

文章编号: 1671-8860(2004)11-0981-04

文献标识码: A

# 用遗传算法反演地壳的变密度模型

柯小平<sup>1,2</sup> 王 勇<sup>1</sup> 许厚泽<sup>1</sup>

(1) 中国科学院测量与地球物理研究所, 武汉市徐东路174号, 430077)

(2) 中国科学院研究生院, 北京市玉泉路甲19号, 100083)

**摘要:** 用青藏高原布格重力异常资料, 结合亚东-格尔木地学断面得到的Moho面结构, 反演了青藏高原中西部地壳内密度随深度变化的指数分布函数, 试验得出地壳表层与地幔的密度差约为 $-0.926\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ , 地壳的平均密度值为 $2.750\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。

**关键词:** 遗传算法; 重力反演; 变密度; 青藏高原

中图法分类号: P223; P313

地球内部的密度横向不均匀和纵向细分层是决定地球结构和动力学行为的重要因素之一。由地壳密度不均匀导致的内部物质运动可引起岩石圈板块运动和各类地壳和岩石圈的构造和演化。这些运动又能引起全球和区域构造应力场的变化。因此, 壳幔结构纵向细分层和横向不均匀的研究一直是地球物理研究的重要内容。为了解地壳内部的密度细分结构, 一种方法是通过密度与速度所存在的某种关系将速度转化为密度; 另一种方法是通过重力异常, 反演地壳内部的密度界面或横向不均匀性。然而, 由于位场的可叠加性, 重力反演具有非惟一性, 尤其是对于利用重力资料反演多界面结构或多层变密度结构。为了克服重力反演的非惟一性, 将重力与地震资料结合, 用地震资料提供一定的约束, 是一种很好的解决办法。

在利用重力资料反演壳幔结构时, 往往采用地壳均匀密度模型, 即密度-深度函数为常量, 这无疑是一种极为近似的模型, 因为地球内部的密度值是随深度变化的。一些学者曾对变密度模型反演壳幔结构等进行了研究<sup>[1~3]</sup>。这些研究大多是在频率域中利用Parker-Oldenburg公式<sup>[4,5]</sup>迭代反演, 其优点是速度快, 但存在对重力的“向下延拓”过程而产生高频噪声, 为了消除高频噪声, 需要采取低通滤波技术, 但对高频噪声进行滤波的同时也把数据中有用的高频信息滤掉了。

本文引用重力异常资料, 以地震测深剖面作

约束, 在频率域中采用遗传算法, 反演地壳变密度模型。作为应用实例, 反演了青藏高原中部的变密度模型, 并探讨了其地球物理含义及进一步的应用前景。

## 1 遗传算法反演地壳变密度模型

地壳中密度与深度的关系可用常量、线性关系、指数关系、Fourier级数关系及三次样条函数关系等<sup>[1]</sup>来表达。在密度的纵向变化过程中, 地壳表层的密度随深度变化较快, 深部变化趋缓, 因此, 本文采用密度与深度呈指数关系的变密度模型。

假定地壳表层与地幔的密度差为 $\Delta\rho_0$ , 壳幔密度差指数模型为:

$$\Delta\rho(z) = \Delta\rho_0 e^{-\mu z} \quad (1)$$

式中,  $\mu$  为衰减系数;  $z$  为深度。

由壳幔密度界面引起的重力异常在波数域中的计算公式为<sup>[3]</sup>:

$$\begin{aligned} F[\Delta g] &= -2\pi G \Delta \rho_0 e^{-(\mu+k)z_0} \cdot \\ &\left[ \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-\mu+k)^{n-1}}{n!} F[h^n(\vec{r})] \right] \end{aligned} \quad (2)$$

式中,  $\Delta g$  为重力异常;  $F[\Delta g]$  为重力异常的谱;  $G$  为万有引力常数;  $h$  为界面起伏;  $k$  为波数;  $z_0$  为平均地壳厚度。

Oldenburg根据Parker公式推导出了位场迭代反演公式<sup>[5]</sup>:

$$F[h(x)] = -\frac{F[\Delta g(x)]}{2\pi G\rho} e^{kz_0} - \sum_{n=2}^{\infty} \frac{k^{n-1}}{n!} F[h^n(x)] \quad (3)$$

利用式(3)进行迭代反演时, 近地表高频信号使  $e^{kz_0}$  较大,  $F[\Delta g(x)] e^{kz_0}$  对  $F[\Delta g(x)]$  起放大作用, 实质上是对  $F[\Delta g(x)]$  的“向下延拓”过程,  $e^{kz_0}$  被称为向下延拓因子<sup>[6]</sup>, 它使高频分量大大提高而损害了反演收敛的稳定性<sup>[6]</sup>, 这种情况常采用滤波技术进行处理。

