

# A Method for Calculating Parameters of Archie Formula Using Krill Foraging Algorithm

Rengao Jin, Haibin Qiu

Production Logging Center, Logging Co. Ltd., CNPC, Xi'an Shaanxi  
Email: 35624032@qq.com

Received: Dec. 29<sup>th</sup>, 2017; accepted: Mar. 29<sup>th</sup>, 2018; published: Jun. 15<sup>th</sup>, 2018

---

## Abstract

The accurate selection of each parameter value in Archie formula had a great influence on the result of water saturation. In order to solve the problem of insufficient core and rock electricity data in rock electricity test and some areas, it is difficult to get the parameter of Archie formula effectively and accurately. Based on the water saturation test data, physical property data and resistivity data of 30 core samples, the parameters of the Archie formula obtained by using the global searching ability Krill Foraging optimization algorithm were used for obtaining Archie parameters  $a$ ,  $b$ ,  $m$ ,  $n$ , which were 0.9931, 1.0308, 2.322 and 2.133 respectively. The water saturation of the other 8 samples was predicted by using the calculation parameters, and the results were compared with those of the core analysis, the average relative error was within 10%, the fitting effect was good. The results show that the krill foraging algorithm is reliable and effective in the estimation of saturation parameters, and has the application prospect, which is beneficial for evaluating the water saturation in reservoirs.

## Keywords

Krill Foraging Algorithm, Archie Formula, Parameter Optimization

---

# 利用磷虾群觅食优化算法求取阿尔奇公式参数

金仁高, 邱海滨

中国石油集团测井有限公司生产测井中心, 陕西 西安

作者简介: 金仁高(1981-), 男, 工程师, 主要从事油田后期开发生产测井技术工作。

Email: 35624032@qq.com

收稿日期: 2017年12月29日; 录用日期: 2018年3月29日; 发布日期: 2018年6月15日

## 摘要

阿尔奇公式中的各个参数值的准确选取对含水饱和度的结果影响巨大。为了解决在岩电试验和一些地区的岩心和岩电数据不足, 难以有效、准确地得到阿尔奇公式参数值的问题。根据30块岩心样品的蜡封岩心水饱和度试验数据、物性数据以及电阻率数据, 利用磷虾群觅食优化算法的全局寻优能力求取的阿尔奇公式的参数 $a$ 、 $b$ 、 $m$ 、 $n$ 分别为0.9931、1.0308、2.322和2.133。利用计算参数预测了其他8个岩样的含水饱和度, 并与岩心分析结果进行了对比, 平均相对误差在10%以内, 拟合效果较好, 说明磷虾群觅食优化算法在饱和度参数估计上可靠、有效, 具有应用前景, 可为储层的含水饱和度评价工作带来帮助。

## 关键词

磷虾群觅食优化算法, 阿尔奇公式, 参数优化

Copyright © 2018 by authors, Yangtze University and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 阿尔奇公式

1942年, 阿尔奇[1][2][3]通过对若干取心岩样进行深入研究, 提出岩石电阻率与其岩性、孔隙度和含水饱和度的关系, 即阿尔奇定律。

1) 饱含地层水的纯净砂岩的电阻率与地层中水的电阻(即砂岩的含水饱和度  $S_w = 1$ )成正比, 由此得到的比例常数被称作地层因子(一般用  $F$  来表示), 得到的公式为阿尔奇第一公式:

$$\frac{\rho_0}{\rho_w} = F = \frac{a}{\phi^m} \quad (1)$$

式中:  $\rho_0$  为岩石完全含水时的电阻率,  $\Omega \cdot m$ ;  $\rho_w$  为地层水电阻率,  $\Omega \cdot m$ ;  $\phi$  为孔隙度, 1;  $a$  为岩性系数, 1;  $m$  为胶结指数, 1。

