

改进的蚂蚁算法在试井曲线拟合中的应用

刘 顺¹, 姚 军¹, 白振强²

(1. 中国石油大学(华东)石油工程学院, 山东 东营 257061;

2 中国石油大庆油田有限责任公司 勘探开发研究院, 黑龙江 大庆 163712)

摘要:通过将带可变邻域搜索的进化策略引入解决组合问题的蚂蚁算法,得到了可以用于解决连续优化问题的改进的蚂蚁算法,并给出了优化步骤。将改进的蚂蚁算法应用于试井曲线的拟合中,并编写了计算程序。改进的蚂蚁算法与遗传算法的对比结果表明,前者的收敛速度和收敛值以及在多局部最优解问题上均优于遗传算法,并具有较强的实用性。

关键词:改进的蚂蚁算法;试井;参数优化;遗传算法

中图分类号: TE353.2

文献标识码: A

文章编号: 1009-9603(2008)01-0087-03

在解决连续优化问题时一般采用遗传算法^[1-2]及结合其他优化算法形成的混合遗传算法^[3-5];而对组合优化问题则采用模拟退火算法、禁忌搜索算法和蚂蚁算法等启发式算法来解决。蚂蚁算法又称为蚁群算法,20世纪90年代初期,Dorigo等^[6]与Colombi等^[7-8]受到自然界中的蚁群在搜索食物的过程中,个体之间通过信息交流与相互协作,最终顺利找到从巢穴到食物源的最短路径的启发中提出的一种新型的仿生算法。蚂蚁算法在解决TSP问题、调度问题、指派问题及序列求序等组合优化问题上获得了成功的应用。但是,对于试井曲线拟合等连续优化问题,求解时要求算法能在连续的解空间本身产生新的解以进行寻优,显然用解组合优化问题的蚂蚁算法直接求解连续优化问题会有很大困难^[9-10],又很容易把问题函数的人为局部最优解当成全局最优解。笔者通过引入进化策略,使蚂蚁算法很好地解决了连续优化问题,并将这种改进的算法应用于试井曲线的拟合中。

1 改进的蚂蚁算法的优化过程

对于试井曲线的拟合,一般为3个参数的优化问题,对于其他多参数的情况,则以相同思路求解。其中3个参数的全局优化问题定义为:对于任意参数 x_1 , x_2 和 x_3 ,当它们的取值范围分别为 $[x_{1\min},$

$x_{1\max}]$, $[x_{2\min}, x_{2\max}]$ 和 $[x_{3\min}, x_{3\max}]$ 时,求取优化函数 $f(x_1, x_2, x_3)$ 的最大值或最小值。

改进的蚂蚁算法首先将3个参数的解空间均匀地分解为若干个子区域,分别从这些子区域中产生初始种群,然后对子区域内的种群进行优化,再采用信息量标定每个子区域的蚂蚁,在各个子区域蚂蚁的信息量变化的约束下进行淘汰搜索整个解空间,最后在结束条件控制下停止搜索。

改进的蚂蚁算法的具体优化步骤如下。

第1步,将优化函数的定义域均匀地分解为 $M \times N \times W$ 个子区域(E_{ijk}),其中, $i=1, 2, \dots, M$; $j=1, 2, \dots, N$; $z=1, 2, \dots, W$,且各参数子区域的区间长度分别为

$$D_1 = \frac{x_{1\max} - x_{1\min}}{M - 1} \quad (1)$$

$$D_2 = \frac{x_{2\max} - x_{2\min}}{N - 1} \quad (2)$$

$$D_3 = \frac{x_{3\max} - x_{3\min}}{W - 1} \quad (3)$$

式中: M , N 和 W 分别为 x_1 , x_2 和 x_3 取值范围被均匀分解后子区域的个数; D_1 , D_2 和 D_3 分别为 x_1 , x_2 和 x_3 的取值范围被均匀分解后子区域的区间长度。

第2步,产生初始种群。在第1步确定的每个子区域中随机产生1个个体,所有个体的集合组成初始种群。与 E_{ijk} 相对应的个体定义为 A_{ijk} (1),括号

收稿日期 2007-11-13;改回日期 2007-12-18。

作者简介:刘顺,男,2002年毕业于西安石油大学化工机械专业,2005年获该校油气田开发专业硕士学位,现为中国石油大学(华东)油气田开发工程专业在读博士研究生,主要从事油气田开发理论与系统工程方面的研究。联系电话:(0546) 7878515, E-mail: liushun631@163.com。