为了避免  $e^{kz_0}$  的放大作用, 本文利用地震解释得到的界面作为依据, 利用 Parker 公式进行正演计算, 用遗传算法进行反演, 从而避免了使用 Oldenburg 的迭代反演公式而产生的“向下延拓”问题。

首先利用地震剖面给出地壳内部的界面, 然后给定密度模型  $\Delta\rho_0, \mu$  的初值及界面的平均深度, 利用式(2)便可在波数域里计算指数密度模型引起的重力异常, 利用遗传算法(GA), 通过给定搜索范围及适当的交配(crossover)概率和变异(mutation)概率, 在以下目标函数下求  $\Delta\rho_0, \mu$  的最优解:

$$F = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_1^M (\Delta g - \Delta g_0)^2} \quad (4)$$

式中,  $\Delta g_0$  为观测重力异常;  $\Delta g$  为计算重力异常;  $M$  为观测点数。

为了验证本方法的有效性和稳定性, 本文计算了一个指数密度模型

$$\Delta\rho(z) = -0.95e^{-0.0187z} \quad (5)$$

所引起的重力异常(图 1), 然后将所计算的重力异常加入  $(0 \sim 20 \times 10^{-5}) \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$  的随机误差, 用遗传算法反演指数密度模型的  $\Delta\rho_0, \mu$ , 结果见表 1。模型计算的重力异常结果如图 1 所示。从表 1 和图 1 的结果可以看出, 该方法能收敛到一个稳定的解, 并基本接近真值。

Parker 公式具有快速计算的优点, 遗传算法具有全局搜索、不用求导数、效率较高的特点, 且避免了利用 Parker-Oldenburg 公式迭代反演中的高频噪声问题及滤波的影响, 地震与重力的结合又克服和限制了重力反演的非惟一性问题。因此, 以地震剖面作约束, 用重力异常资料, 采用遗传算法反演地壳的变密度模型是行之有效的方法。

表 1 GA 反演密度模型参数与真值

Tab. 1 Parameters of Density Model from GA Inversion and Synthetic Data

模型参数	$\Delta\rho_0$	$\mu$
真值	-0.95	0.0187
GA 反演值	-0.938	0.0189

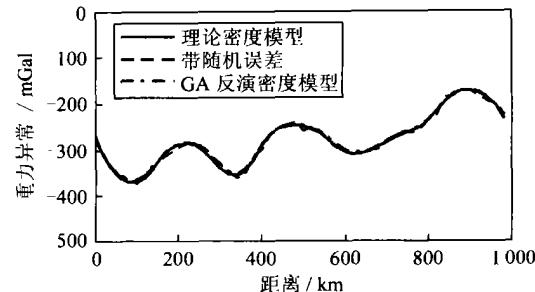


图 1 理论密度模型与反演密度模型产生的重力异常

Fig. 1 Gravity Anomaly from Theoretic and Inversion Density Model

## 2 青藏高原中部变密度模型反演

青藏高原是地球上最高的、形成时代最晚的高原, 是大陆多次离散聚合的地区, 也是大陆范围内地质作用最为活跃的地区。它是阐明岩石圈结构、造山机制和地壳运动的动力学等一系列地球科学重大理论问题的关键地区。据以往的地震测深、大地电磁、重力、地磁等地球物理探测结果, 青藏高原的地壳巨厚并由多层介质组成, 可以得出一个五层的地壳模型, 且地壳厚度、结构、深部与浅部断裂分布, 不论在纵向和横向, 都是不均匀的<sup>[7]</sup>。从目前对青藏高原的壳幔结构的研究成果来看, 对青藏高原地壳多层介质的密度在纵向和横向的分布了解的并不多。因此, 本文将利用青藏高原的布格重力异常资料, 结合地震测深剖面的结果, 构造青藏高原地壳的密度纵向分布模型。

