

doi: 10.11720/wtyht.2020.1578

高秀鹤,熊盛青,于长春,等.不同高度重力数据和井中重力数据融合反演研究[J].物探与化探,2020,44(6):1361-1367.http://doi.org/10.11720/wtyht.2020.1578

Gao X H, Xiong S Q, Yu C C, et al. A study of joint inversion of gravity data from multi-planes and boreholes[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2020, 44(6): 1361-1367. http://doi.org/10.11720/wtyht.2020.1578

不同高度重力数据和井中重力数据融合反演研究

高秀鹤^{1,2,3}, 熊盛青¹, 于长春¹, 孙思源¹

(1. 中国自然资源航空物探遥感中心, 北京 100083; 2. 自然资源部 航空地球物理与遥感地质重点实验室, 北京 100083; 3. 中国地质大学(北京) 地球物理与信息技术学院, 北京 100029)

摘要: 影响重力三维反演效果的主要因素是观测数据, 包括观测数据的质量、数量、位置等。本文使用正则化反演方法研究不同高度及井中观测重力数据对反演结果的影响。首先, 不同高度重力数据单独反演, 验证反演效果与观测面高度的关系。然后, 融合反演不同高度的重力数据, 验证数据融合对反演效果的改善作用; 基于融合反演的有益效果, 当仅有单一平面观测重力数据时, 通过延拓技术获得不同高度的延拓数据, 融合延拓数据和观测数据, 以改善反演效果。最后, 将井中重力、井中密度数据加入到反演中, 利用其距离目标体更近的优势, 进一步提高垂直方向分辨率。

关键词: 不同高度; 井数据; 重力数据; 融合反演; 延拓

中图分类号: P631 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2020)06-1361-07

0 引言

重力数据反演面临严重的多解性问题, 高斯定理指出其本质原因: 有无数种不同的密度分布可以引起相同的重力异常^[1-3]; 此外, 异常体引起的重力异常是连续分布的, 而我们采集的信息只是某一平面上的部分离散数据, 这种信息量的不足进一步加重了反演结果的多解性^[4-5]。这种多解性是导致重力数据反演结果趋肤效应严重、分辨率低的本质原因。利用已知的先验地质信息对密度进行合理约束是改善重力数据反演效果的有效手段, 常用的约束方法有最小质量约束、最小体积约束、最大光滑约束、最小惯量约束等^[6-10]。另一方面, 增加观测数据的数据量也能够改善反演效果^[11-12], 增加的观测数据可以是同种地球物理数据加密或不同平面采集, 也可以是不同种类地球物理数据^[13-14]。但在实际工作中, 由于经费或者测量条件限制, 无法获得更多

观测数据时, 通过延拓技术获取多高度面观测数据加入到反演中是可行的^[15]。

垂直分辨率差是重力数据反演中最为突出的问题^[16], 重力数据的核函数随深度的增加逐渐衰减是密度反演结果分辨率差的直接原因。从方法技术角度出发, 引入深度加权抵消核函数衰减速率, 能够有效克服反演结果的趋肤效应, 提高垂直分辨率^[3, 17-19]; 从实测数据角度出发, 引入邻近异常源的井中观测重力数据、井中岩石密度数据, 可提高反演结果的垂直分辨率^[20]。

不同高度观测面的重力数据包含的波场信息不同^[21], 因此, 单独反演效果存在差异, 本文首先设计模型试验分析了不同高度面观测重力数据的反演效果; 然后, 融合反演不同高度面观测的重力数据, 与单一高度面观测重力数据反演结果对比, 分析融合反演的效果, 同时, 多观测面数据不可得时, 利用延拓技术获得不同高度重力数据用于反演; 最后, 分析井中重力数据、井中密度数据约束下, 不同高度重力

收稿日期: 2019-12-13; 修回日期: 2020-08-19

基金项目: 国家重点研发计划项目“综合航空物探地球物理探测系统集成方法技术研究”(2017YFC0602201); 中国博士后科学基金(2020M670601); 国家自然科学基金(42004125); 自然资源部航空地球物理与遥感地质重点实验室课题(2020YFL11)

作者简介: 高秀鹤(1991-), 女, 博士, 主要从事重磁及张量梯度数据反演研究工作。Email: gaoxiuevip@163.com; 842091616@qq.com

通讯作者: 熊盛青(1963-), 男, 博士, 教授级高级工程师, 长期从事航空物探和遥感技术研究和管理工作。Email: xsq@agrs.cn

数据反演效果。

1 融合反演原理

离散重力数据与离散密度块体的关系如下：

$$\mathbf{g} = \mathbf{A}\boldsymbol{\rho}, \tag{1}$$

式中： $\boldsymbol{\rho}$ 是密度向量， \mathbf{g} 是某一观测面的观测重力数据向量， \mathbf{A} 是正演算子矩阵。反演过程中，已知观测重力数据向量 \mathbf{g} 和正演算子矩阵 \mathbf{A} ，求解密度向量 $\boldsymbol{\rho}$ 。由于观测数据中不可避免含有噪声干扰，使得反演问题病态，导致解不稳定，吉洪诺夫正则化方法作为一种常规的处理手段，可有效解决这一问题，求式(1)中 $\boldsymbol{\rho}$ 的反演问题可转化为求解目标函数最优解的问题，目标函数如下：

$$\phi = \phi_g + \alpha\phi_\rho, \tag{2}$$

式中： ϕ_g 是数据拟合函数， ϕ_ρ 是模型拟合函数， α 代表正则化参数。数据拟合函数为

$$\phi_g = \|\mathbf{A}\boldsymbol{\rho} - \mathbf{g}\|_2^2 = (\mathbf{A}\boldsymbol{\rho} - \mathbf{g})^T(\mathbf{A}\boldsymbol{\rho} - \mathbf{g}). \tag{3}$$