基金项目:国家“973”项目“碳酸盐岩缝洞型油藏流体流动机理研究”(2006CB202404)

中的 1 表示整个算法的第 1 代个体,于是初始种群可表示为 $\{A_{ijk}(1)\}$, 种群规模为 $M \times N \times W$ 。

第 3 步,对任意 1 只蚂蚁 ijk (解 x_{ijk})根据添加可邻域搜索项的进化策略生成一定规模的子代蚂蚁(子代解),然后计算蚂蚁 ijk 和所有子代蚂蚁对应的函数值,即适应度,根据函数值由最值条件仅保留 1 个当前最优解而淘汰其他解。根据添加可邻域搜索项的进化策略生成子代解的公式为

$$x_{ijk}^{t+1} = x_{ijk}^t + 0.15IE_{ijk} \exp\left[-\frac{t}{T}\right] N_3(0, 1) \quad (4)$$

式中: x_{ijk}^{t+1} 为子代解; x_{ijk}^t 为初始解; IE_{ijk} 为相应的等分空间值; t 为优化过程中的当前优化次数; T 为指定的总优化次数; $N(0, 1)$ 是均值为 0 和标准差为 1 的服从正态分布的随机数;下标 3 为解的维数。

由于 $N(0, 1)$ 产生的随机数以接近 1 的概率分布在 $(-3, 3)$ 内,从而可以使得产生的子代解分布在初始解的附近;系数 $\exp\left[-\frac{t}{T}\right]$ 调节在开始优化时子代解分布在初始解的较宽的邻域空间,从而保证收敛速度,在后期优化时子代解分布在初始解的较窄的邻域空间,从而保证优化精度;对所有蚂蚁(初始解)完成一次更新。

第 4 步,当以下标方式表示蚂蚁身份时,第 c 只蚂蚁淘汰其他任意 1 只蚂蚁 d 的期望度的表达式为

$$cd = F(x_c) - F(x_d) \quad (5)$$

式中: cd 为期望度; $F(x_c)$ 为蚂蚁 c 对问题的适应度; $F(x_d)$ 为蚂蚁 d 对问题的适应度。

当对函数求最大值时, $F(x_c)$ 和 $F(x_d)$ 就取其函数值;而对函数求最小值时,问题适应度取函数值的倒数或者相反数。

第 5 步,用概率对蚂蚁进行淘汰。若 $cd < 0$,则蚂蚁 c 不能淘汰蚂蚁 d ,不进行任何操作;若 $cd > 0$,表示蚂蚁 c 可能淘汰蚂蚁 d 。淘汰的概率及生存竞争能力的表达式分别为

$$Prob(x_c, x_d) = \frac{c}{a} \frac{cd}{(c_d - c_u)} \quad (6)$$

$$c(b) = c(b-1) + c(b) \quad (7)$$

式中: $Prob$ 为淘汰概率; c 表示蚂蚁 c 的生存竞争能力,相当于蚂蚁算法中的信息素强度; a 为与信息素强度和期望值有关的参数,取值范围为 0.05 ~ 1.1 ~ 4,通常取 $a = 1$, $b = 1$; u 为任意蚂蚁; a 为可能被淘汰的蚂蚁总数; c_u 为蚂蚁 c 对所有可能被淘汰蚂蚁的生存竞争能力; c_d 为蚂蚁 c 对所有可能被淘汰的蚂蚁的期望度; $c(b)$ 为第 b 代时蚂蚁 c 的生存竞争能力,通常为了避免收敛到局部

最小解,将生存竞争能力限制在一定的范围内^[10]; b 为进化代数,即循环运算次数; c 为蚂蚁的生存能力遗传系数,取值范围为 0.01 ~ 0.8; $c(b)$ 为第 b 代时蚂蚁 c 的生存竞争能力的增加量,当蚂蚁 c 每淘汰其他蚂蚁 1 次就增加 1 个小正常数。