2) 当岩石中注入其他流体(油、气)时, 砂岩的  $S_w < 1$ , 该情况下的岩石电阻率与该岩石完全含水时的电阻率成正比, 由此得到的比例系数被称为电阻率指数或电阻率放大系数(一般用  $I$  表示), 得到的公式为阿尔奇第二公式:

$$\frac{\rho_t}{\rho_0} = I = \frac{b}{S_w^n} \quad (2)$$

式中:  $\rho_t$  为岩石电阻率,  $\Omega \cdot m$ ;  $b$  为岩性系数, 1;  $n$  为饱和度指数, 1。

联立式(1)和式(2), 得到阿尔奇公式:

$$S_w = \sqrt[n]{\frac{ab\rho_w}{\phi^m \rho_t}} \quad (3)$$

阿尔奇定律中的  $a$ 、 $b$ 、 $m$ 、 $n$  是经过一定量的岩心试验来确定的。在实际应用中, 若要得到较准确的  $S_w$ , 需要大量岩电试验来确定公式参数, 成本较高。从智能算法的角度来看, 阿尔奇公式可看作是一个适应度函数, 通过给定的  $S_w$ 、 $\rho_w$  以及  $\rho_t$ , 不断进行迭代求取, 能够对  $a$ 、 $b$ 、 $m$ 、 $n$  进行准确确定。由于利用智能算法对参数进行求取的方法无需试验成本, 受到了一些学者的关注。针对该问题, 一些学者[4]提出利用遗传算法、模拟退火算法等对阿尔奇参数进行自动确定, 取得了一定的成果。然而, 无论是遗传算法还是模拟退火算法, 均存在自身固有的问题。如遗传算法具有较强的全局搜索能力, 目前已广泛应用于各行各业[5] [6] [7] [8] [9], 但大范围的随机搜索算法, 其局部搜索能力低下, 不能得到很好的效果。而模拟退火算法的问题在于其控制全局搜索的能力较弱, 导致运用效率低, 经常无法寻找到全局最优解, 仅仅寻找到局部最优解。所以利用上述传统优化算法难以得到最为合适的参数。

## 2. 磷虾群觅食优化算法原理及适应度函数建立

### 2.1. 磷虾群觅食优化算法原理

磷虾群觅食优化算法[10]-[16]是由 Gandomi 和 Alavi 于 2012 年通过模拟磷虾的生态行为提出的一种仿生集群智能算法。与其他仿生群体智能算法相比, 磷虾群觅食优化算法模型具有模型简单、易于实现、效果较好的特点[11] [12] [13]。具体而言, 该算法通过相邻磷虾的诱导运动来进行局部优化, 并通过食物中心引导的觅食行为进行全局优化, 再通过随机扩散行为为进一步扩大最优解的搜索范围。磷虾群觅食优化算法的具体流程如下[14] [15] [16]:

1) 初始化: 设置种群规模  $N_p$ , 最大迭代次数  $I_{max}$ , 其中磷虾群觅食优化算法构建的拉格朗日模型为:

$$\frac{dX_i}{dt} = N_i + F_i + D_i \quad (4)$$

式中:  $t$  代表每一次的迭代;  $X_i$  代表磷虾当前的状态;  $N_i$ 、 $F_i$ 、 $D_i$  分别代表第  $i$  只磷虾的 3 种速度向量。

2) 适应度值以及当前最优个体计算: 评价适应度值, 进而确定当前最优个体  $X_{best}$ 。

3) 位置更新: 根据磷虾群觅食优化算法, 计算并更新所有个体的运动矢量, 具体运动向量包括受诱导运动向量、觅食行为向量和扩散行为向量:

$$N_i^{new} = N^{max} (\alpha_i^{local} + \alpha_i^{target}) + \omega_n N_i^{old} \quad (5)$$

式中:  $N_i^{new}$  为受诱导的向量;  $N^{max}$  为受诱导的最大速度向量;  $\alpha_i^{local}$  为相邻的个体的局部影响向量;  $\alpha_i^{target}$  为当前最优个体的运动向量;  $\omega_n$  为受诱导的惯性权值;  $N_i^{old}$  为上一次受诱导的速度矢量。

$$F_i^{new} = v_f (\beta_i^{food} + \beta_i^{best}) + \omega_f F_i^{old} \quad (6)$$

