

# 应用改进的遗传算法反演多层密度界面

陈 军<sup>1</sup> 王家林<sup>1</sup> 吴健生<sup>1</sup> 陈 冰<sup>1</sup> 陈 高<sup>2</sup> 陈永杰<sup>2</sup>

(1. 同济大学海洋地质教育部重点实验室, 上海 200092; 2. 江苏石油勘探局地质科学研究所, 江都 225261)

**摘要:** 利用具有全局优化功能的遗传算法直接反演多层密度界面。首先根据重力反演的特点对遗传算法进行改进, 使遗传算法基因交换过程中交换位置的确定同重力异常的拟合情况相结合, 给出适合于重力反演特点的遗传算法。然后利用改进后的遗传算法直接反演多层密度界面。理论模型和实际剖面的计算表明改进是有效的。

**关键词:** 遗传算法; 密度界面; 反演。

中图分类号: P312; P53 文献标识码: A

文章编号: 1000-2383(2000)06-0651-05

**作者简介:** 陈军, 男, 讲师, 1966 年生, 1994 年毕业于同济大学海洋地质地球物理系, 获硕士学位, 现为同济大学在职博士生, 主要从事重力、磁力和电磁法的教学和科研工作。

密度界面形态的研究对盆地基底研究、区域构造和深部构造起伏研究都具有重要作用。用重力异常确定多层密度界面, 过去常用的方法是通过场分离后逐一用单层界面的反演方法, 由于场的分离本身就是一个较难的问题, 很难保证分离后的场与单一界面一一对应, 所以, 这种方法有时受到一定限制。

关于直接反演多层密度界面的方法还不是太多。王家林等<sup>[1]</sup>讨论了用重力归一化总梯度法确定密度界面的方法, 该方法不需要已知界面的平均埋深和密度资料, 就可对多层密度界面的起伏作出定性和半定量的解释。王一新等<sup>[2]</sup>详细阐述了多层密度界面的正则化非线性反演方法, 并通过理论模型和实际资料的处理证实了其有效性。杨辉<sup>[3]</sup>也利用该方法对实际资料进行了处理, 但是所用的模型是二度模型体, 且结果与正则化阶次、初始近似值的选取、误差大小和求正则化参数的方法有关。

陈胜早<sup>[4]</sup>利用目标函数优化方法求  $N$  层密度界面, 所用模型也为二度模型体, 同时使用对初始模型要求较高的局部优化方法。

在实际资料处理中, 对异常沿走向方向不很长的时候, 如果仍当二度体看待会造成很大的误差, 甚至得到错误的结论。本文选用 2.5 度多边形截面体模型模拟各层密度界面, 并使用对初始模型要求不高的

非线性全局优化方法——遗传算法进行多层密度界面反演计算。通过模型计算说明了方法的有效性。

## 1 计算方法

遗传算法(genetic algorithm, 简称 GA)是由美国 Michigan 大学 Holland 教授和他的学生建立的, GA 模拟生物体在漫长的进化过程中通过进化逐步提高对动态环境的适应能力。GA 解函数优化问题时, 是从初始解群体开始搜索, 在搜索过程中降低了陷入局部最优解的可能性, 同时在 GA 运算中无需导数和其他辅助信息。GA 运算中的关键问题是适应值的选择及对交换和变异过程的实现方式。

将目标函数值作为适应值, 则可用 GA 解重力反演中的目标函数极小化问题。下面讨论计算中的具体问题。

### 1.1 模型的选择

本文选用 2.5 度多边形截面体模型, 界面深度点构成多边形横截面(图 1), 比较接近于界面的实际形态。 $x$  轴为垂直异常走向的测线,  $z$  轴垂直地面向下代表深度。设每层界面由  $m$  个深度点组成,  $z(i, 0)$  ( $i=1, \dots, m$ ) 代表顶界面的深度值, 并且顶界面的深度值为已知值。对共有  $p$  层的模型,  $z(i, k)$  ( $i=1, \dots, m, k=1, \dots, p$ ) 代表需要求取深度点的深度值。 $x(i)$  ( $i=1, \dots, m$ ) 代表各点的横坐标, 横坐标