第 6 步,对所有蚂蚁重复第 4 ~ 5 步,然后比较当前所有蚂蚁的适应度,取适应度最大的蚂蚁(即解)作为当前优化次数的最优解。

第 7 步,重复第 3 ~ 6 步,直到适应度达到指定的精度或寻优次数为止。

2 应用实例

当地层为无限大时,低渗透油藏的试井解释数学模型为

$$\frac{1}{r} \times \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial p}{\partial r} \right) - GC_t \frac{\partial p}{\partial r} - \frac{G}{r} = \frac{\phi \mu C_t}{3.6k} \times \frac{\partial p}{\partial t} \quad (8)$$

初始条件为

$$p(r, t) \big|_{t=0} = p_i \quad (9)$$

内边界条件为

$$Bq_0 = \frac{khr}{1.842 \times 10^{-3} \mu} \left(\frac{\partial p}{\partial r} \right) \bigg|_{r=r_w} - 24C \frac{dp_{wf}}{dt} \quad (10)$$

其中

$$p_{wf} = \left(p_w - S r \frac{\partial p_w}{\partial r} \right)_{r=r_w} \quad (11)$$

外边界条件为

$$\lim_{r \rightarrow r_e} p(r, t) = p_i \quad (12)$$

式中: r 为地层半径, m; p 为地层压力, MPa; G 为启动压力梯度, MPa/m; C_t 为综合压缩系数, MPa^{-1} ; ϕ 为孔隙度, %; μ 为地层流体粘度, $\text{mPa} \cdot \text{s}$; k 为渗透率, μm^2 ; t 为生产时间, h; p_i 为原始地层压力, MPa; B 为地层流体体积系数, m^3/m^3 ; q_0 为油井产量, m^3/d ; h 为油层厚度, m; r_w 为油井半径, m; C 为井筒储存系数, m^3/MPa ; p_{wf} 为井底流压, MPa; p_w 为井底压力, MPa; S 为表皮系数; r_e 为封闭边界半径, m。

对于某低渗透油藏,其试井基础参数是油井产量为 $50 \text{ m}^3/\text{d}$,油层厚度为 11.4 m,地层原油粘度为 $5.65 \text{ mPa} \cdot \text{s}$,地层原油体积系数为 $1.092 \text{ m}^3/\text{m}^3$,油井半径为 0.1397 m,孔隙度为 15%,原始地层压力为 20 MPa,启动压力梯度为 0.01 MPa/m,综合压缩系数为 0.003 MPa^{-1} ,试井压力随时间的变化如图 1 所示。

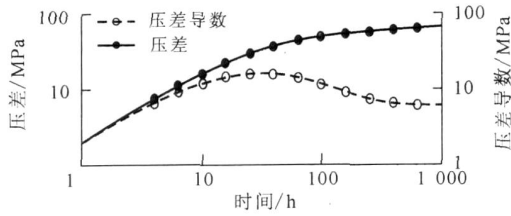


图 1 改进的蚂蚁算法拟合的试井曲线

该试井曲线拟合问题可转化为求如下函数的最小值

$$f(k, C, S) = [P_{计算点}(k, C, S) - P_{测试点}]^2 \quad (13)$$

表 1 改进的蚂蚁算法与遗传算法的优化对比

算 法	实 际 值			拟 合 值			进化 代数	压差适应 度 /MPa	平均收 敛代数	压差收敛适应度 /MPa	
	$k / 10^{-3} \mu m^2$	$C / (m^3 \cdot MPa^{-1})$	S	$k / 10^{-3} \mu m^2$	$C / (m^3 \cdot MPa^{-1})$	S				最小值	最大值
改进的 蚂蚁算法	6.22	1	0.1	6.182	1.019 858	0.200 000	6	1.642 632	7	1.642 632	2.043 489
遗传算法	6.22	1	0.1	6.249	0.958 065	0.192 913	17	1.661 060	15	1.661 060	5.057 787

的小;其寻优速度很快,压差适应度从第 1 代的 1 665. 522 658MPa很快就降到第 6 代的 10MPa以内 (表 2)。

表 2 改进的蚂蚁算法的进化情况

进化 代数	某一次改进的蚂蚁算法 压差适应度 /MPa	另一次改进的蚂蚁算法 压差适应度 /MPa
第 1 代	1 665. 522 658	1 665. 497 716
第 4 代	55. 270 489	36. 599 241
第 5 代	11. 322 696	1. 902 330
第 6 代	9. 814 021	1. 642 632
第 7 代	2. 043 489	1. 642 632
第 8 代	2. 043 489	1. 642 632

