基于量子蚁群算法的非常规储层叠前地震反演方法

陈宇星
中国石油勘探开发研究院，北京，100083

关键词：非常规储层；量子蚁群算法；地震反演

在地球物理反演中，通常会设置一个目标函数，通过求解目标函数的最小值进而得到问题的真解。（冉启全等，2006）从这个角度出发，反演问题也是一个优化问题。在非常规储层中，地质条件复杂导致的地震信号杂乱和响应复杂多变等特征，使得常规基于蚁群算法的叠前地震反演方法存在寻优局部化和寻优效率低的问题。因此，将这种算法进一步扩展到量子算法中得到量子蚁群算法（QACA）。量子蚁群算法以量子计算原理为基础，利用量子计算的理论和概念，将量子位编码作为蚁群算法中的“信息素”，并利用量子旋转门更新信息素，在不影响算法特性的同时，提高寻优效率，丰富群体的多样性，提高反演方法的有效性和准确性。

1 定义目标函数

地震反演通常是利用地震振幅数据通过最小化目标函数开展的（杜文凤等，2008）。在贝叶斯理论假设下，贝叶斯最大后验概率被定义为在给定初始模型下的最大概率，可以由此得到以下形式的目标函数：

$$m_{INV}=\arg\min_{m}\left[\begin{array}{l}\left(r-G\left(m\right)\right)^{T}\left(r-G\left(m\right)\right)\\+\left(m_{i}-m_{i0}\right)^{T}\left(m_{i}-m_{i0}\right)\end{array}\right]$$

2 量子蚁群算法

量子蚁群算法是一种改进的优化算法，是一种将量子计算和蚁群算法相结合的算法。由于量子计算引入了量子叠加态、概率幅度、量子旋转门等量子概念，量子蚁群算法具有明显的性能优势。与经典计算不同，量子叠加态可由“1”、“0”或两者的任意叠加表示，经典方法在$O(N)$时间内解决的问题，量子算法将在$O(\log N)$时间内找到解决方案（张广智等，2018）。

量子蚁群算法的具体步骤如下：

步骤 1：初始化量子蚁群 $A(t)=(a^{t},a_{2}^{t},...,a_{n}^{t})$，其中 n 为蚁群中的蚂蚁个数，$a_{i}^{t}(i=1,2,...,n)$ 表示在第 t 次迭代时的第 i 个量子蚂蚁。

步骤 2：设定初始参数的值，指定当前迭代次数 t=0 以及最大迭代次数。

步骤 3：计算每只蚂蚁独立的解。

步骤 4：当 n 只蚂蚁均完成其自身计算的解时，进行步骤 5，否则返回步骤 3。

步骤 5：记录本次迭代中 m 只蚂蚁对应的最优解。

步骤 6：更新旋转门，进一步调整蚁群。

步骤 7：循环。重复步骤 3 至 6，直到满足 t 大于最大迭代次数时，循环结束，否则返回步骤 3。

3 算法测试

笔者等根据长宁地区非常规页岩储层的测井数据测试算法的计算效率和稳定性。图 1 为信噪比为 1 的反演结果，通过比较量子蚁群算法和蚁群算法的反演结果，可以发现，相较于蚁群算法的反演结果，由量子蚁群算法得到的纵波速度、横波速度和密度与实际数据有更好的一致性和精度。（图 1）通过计算量子蚁群算法和蚁群算法反演结果与实际测井曲线的相关系数，可以得出，量子蚁群算法对 3 个参数的反演结果（0.9995、0.9994、0.9973）优于蚁群算法（0.9986、0.9982、0.9959）。通过 30 次测试，得到 3 种算法的平均收敛时间，蚁群算法需要 7674 s，量子蚁群算法需要 2981 s，由此得出，

收稿日期：2023-04-10；改回日期：2023-04-30；责任编辑：周健。DOI：10.16509/j.georeview. 2023. s1.255
作者简介：陈宇星，女，1996 年生，硕士，助理工程师，主要从事地球物理储层预测研究；Email: chenyx2022@petrochina.com.cn。