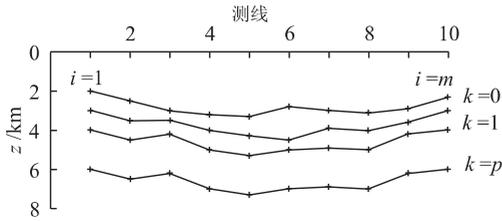


图 1 2.5 度多边形横截面模拟密度界面

Fig. 1 2.5 D polygonal section of density interface

间隔可以相同,也可以根据异常变化情况取不同的值。各层上下对应的深度点取相同的横坐标。由界面  $k$  和界面  $k-1$  上各点组成一个多边形截面体,从而共有  $p$  个多边形截面体。利用 2.5 度多边形截面体公式<sup>[5]</sup>即可正演模型对应的重力异常值。

## 1.2 目标函数

本文选用如下目标函数:

$$\varphi = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m |\Delta g_o(x(i)) - \Delta g_t(x(i), z(i, k))| + \frac{1}{m \cdot p} \sum_{k=1}^p \sum_{i=2}^m |z(i, k) - z(i-1, k)|,$$

其中:  $\Delta g_o(x(i))$  为观测异常,  $\Delta g_t(x(i), z(i, k))$  为理论计算异常,  $x(i)$  为测点坐标,  $(x(i), z(i, k))$  为多边形角点坐标。

$\epsilon$  为给定的任一小量, 本文的优化问题可以表示如下:

$$\varphi \leq \epsilon,$$

$$z_l(i, k) \leq z(i, k) \leq z_u(i, k),$$

$$z(i, k) \geq z(i, k-1).$$

$z_l(i, k)$  和  $z_u(i, k)$  为深度约束范围, 该约束值可以根据钻孔、地震、电法及地质等已知资料获得。

## 1.3 自适应多段交换

标准 GA 一般对染色体采用随机单点交换方式, 即对要进行交换的染色体对, 随机产生一个交换位置, 然后对该位置以后的基因进行交换, 这种交换方式对重力反演一类的多参数问题来说计算效率太低。刘云峰等<sup>[6]</sup>采用的“段交换”方式也就是两点交换, 在交换段选择中采用随机方式, 即随机产生两个交换位置, 交换两个位置之间的一段基因。我们知道, 随机选取的一段基因中, 必然是有的基因对染色体适应度值的改善起积极作用, 而另一些基因则可能起副作用, 这样很难确定交换以后适应度值的变化方向, 势必会增加一些无意义的计算。

在重力异常的拟合过程中, 一般模型拟合较好

的段其对应重力异常也拟合较好, 人机交互解释中的分段解释就是以此为出发点。反过来, 我们根据对应异常的拟合情况, 将要进行交换的两个染色体(父母代个体)的基因排列分成若干段, 选取对应异常拟合较好的段结合生成一个新的染色体(子代个体), 这样生成的子代个体比父母代个体的适应度值都好(至少不会变差), 将生成的一个子代个体与父母代个体中适应度值高的一个个体一起进入 GA 的变异过程。这样既使父代中的优秀个体得以保留, 又使交换过程朝优化方向进行, 减少适应度值的计算量。也就是说, 基因交换的位置不是采用完全随机的方式, 而是随着对应段异常拟合情况变化, 因此, 可称为“自适应多段交换”GA。

## 1.4 进化变异

GA 通过变异过程保证繁殖过程中有足够的新的基因产生, 从而使整个计算向全局优化极值收敛。简单的变异过程, 是在染色体群体中以一个较小的概率, 随机改变染色体中的一个基因, 变异后染色体与原本染色体进行比较, 如果适应度值有提高说明变异得到进化, 保留其结果, 否则仍保留原本。对重力反演这类模型参数量规模较大的优化问题, 这种变异方法效率太低。

如果要使每一代繁殖都能保持较好的状态, 就必须提高变异进化的概率。如果每次变异都能使染色体产生进化, 每代繁殖就只需一次正常的变异, 就能使群体进化繁殖顺利地进行下去。从这个目的出发, 张小路<sup>[7]</sup>采用的方法是, 在群体中随机选取多个染色体, 把每条染色体对应的基因相加平均, 取平均值作新的基因, 这样变异染色体的每一个基因都发生改变, 增加多种新的基因。