通过对其他范围内进行的试验计算发现:改进的蚂蚁算法的收敛速度和收敛值都优于遗传算法;同时在使用 Michalewicz 函数和 Schaffer 函数进行全局最优解寻找时,改进的蚂蚁算法优于遗传算法,前者可以较好地处理这类多局部最优解问题。

3 结论

通过在蚂蚁算法中引入带可变邻域搜索的进化策略,得到了可以用于解决连续优化问题的改进的蚂蚁算法;首次将改进的蚂蚁算法应用于试井曲线的拟合中,且拟合效果很好。

对改进的蚂蚁算法和遗传算法进行了实例计算,蚂蚁算法平均收敛代数为 7 代,明显少于遗传算法的 15 代;收敛时的最大和最小压差适应度也比遗

通过改进的蚂蚁算法和遗传算法分别对该油藏的 k 、 C 和 S 进行拟合。给定拟合的参数范围为: k [0. 001, 0. 1], C [0. 01, 2], S [- 0. 2, 0. 2], 改进的蚂蚁算法的群体规模为 27, $\alpha = 1$, $\rho = 0. 618$;遗传算法的群体规模为 40,变异概率为 0. 01,交叉概率为 0. 9。

经过编程并进行参数拟合后发现,改进的蚂蚁算法与试井压力数据拟合较好 (图 1)。该算法的平均收敛代数为 7 代,明显少于遗传算法的 15 代 (表 1);收敛时的最大和最小压差适应度也比遗传算法

传算法的小,且其寻优速度很快,适应度从第 1 代的 1 665. 522 658MPa很快降到第 6 代的 10MPa 以内。改进的蚂蚁算法在收敛速度、收敛值及解多局部最优解问题方面均优于遗传算法。

参考文献:

[1] 张冬丽,刘先贵,王文清,等. 利用遗传算法解释试井参数 [J]. 油气井测试, 2004, 13 (3): 9 - 12.

[2] 陈国良,王熙法,庄镇泉,等. 遗传算法及其应用 [M]. 北京:人民邮电出版社, 1996.

[3] 尹洪军,翟云芳. 基于自适应遗传算法的试井分析最优化方法 [J]. 石油学报, 1999, 20 (2): 51 - 56.

[4] 邵晓巍,邵长胜,赵长安. 利用信息量留存的蚁群遗传算法 [J]. 控制与决策, 2004, 19 (10): 1 187 - 1 189, 1 193.

[5] 李晓明,张烈辉,张箭,等. 改进遗传算法在优化油田布井中的应用 [J]. 油气地质与采收率, 2006, 13 (2): 68 - 71.

[6] Dorigo M, Maniezzo V, Colloia. Ant system: optimization by a colony of cooperating agents [J]. IEEE Trans on Systems, Man, and Cybernetics: Part B, 1996, 26 (1): 29 - 41.

[7] Colomi A, Dorigo M, Maniezzo V. Distributed optimization by ant colonies [C] // Proceedings of ECAL91-European Conference on Artificial Life. Paris: Elsevier, 1991.

[8] Colomi A, Dorigo M, Maniezzo V. An investigation of some properties of an ant algorithm [C] // Proceedings of the Parallel Problem Solving from Nature Conference 92. Brussels: Elsevier, 1992.

[9] Chen Yue. A distributed security model based on divide and rule [J]. Computer Science, 2001, 27 (4): 7 - 9.

[10] 胡小兵. 蚁群优化原理、理论及其应用研究 [D]. 重庆:重庆大学, 2004.

编辑 常迎梅

the maximum starting pressure gradient.

Key words: starting pressure, low permeable, relative permeability, non-Darcy flow, view permeability

Li Hao, Faculty of Geosciences and Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing City, 100083, China

Liu Shun, Yao Jun, Bai Zhenqiang. Application of improved ant colony algorithm to well test curve match. *PGRE*, 2008, 15(1): 87 ~ 89

The ant colony algorithm which can solve the combination problem was introduced to evolutionary strategy with searching variable neighborhood, the improved method which can ideally solve continuous optimizing problem was obtained and the optimizing processes were given. This improved ant colony algorithm has been applied to the fitting process of well test curves and the program has been made to calibrate well test model. The convergence speed and result and multi-local optimal solution of the improved ant colony algorithm are better than these of genetic algorithm and the former will be more usable than the latter.