式中:  $F_i^{new}$  为觅食行为向量;  $v_f$  为觅食行为的速度;  $\beta_i^{food}$  为食物对第  $i$  只磷虾的影响;  $\beta_i^{best}$  是个体历史最优觅食位置;  $\omega_f$  为觅食行为的惯性权值;  $F_i^{old}$  为上一次觅食行为的速度矢量。

$$D_i^{new} = D^{max} \left( 1 - \frac{1}{I_{max}} \right) \delta \quad (7)$$

式中:  $D_i^{new}$  为随机扩散向量;  $D^{max}$  为随机扩散的最大速度;  $I_{max}$  为最大迭代次数;  $\delta$  为每个变量服从  $(-1, 1)$

均匀分布的方向矢量。

4) 位置更新: 计算所有个体的运动矢量, 根据磷虾群觅食优化算法更新位置。

5) 动态调整当前迭代的搜索域范围 $[L^G, U^G]$ :

$$l_k^G = \min \{x_{i,k} \mid i = 1, 2, \dots, N_p\}$$

$$u_k^G = \max \{x_{i,k} \mid i = 1, 2, \dots, N_p\}$$

式中:  $x_{i,k}$  为第  $i$  个  $k$  维变量的值;  $N_p$  为种群规模;  $l_k^G$ 、 $u_k^G$  分别是  $L^G$ 、 $U^G$  的第  $k$  维变量。

6) 若迭代次数  $I < I_{\max}$ , 则令  $I = I + 1$ , 转步骤 2); 否则, 输出最优解  $X^* = X_{\text{best}}$ 。

## 2.2. 目标函数与适应度函数的建立

根据式(2), 可以设定目标函数为:

$$\min f(x) = \frac{1}{\min \sum_{i=1}^N e(i)^2} \quad (8)$$

式中:  $f(x)$  是目标函数;  $e(i)$  为计算的函数值与试验值间的误差;  $N$  为样本数。

根据阿尔奇公式, 适应度函数被确定为:

$$f(a, b, m, n) = \frac{1}{\min \sum_{i=1}^N (S_{wi,i} - S_{w,i})^2} = \frac{1}{\min \sum_{i=1}^N \left( n \sqrt{\frac{ab\rho_w}{\phi_i^m \rho_{t,i}}} - S_{w,i} \right)^2} \quad (9)$$

式中:  $S_{w,i}$  为第  $i$  个样品分析含水饱和度, 1;  $S_{wi,i}$  为计算出的第  $i$  个样品的饱和度, 1;  $\phi_i$  为第  $i$  个样品的地层孔隙度, 1;  $\rho_{t,i}$  为第  $i$  个样品的深电阻率值,  $\Omega \cdot m$ 。

运用磷虾觅食优化算法对适应度函数进行求解, 就能确定最佳的  $a$ 、 $b$ 、 $m$ 、 $n$  组合。阿尔奇公式是适用于砂泥岩储层的最经典公式, 因此利用该方法确定的  $a$ 、 $b$ 、 $m$ 、 $n$  组合适用于致密砂岩储层的饱和度计算。

## 3. 模型实际运用效果分析

以某地区某致密砂岩储层段的 30 个岩心样品作为试验样本进行研究。磷虾群觅食优化算法的初始化参数分别为:  $N$  设置为 20,  $I_{\max}$  设置为 2000 次。通过模拟, 得到阿尔奇公式参数为:  $a = 0.9931$ 、 $b = 1.0308$ 、 $m = 2.322$ 、 $n = 2.133$ 。为验证参数的准确性及适用性, 取未参与建模的 8 块岩样, 利用求得的参数值计算  $S_w$ , 结果见表 1。由表 1 可以看出, 岩心  $S_w$  与计算  $S_w$  的平均相对误差不到 10%, 说明磷虾群觅食优

Table 1. The analysis on the predicted result of  $S_w$

表 1. 预测  $S_w$  结果分析

样品编号	$\phi$ /%	$\rho_w/(\Omega \cdot m)$	岩心 $S_w$ /%	计算 $S_w$ /%	相对误差/%
1	27.77	0.03	50.76	51.16606	0.799957
2	26.09	0.03	55.61	52.19927	6.133303
3	28.14	0.03	48.01	53.17606	10.76039
4	26.22	0.03	56.79	55.59399	2.106027
5	21.70	0.03	74.354	72.21642	2.874876
6	25.19	0.03	52.874	60.20898	13.87256
7	26.46	0.03	48.543	49.79331	2.575675
8	26.35	0.03	48.568	48.88479	0.652261