GA 能取全局优化解的主要原因在于它是在一个解的群体基础上搜索解。从生物杂交知道, 为了使交换后得到的子代个体更加优秀, 进行基因交换的对象不仅仅是要求具有新的基因, 同时还要求具有比本身更优秀的基因。鉴于此, 本文作了更进一步的改进。利用模拟退火的思想, 取每一代中适应度值最高的染色体, 将其作为初始模型, 对每一个基因加一个修正值, 得到一个新的染色体, 这样连续作若干次(一个给定的次数), 取其中一个最好的值加入下一代的繁殖过程。这里的修正值是随 GA 遗传迭代次数增加而逐渐减小, 比如可取作如下简单形式:

$$\Delta z(i, k) = (z_u(i, k) - z_l(i, k)) \cdot \beta \cdot rnd$$

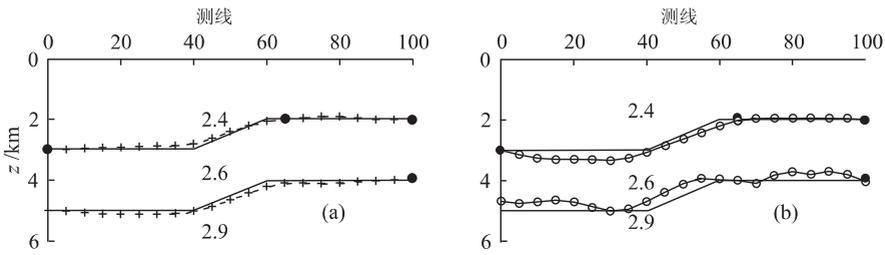


图 2 模型计算结果示意

Fig. 2 Computed results of theoretical model

一. 原始深度; ●. 控制点; +. 无误差时反演深度; ○. 加随机误差后反演深度; 2. 4. 密度值, 单位  $10^3 \text{ kg/m}^3$

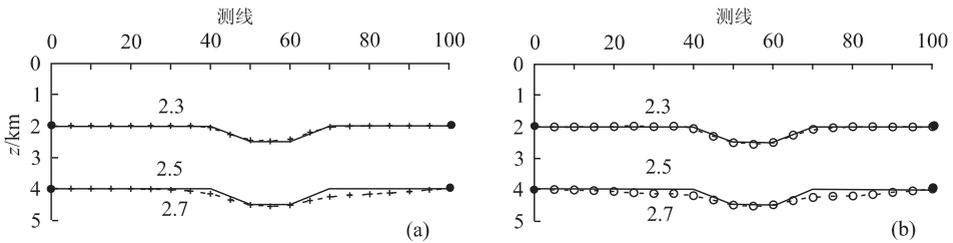


图 3 模型计算结果示意

Fig. 3 Computed results of theoretical model

一. 原始深度; ●. 控制点; +. 最大深度为 8 km 时反演结果; ○. 最大深度为 10 km 时反演结果; 2. 4. 密度值, 单位  $10^3 \text{ kg/m}^3$

$$\beta = \begin{cases} 1, & \text{第一代;} \\ \beta \cdot 0.95 & \text{从第二代开始.} \end{cases}$$

$rnd$  是  $0 \sim 1$  之间的一个随机数.

## 2 理论模型计算

给定一个两层深度模型(图 2a 和 2b 中的实线所示),以地面为顶界面,求下面两个密度界面的深度值,用本文所给的方法进行计算.计算时控制点(用实心点“●”所示)深度取固定值,其他各点深度的最小值为 0 km,最大值为 8 km.图 2a 给出了在异常未加误差时反演结果(“+”所示);图 2b 给出的是对异常加 10% 随机误差后反演结果(以空心点“○”所示).

图 3 所示为另一个两层界面的模型,其中实线表示原始深度值,实心点表示控制点,a 和 b 分别给出了最大深度取值范围为 8 km 和 10 km 时反演计算的结果.