Key words: improved ant colony algorithm, well test, parameter optimization, genetic algorithm

Liu Shun, Faculty of Petroleum Engineering, China University of Petroleum (East China), Dongying City, Shandong Province, 257061, China

Huang Dongmei, Yang Zhengming, Hao Mingqiang et al. Production decline equation and its application in micro-fractured ultra-low permeability reservoirs. *PGRE*, 2008, 15(1): 90 ~ 91

Fracture system is very important for the economic development of the low permeability oil reservoir. The production decline law in the micro-fractured ultra-low permeability reservoirs is always the key in reservoir development. Based on the research of relative permeability curve and flow theory in the low permeability oil reservoir, the production decline equations were set up in the micro-fractured ultra-low permeability reservoir. The research probed that the production decline in this type of oil reservoir matches the rule of exponential decline. And many factors influences the declined index. Water-free oil production phase and low water-cut phase are the important stages of the development of ultra-low permeability reservoirs. In the production of Dong-16 well block in Yushulin ultra-low permeability oilfield, the production variation conformed to exponential decline, not only for single well but also for the whole block.

Key words: micro-fracture, ultra-low permeability, production decline law, production rate

Huang Dongmei, Technology Department, Zhanjiang Company, China National Offshore Oil Corporation, Zhanjiang City, Guangdong Province, 524057, China

Wang Zenglin, Zhu Wei. Research on treatment techniques for the polymer-containing produced water in Shengli Oilfield. *PGRE*, 2008, 15(1): 92 ~ 94

Along the process of oil recovery with polymer injection, the treatment for the polymer-containing produced water in oilfield has already become one of the difficult problems in tertiary oil recovery. A series of laboratory researches and field experiments were carried out such as integrated treating emulsifier of polymer flooding produced fluid, high effective triple-phase coalescing separation, dissolved air-flotation with coalescence, and dissolved air-flotation with adding flocculant and PAM. The suitable technology path of treating the polymer-containing produced water was formed. The effect of oil-water separation for the liquid from oil well was improved with adding chemical emulsifier with high efficiency and using high effective triple-phase coalescing separator. Oil was removed at first, and suspended solid was removed secondly from the polymer-containing produced water, then the quality of treated water could be refilled. The cost of water treatment agent was less than 1.2 yuan/m³ and the treatment techniques should have well application future in the field.

Key words: treatment for the polymer-containing produced water, demulsifier, triple-phase separation, coalescence, dissolved air-flotation, adding agent

Wang Zenglin, Shengli Oilfield Company of SINOPEC, Dongying City, Shandong Province, 257000, China

Xiao Yuxiang, Wu Zhongbao, Kang Lixia. Research on the geological fracture model of the integral hydraulic fractured oil reservoir. *PGRE*, 2008, 15(1): 95 ~ 97

After reforming the integral hydraulic fracturing measures for oil reservoirs, the induced fracture will become complex and uncertain. How to quantitatively build the accurate geologic model of the hydraulic fractures always restrains the numerical simulation of integral hydraulic fracturing oil reservoir. Some presumptions were put forward according to other scholars' research. Considering the heterogeneity of the fracture parameters and using reservoir engineering method, a mathematical model of the fracture conductivity, fracture permeability and fracture porosity was built. Based on the example of a single well, a quantitative geologic fracture model for integral hydraulic fracturing oil reservoirs was established. The model settles the foundation for the numerical simulation of fractures coupled of oil reservoirs. And it may solve the problems of development plan design and adjustment in the integral hydraulic fracturing oil reservoirs better.

Key words: integral hydraulic fracturing, half-length of the fracture, fracture conductivity, unstable well-test

Xiao Yuxiang, Faculty of Energy and Resources, China University of Geoscience (Beijing), Beijing City, 100083, China

Yang Biao, Ma Shou, Huang Bo et al. Preparation and application of high temperature fracturing fluid crosslinker of type HTC-160. *PGRE*, 2008, 15(1): 98 ~ 100

Through plenty of tests, we developed a new kind of fracturing fluid crosslinker HTC-160, which has good properties of thermo-tolerant and gelling and its highest anti-temp is 160°C. The test result shows that the viscosity thoroughly broke down to water