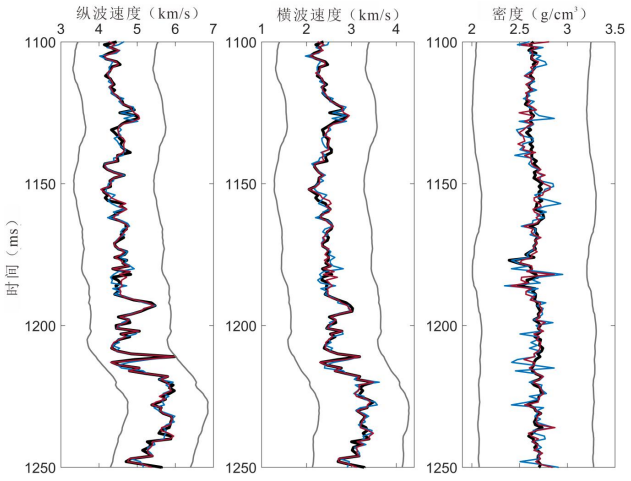

图 1 实际测井曲线

从左至右依次为：纵波速度、横波速度和密度，其中黑色为实际测井曲线，蓝色为蚁群算法反演结果，红色为量子蚁群算法反演结果

量子蚁群的效率比蚁群算法高。

接下来，使用二维 Marmousi 2 非常规储层模型来测试量子蚁群算法在二维地震数据中表现的性能。图 2 中黄圈和红圈处分别表示气藏和油气藏。通过观察反演结果可以发现，3 个弹性参数可以有效地表征模型的低值异常，与模型真实值一致。此外，纵波速度和横波速度剖面具有良好的横向连续性，可以作为表征非常规储层预测的有效指示参数。反演的纵波速度和横波速度误差较小，但反演密度的误差仍然较大，其主要原因可能是正演方程的精度不够。

4 结论与认识

本研究提出了一种基于量子蚁群算法的非常规储层叠前地震反演方法。首先，通过结合贝叶斯理论建立反演所需的目标函数。其次，初始化量子蚁群和相应参数，建立基于量子蚁群算法的反演流程。最后，将提出的量子蚁群算法应用于一维和二维模拟数据中，测试结果显示量子蚁群较蚁群算法而言在非常规储层中表现更高的准确性和有效性。综上，本研究提出的基于量子蚁群算法的非常规储层叠前地震反演方法是目前解决非常规储层地震响应复杂多变等问题的发展方向，未来可推广至实际研究区开展测试应用。

参 考 文 献 / References

杜文凤, 彭苏萍, 韩毅. 2008. 含煤地层转换波叠后横波波阻抗反演. 地质学报, 82(10): 1422~1427.

冉启全, 周雪峰, 胡永乐. 2006. 基于神经网络的多属性火成岩岩性反演技术. 西南石油大学学报 (自然科学版), 28(1): 5.

张广智, 赵晨, 涂奇催, 等. 2018. 基于量子退火 Metropolis-Hastings 算法的叠前随机反演. 石油地球物理勘探, 53(1): 153~160.

CHEN Yuxing: An unconventional reservoir pre-stack seismic inversion method based on quantum ant colony algorithm

Keywords：unconventional reservoir；quantum ant colony algorithm；seismic inversion

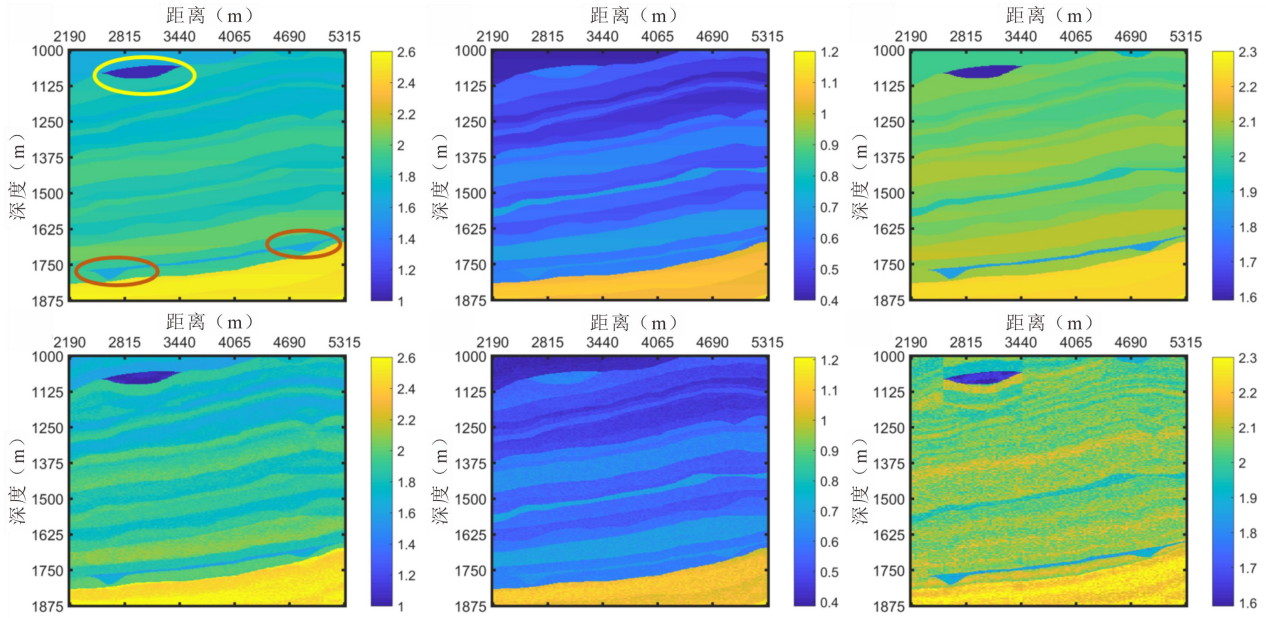

图 2 (a)~(c)分别为 Marmousi 2 模型的纵波、横波速度和密度，(d)~(f)为利用量子蚁群算法反演得到的结果