图 4 给出了对图 2a 中模型分别用多段交换 GA 和单点交换 GA 计算时,群体目标函数平均值随遗传迭代次数的变化情况,图中实线表示用多段交换 GA 计算时目标函数平均值的变化情况,虚线则表示用单点交换 GA 计算时的变化情况.图 5 给

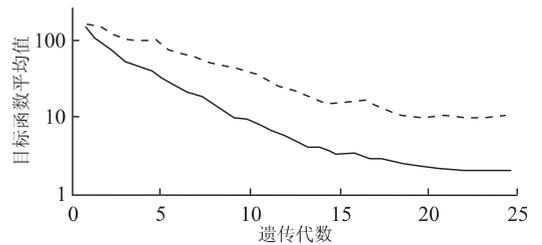


图 4 多段交换 GA 与单点交换 GA 收敛情况对比

Fig. 4 Convergent curve comparison between multi-section crossover and single point crossover

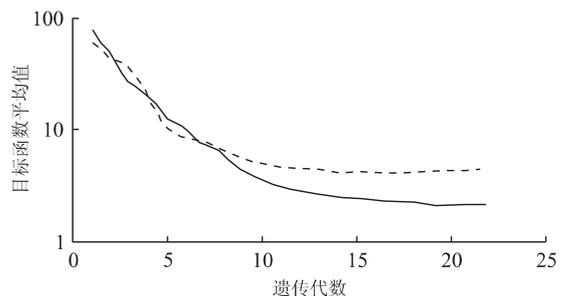


图 5 本文和文献[7]变异过程收敛情况对比

Fig. 5 Convergent curve comparison between mutating process and literature

出分别用文献[7]和本文的变异过程进行计算时,群体目标函数平均值随遗传迭代次数的变化情况,图

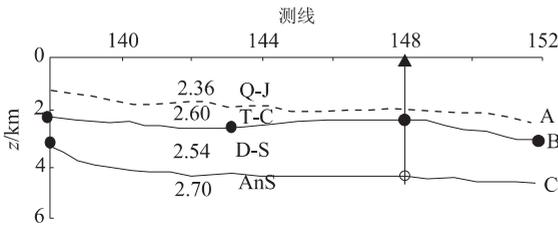


图 6 实际剖面反演结果示意

Fig. 6 Inversion results of field section

— 计算深度; ▲ 钻孔位置; ● 控制点; ○ 钻孔揭示 C 界面深度; 2.36. 密度值,  $10^3 \text{ kg/m}^3$ ; Q-J. 地层; AnS. 包括奥陶系、震旦系、前志留面以下的地层

中实线表示用本文的变异过程计算时目标函数平均值的变化情况,虚线则表示用文献[7]中变异过程计算时的变化情况。

通过图 4 和图 5 两个目标函数平均值的变化对比,可看出本文所实施的计算过程在收敛速度上有了较大的改善,说明改进是有效的。

### 3 实际资料的处理

J 剖面位于下扬子地区,剖面所在区域存在 3 个主要密度界面,第一个密度界面相当于印支面(图 6 中界面 A),上下密度差为  $0.24 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ,第二个密度界面相当于志留系顶面(图 6 中界面 B),上下密度差为  $-0.06 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ,第三个密度界面相当于前志留面,上下密度差为  $0.16 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 。在地震资料上印支面显示比较清楚,而志留系顶面和前志留面显示不全,需要利用重力资料进行计算。按常规的剥皮法可较准确地剥掉印支面的异常,对于志留系顶面和前志留面本身资料不全,要将其叠加异常分开不容易。本文先将印支面的异常和深部异常剥离,再以印支面为已知顶界面,根据钻孔和地震资料取 5 个控制点(图 6 中实心点 ● 所示),其他各

点最小深度取印支面的深度,最大深度取 8 km,计算结果如图 6 中实线所示。根据钻孔揭示的界面 C 的深度如图中空心点 ○ 所示,与计算所得的界面 C 在该点的深度吻合较好,说明采用文中的多参数控制下直接求多层界面具有一定的效果。

