, 23 (4): 80-84.
- [25] 豆 旺, 冉启武, 罗德虎, 等. 基于改进 GA 优化 DBN 的变压器故障诊断[J/OL]. [2024-03-02]. 武汉大学学报(工学版). <https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=z-1yOu6aphNjFk3AJTSl5asai1wR2g4Sq0zyhKnHhA9jL68zZNTFnSHI1Fd37tjFCe5BKE6h9Z0d5-B51F-Cdhnj0CUzTpXQOVYzk2gLktDnT0ERDILbEX3iuyMT-TvJZNSP3XMD1b4=&uniplatform=NZKPT&language=CHS>.
- DOU Wang, RAN Qiwu, LUO Dehu, et al. Transformer fault diagnosis based on improved GA optimized DBN [J/OL]. [2024-03-02]. Journal of Wuhan University (Engineering Edition). <https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=z-1yOu6aphNjFk3AJTSl5asai1wR2g4Sq0zyhKnHhA9jL68zZNTFnSHI1Fd37tjFCe5BKE6h9Z0d5-B51F-Cdhnj0CUzTpXQOVYzk2gLktDnT0ERDILbEX3iuyMT-TvJZNSP3XMD1b4=&uniplatform=NZKPT&language=CHS>.
- [26] 任 猛, 刘 刚, 何 兵, 等. 基于多样本 GA-PSO 算法的发射入轨段测控设备优化部署[J]. 电讯技术, 2023, 63 (5): 648-655.
- REN Meng, LIU Gang, HE Bing, et al. Optimal deployment of TT & C equipment in launch and orbit injection phase based on multi-sample GA-PSO algorithm [J]. Telecommunication Engineering, 2023, 63 (5): 648-655.