化算法有效地确定了阿尔奇公式中的参数值, 进而可以准确预测储层  $S_w$ 。

为验证模型参数在实际应用中的合理性, 利用得到的  $a$ 、 $b$ 、 $m$ 、 $n$  参数值对油田现场某井测井数据进行了模拟计算, 结果如图 1 所示。从图 1 中可以明显看出,  $S_w$  计算效果好, 验证了利用磷虾群觅食优化算法计算阿尔奇公式参数的合理性及可行性。

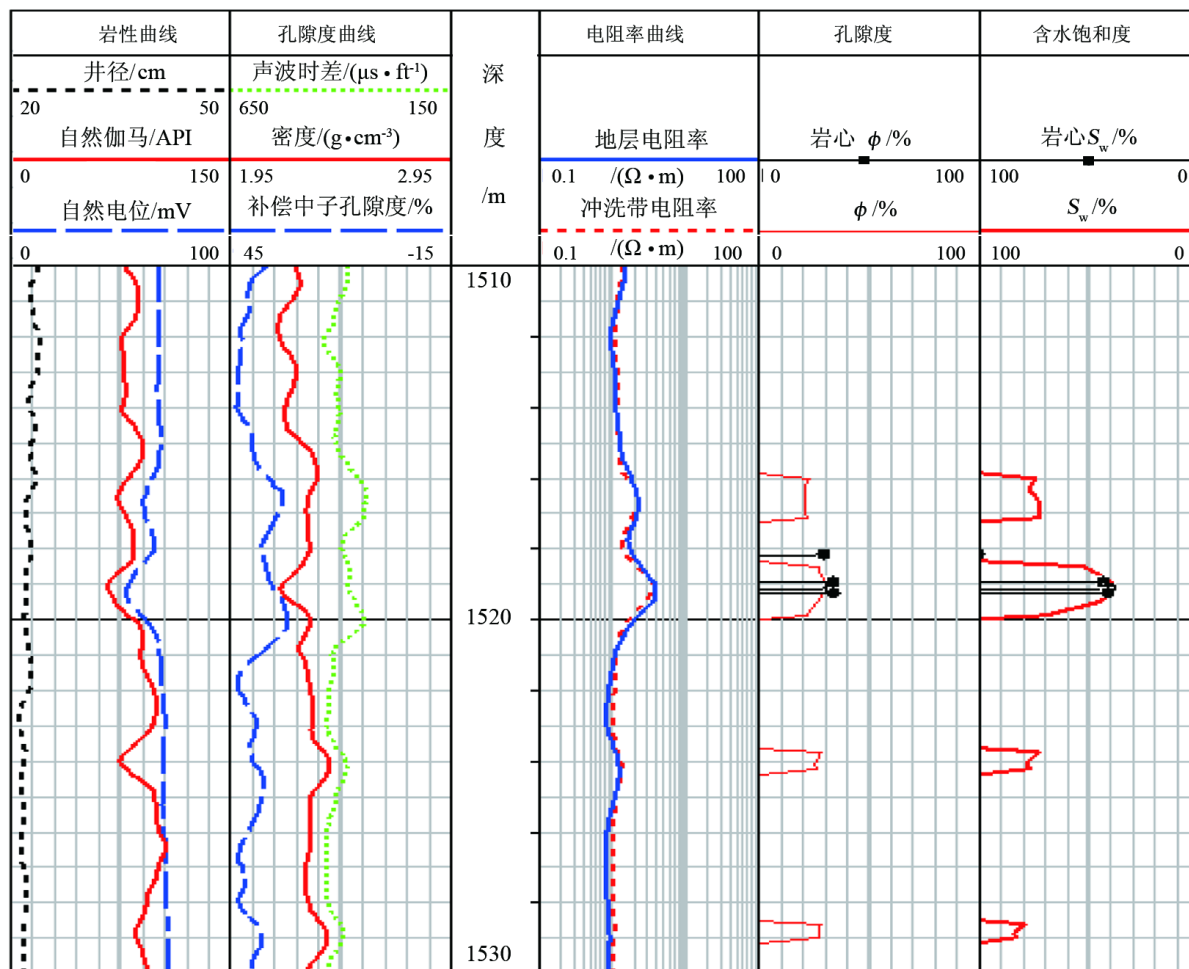


Figure 1. The diagram of saturation evaluation of a well  
图 1. 某井饱和度评价效果图

#### 4. 结语

磷虾群觅食优化算法作为一种比较新的仿生集群智能算法, 使用简单方便。通过对磷虾群觅食优化算法计算致密砂岩储层的含水饱和度结果来看, 磷虾群觅食优化算法求解的阿尔奇参数较为准确, 计算得到的含水饱和度精度较高, 可以满足致密砂岩储层含水饱和度的计算要求。

#### 参考文献

- [1] 雍世和, 张超谟. 测井数据处理与综合解释[M]. 东营: 中国石油大学出版社, 2007.
- [2] Archie, J.G. and Archie, G. (1942) The Electrical Resistivity Logs as an Aid in Determining Some Reservoir Characteristic. *Transactions of the AIME*, **52**, 354-358. <https://doi.org/10.2118/942054-G>
- [3] Rogers, S.J., Fans, J.H., Karr, E., et al. (1992) Determination of Lithology from Well Logs Using a Neural Network.

*AAPG Bulletin*, **76**, 731-739.

- [4] 朱林奇, 张冲, 周雪晴, 等. 融合深度置信网络与核极限学习机算法的核磁共振测井储层渗透率预测方法[J]. 计算机应用, 2017, 37(10): 3034-3038.
- [5] 闫桂京, 潘保芝. 遗传算法在估计测井解释参数方面的应用[J]. 物探化探计算技术, 2001, 23(1): 43-46, 67.
- [6] 朱林奇, 张冲. 谱聚类-Adaboost集成数据挖掘算法在岩性识别中的应用[J]. 中国科技论文, 2016, 11(5): 545-550.
- [7] 文浩. 遗传模拟退火算法在阿尔奇公式参数估计中的应用[J]. 断块油气田, 2008, 15(1): 105-107.
- [8] 牛步能. 利用雨林算法求取阿尔奇公式参数的方法[J]. 长江大学学报(自科版), 2016, 13(20): 32-35.
- [9] 朱林奇, 张冲, 魏昉, 等. 基于改进雨林模糊神经网络模型的页岩储层总有机碳含量评价方法[J]. 高校地质学报, 2016, 22(4): 716-723.