### 4 结论与建议

(1)通过模型计算和实际资料的对比计算,说明本文改进的方法具有一定的效果。在异常的分离效果不好的地区,可在钻孔、地震及地质资料等的控制下直接反演多层密度界面。(2)遗传算法是目前较受关注的全局优化方法,对初始模型的依赖程度较低。但是对于重力反演来说,对模型使用尽量多的已知资料作控制约束,除了可以加快计算速度,减少计算代价以外,对于降低重力反演本身具有的多解性问题也是必要的。

#### 参考文献:

- [1] 王家林,王一新,万明浩,等. 利用重力归一化总梯度法研究密度界面[J]. 石油地球物理勘探, 1987, 22(6): 684~690.
- [2] 王一新,王家林,张曙明,等. 研究多层密度界面的正则化非线性反演方法[J]. 石油物探, 1987, 26(1): 78~90.
- [3] 杨辉. 重力异常多层密度界面反演的应用[J]. 石油地球物理勘探, 1992, 27(1): 140~146.
- [4] 陈胜早. N 层变密度模型数学模拟法在苏浙皖地区的应用[J]. 石油地球物理勘探, 1987, 22(3): 237~241.
- [5] 王家林,王一新,万明浩. 石油重磁解释[M]. 北京:石油工业出版社, 1991.
- [6] 刘云峰,沈晓华. 二维密度界面的遗传算法反演[J]. 物探化探计算技术, 1997, 19(2): 138~142.
- [7] 张小路. 重磁反演的群体优生遗传算法[J]. 地质与勘探, 1999, (5): 31~35.

## APPLICATION OF IMPROVED GENETIC ALGORITHM TO INVERSION OF MULTI-LAYER DENSITY INTERFACE

Chen Jun<sup>1</sup> Wang Jialin<sup>1</sup> Wu Jiansheng<sup>1</sup> Chen Bing<sup>1</sup> Chen Gao<sup>2</sup> Chen Yongjie<sup>2</sup>

(1. Laboratory of Marine Geology, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Geological Science Institute, Jiangsu Oil Prospecting Bureau, Jiangdu 225261, China)

**Abstract:** The purpose of this paper is to inverse directly the multi-layer density interface by means

of genetic algorithms, one of the global optimization methods. At first, this paper presents the improvement of the genetic algorithm in line with the gravity inversion for the combination of the determination of the exchange positions with the fitting of the gravity anomaly during the exchange of the genes in the genetic algorithm. In this case, the genetic algorithm appropriate to the gravity inversion can be obtained. Then, this paper presents the direct inversion of the multi-layer density interface using this improved GA. The results of the theoretical model and field section show that this kind of improvement is effective.

**Key words:** genetic algorithm; density interface; inversion.

\*\*\*\*\*

## 《地球科学——中国地质大学学报》 2001 年 第 26 卷 第 1 期 要目预告

平南幔源包体中橄榄石的显微构造研究及其意义 .....	孔 华 马 芳 金振民等
滇西北金沙江结合带霞若—拖顶地区两类中—基性火山岩的多元地球化学示踪 .....	马振东 葛孟春 冯庆来等
北秦岭弧后盆地俯冲消减与陆壳物质再循环——桃园岩体和黄岗杂岩体的地球化学证据 .....	张 利 张宏飞 王林森等
测定岩石经历的最高古应力状态实验研究 .....	丁原辰 邵兆刚
琼东南盆地高精度层序地层学研究 .....	魏魁生 崔早云 叶淑芬等
冀中坳陷潜山油气运聚动力学特征及其类型 .....	邹华耀 向龙斌 梁宏斌等
鲁西金矿成矿组分的聚集与演化 .....	陈永清 赵鹏大
三维地电断面电阻率测深有限元数值模拟 .....	阮百尧 熊 彬 徐世浙
利用相控模型进行井间参数预测 .....	桂 峰 黄智辉 马 正
混沌控制反演系统构造及算法逻辑设计 .....	李洪奇 刘 洪 李幼铭
用孔压静力触探求固结系数的研究 .....	孟高头 王四海 张德波等
岩石有限应变测量反向轮法的计算机软件设计 .....	周继彬 曾佐勋