### 2.1 青藏高原中部指数密度模型反演

假设青藏高原地壳的纵向密度分布为式(1)所示的指数分布, 利用中部亚东-格尔木地学断面研究给出的 Moho 界面<sup>[8]</sup>作为起始密度界面, 以地震测深得到的速度结构<sup>[8]</sup>作为约束, 用遗传算法反演了青藏高原中部地壳指数密度模型。遗传算法反演参数及结果见表 2。反演得到的青藏高原中部壳幔纵向密度差指数分布模型为:

$$\Delta\rho(z) = -0.926e^{-0.0188z} \quad (6)$$

同时, 也得到了 Moho 界面的平均深度为 51km。

图 2 是反演得到的密度模型计算的重力异常和观测的布格重力异常。从图 2 可以看出, 两者之间存在一定差异, 这主要是由于亚东-格尔木剖面南北向不均匀、青藏高原地壳横向不均匀及地幔异常所致。亚东-格尔木剖面南北段 Moho 面存在一定差异, 雅鲁藏布缝合带以南 Moho 面稍浅, Moho 面较陡, 变化梯度大, 而北段变化相对平缓。同时, 青藏高原地壳存在较强的横向不均

匀性<sup>[7]</sup>, 变密度模型虽然反映了密度纵向不均匀性, 但布格异常中所包含的横向不均匀性依然存在。另外, 由于位场的可叠加性, 布格重力异常是地表以下各层密度不均匀及界面起伏的综合反映。图 2 中实测重力异常还应包括沉积层、岩石圈地幔等其他场源产生的重力异常, 因此, 图 2 中模型计算的重力异常和观测的布格重力异常之间的差异有其他场源的影响, 特别是青藏高原地区地幔异常的存在<sup>[8]</sup>。

表 2 遗传算法反演参数及结果

Tab. 2 Parameters and Results from Genetic Algorithm

参数	搜索范围	反演结果
$\Delta\rho_0'$ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	-0.9 ~ -1.0	-0.926
$\mu$	0 ~ 0.4	0.0188
深度 / km	30 ~ 60	51

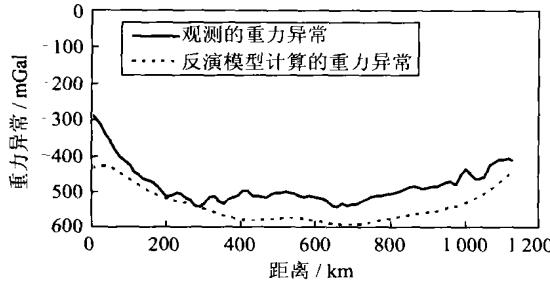


图 2 亚东-格尔木剖面观测的布格异常与反演模型计算的重力异常比较

Fig. 2 Comparison of Measured Bouguer Anomaly with Calculated Gravity Anomaly from Inversion Model in Yadong-Golmud Profile

## 2.2 青藏高原中部密度结构特征

由青藏高原中部亚东-格尔木壳幔纵向密度差指数分布模型可以计算出密度随深度的变化(见图 3), 将地震得到的速度结构以及用密度-速度关系转换得到的密度也示于图上。从图 3 可以看出, 用本文方法获得的密度随深度分布模型与地震获得的速度结构及由速度转换的密度结构有

很好的一致性, 这也说明用重力和地震资料联合所得到的密度模型很好地反映了青藏高原地壳介质的纵向分布特征。

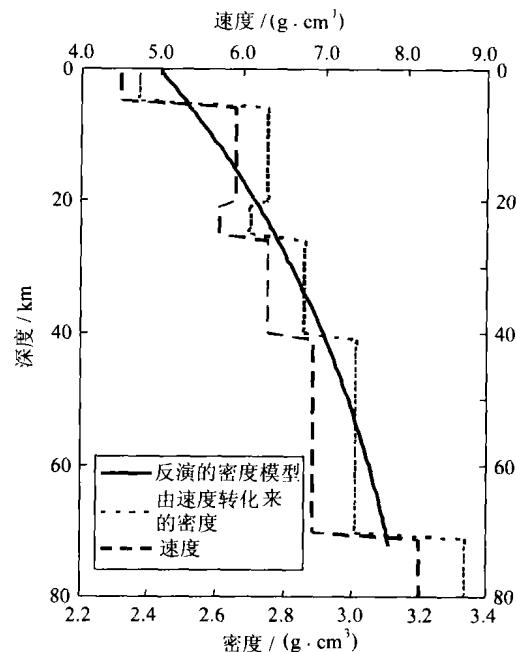


图 3 亚东-格尔木剖面密度速度随深度变化曲线

Fig. 3 Curves of Density and Velocity Variation Along with Depth in Yadong-Golmud Profile

密度模型式(6)给出了青藏高原中部地表层与地幔的密度差为 $-0.926\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ , Moho 界面平均深度 51km 处密度与地幔的密度差约为 $-0.355\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ (表 3), 平均壳幔密度差为:

$$\Delta\rho = \frac{1}{51} \int_0^{51} -0.926 e^{-0.0188z} dz = -0.596 \text{g} \cdot \text{cm}^{-3} \quad (7)$$