- [10] Gandomi, A.H. and Alavi, A.H. (2012) Krill Herd: A New Bio-Inspired Optimization Algorithm. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, **17**, 4831-4845. <https://doi.org/10.1016/j.cnsns.2012.05.010>
- [11] 王磊, 张汉鹏, 张东宁. 基于对立搜索和混沌变异的磷虾群觅食优化算法[J]. 控制与决策, 2015(9): 1617-1622.
- [12] Mandal, B., Roy, P.K. and Mandal, S. (2014) Economic Load Dispatch Using Krill Algorithm. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, **57**, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2013.11.016>
- [13] Wang, G.G., Guo, L.H., Gandomi, A.H., et al. (2014) Chaotic Krill Herd Algorithm. *Information Sciences*, **274**, 17-34. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2014.02.123>
- [14] Wang, G.G., Gandomi, A.H. and Alavi, A.H. (2014) Stud Krill Herd Algorithm. *Neurocomputing*, **128**, 363-370. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2013.08.031>
- [15] 周雪晴, 张占松, 张超谟, 等. 粗糙集 - 磷虾群觅食优化算法神经网络在孔隙度预测中的应用[J]. 中国科技论文, 2017, 12(9): 990-998.
- [16] 张智, 姜秋喜, 徐梁昊. 磷虾群免疫粒子滤波的机载单站无源定位算法[J]. 火力与指挥控制, 2015, 40(4): 92-97.

[编辑] 龚丹

**Hans 汉斯**

#### 知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>  
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2471-7185, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>  
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: [jogt@hanspub.org](mailto:jogt@hanspub.org)