参考沉积层密度资料, 取青藏高原中部沉积层的密度为 $2.42\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ , 用上述密度模型可给出上地幔的密度为 $3.346\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ , 这个结果与大陆地区上地幔顶部的密度结果是非常一致的。由式(7)可以得到青藏高原中部地壳的平均密度值为 $3.346 - 0.596 = 2.750\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。

表 3 青藏高原中部的密度结构/( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )Tab. 3 Density Structures in Central Tibetan Plateau/( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )

剖面	地表与地幔密度差	Moho 界面平均深度 处与地幔密度差	平均壳幔密度差	上地幔密度	地壳平均密度
亚东-格尔木	-0.926	-0.355	-0.596	3.346	2.750

## 3 结语

本文实例分析证明了用遗传算法反演地壳变密度模型的可靠性及实用性。本研究可为研究该

地区的地球动力学问题以及建立地球动力学模型时所需介质密度信息提供一定的参考。

## 参 考 文 献

- 陈胜早. 多层变密度模型反演与壳幔结构研究. 中国

- 科学, 1989(9D): 991~1 000
- 2 Chai Y F, William J H . Gravity Inversion of an Interface above Which the Density Contrast Varies Exponentially with Depth. Geophysics, 1988, 53(6): 837~845
- 3 Xia J H, Donald R S. Moho Depths in Kansas from Gravity Inversion Assuming Exponential Density Contrast. Computers and Geosciences, 1995, 21(2): 237~244
- 4 Parker R L. The Rapid Calculation of Potential Anomalies. Geophys. Jour. Roy. Astro. Soc., 1972, 31(2): 447~455
- 5 Oldenburg D W. The Inversion and Interpretation of Gravity Anomalies. Geophysics, 1974, 9(4): 526~536
- 6 冯锐, 严惠芬, 张若水. 三维位场的快速反演方法及程序设计. 地质学报, 1986, 60(4): 390~403
- 7 滕吉文, 张中杰, 张秉铭等. 青藏高原的隆升与环境变化. 地学前缘, 1997, 4(1~2): 247~254
- 8 孟令顺, 高锐, 周富祥等. 利用重力异常研究亚东-格木木地壳构造. 中国地质科学院院报, 1990, 21: 149~161

第一作者简介: 柯小平, 博士生。研究方向为重力和地震联合反演。  
E-mail: xiaopke@163.com

## Inversion of Variable Density Model of Crust from Genetic Algorithms

KE Xiaoping<sup>1,2</sup> WANG Yong<sup>1</sup> XU Houze<sup>1</sup>

(1 Institute of Geodesy and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, 174 Xudong Road, Wuhan 430077, China)

(2 Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, 19A Yuquan Road, Beijing 100038, China)

**Abstract:** An approach for inverting crustal variable density model in wave-number domain from gravity and DSS results by implementing genetic algorithms is investigated. The validity and stability of this method is proved. The exponential density models of crust are inverted from Bouguer gravity anomalies in central Tibetan Plateau, combined with Moho boundaries derived from seismic in Yadong-Golmud GGT. The density contrast between crustal surface and mantle is about  $-0.926 \text{ g cm}^{-3}$ , the average density of crust is  $2.750 \text{ g cm}^{-3}$  in central Tibetan Plateau.

**Key words:** genetic algorithms; gravity inversion; variable density; Tibetan Plateau

**About the first author:** KE Xiaoping, Ph.D candidate, majors in joint inversion of gravity and seismic data.

E-mail: xiaopke@163.com

(责任编辑: 涓涓)

### 欢迎订阅 2005 年《地球空间信息科学学报(英文版)》

《地球空间信息科学学报》为我国唯一的英文版测绘专业学术期刊。其宗旨是:立足国内,面向国际,通过发表具有创新性和重大研究价值的测绘理论成果,促进国内外学术交流。本刊内容包括综述和展望、学术论文和研究报告、本领域重大科技新闻等,涉及测绘研究的主要方面,尤其是数字摄影测量与遥感、全球定位系统、地理信息系统及其集成等。收录本刊的数据库包括 CAS、PK 等,读者对象为测绘及相关专业科研人员、教师、研究生等。

本刊为季刊, 国内外公开发行。自 2005 年起, 本刊改为邮局发行, 邮发代号: 38-348, 国外代号: 1556Q。A4 开本, 80 面, 定价 10 元/册, 逢季末月 5 日出版。