模型拟合函数为最小模型约束：

$$\phi_\rho = \|\boldsymbol{\rho}\|_2^2 = \boldsymbol{\rho}^T\boldsymbol{\rho}. \tag{4}$$

在模型拟合项中加入深度加权函数 \mathbf{W} ，可有效克服重力反演结果中的趋肤问题。反演结果中异常体的埋深很大程度上受深度加权函数影响，弱的深度加权函数容易获得较浅的异常体埋深，强的深度加权则容易获得较深的异常体埋深。

引入深度加权函数后，模型拟合函数可以写成

$$\phi_\rho = \|\mathbf{W}\boldsymbol{\rho}\|_2^2 = (\mathbf{W}\boldsymbol{\rho})^T\mathbf{W}\boldsymbol{\rho}. \tag{5}$$

不同平面(高度或深度为 z)重力数据融合反演时，数据拟合函数不同。观测重力数据 \mathbf{g}^z 表示观测面高度或深度为 z 的重力数据。将 \mathbf{g}^z 作为观测数据加入到目标函数的数据拟合函数中，则数据拟合函数为

$$\phi_g = \lambda_1 \|\mathbf{A}\boldsymbol{\rho} - \mathbf{g}\|_2^2 + \lambda_2 \|\mathbf{A}^z\boldsymbol{\rho} - \mathbf{g}^z\|_2^2, \tag{6}$$

式中： \mathbf{A}^z 是与 \mathbf{g}^z 对应的正演算子矩阵。此外，还可以在数据拟合函数中加入井中重力数据 \mathbf{g}^b 、井中岩石密度数据 $\boldsymbol{\rho}^d$ ，则有

$$\phi_g = \lambda_1 \|\mathbf{A}\boldsymbol{\rho} - \mathbf{g}\|_2^2 + \lambda_2 \|\mathbf{A}^z\boldsymbol{\rho} - \mathbf{g}^z\|_2^2 + \lambda_b \|\mathbf{A}^b\boldsymbol{\rho} - \mathbf{g}^b\|_2^2 + \lambda_d \|\mathbf{A}^d\boldsymbol{\rho} - \boldsymbol{\rho}^d\|_2^2, \tag{7}$$

其中： \mathbf{g}^b 代表井中重力数据， \mathbf{A}^b 是与 \mathbf{g}^b 对应的正演算子， $\boldsymbol{\rho}^d$ 代表井中岩石密度数据， \mathbf{A}^d 可以看成是与 $\boldsymbol{\rho}^d$ 对应的正演算子，它是一个稀疏矩阵，矩阵每行仅有一个非 0 元素，与取样岩石位置有关，其值为 1。式(7)所示的数据拟合函数加入到目标函数中，可实现不同高度观测面、井中数据的融合反演，通过调整系数 λ_1 、 λ_2 、 λ_b 和 λ_d 的大小可调整不同高度面

观测重力数据、井中重力数据、井中岩石密度数据对目标函数的作用大小；系数越小，相应数据对目标函数影响越小；系数越大，相应数据对目标函数影响越大；当系数为 0 时，相应数据对目标函数不起作用，即相应数据不参与反演过程。

2 模型试验

2.1 模型一：单立方体模型

为了验证不同平面观测重力数据三维反演效果，建立一个立方体模型，如图 1a 所示，立方体模型的大小为 400 m×400 m×400 m，顶面埋深为 300 m，中心位置为(2.5 km, 2.5 m, 0.5 km)，密度差为 1 g·cm⁻³，背景密度为 0。将地下三维空间剖分为 50×50×15 个大小为 100 m×100 m×100 m 的立方体单元，50×50 个观测点位于每个单元的中心。正演计算得到的不同高度观测面的重力数据如图 1b、c、d、e、f 所示。

利用正则化方法反演不同高度面观测重力数据。为了对比反演效果，对于不同高度面的观测重力数据反演，引入相同的密度上下限 (0, 1 g·cm⁻³) 和相同的模型加权函数 $\mathbf{W}=(\mathbf{A}^T\mathbf{A})^{1/2}$ ，其中， \mathbf{A} 表示地面重力数据的正演算子。利用共轭梯度算法迭代求解目标函数最优解，得到的反演结果切片如图 2 所示。观测面高度越高，相应的反演结果越发散；观测面高度越低，相应的反演结果越收敛，且反演结果与理论模型的分布范围、密度值大小越接近。

不同高度面的观测重力数据融合反演结果如图 3 所示。图 3a 与图 2c 相比，由于地面以下 300 m 观测数据的加入，密度分布更收敛，密度值更接近理论密度值；图 3a 与图 2f 相比，由于地面观测数据的加入，压制了异常体两侧的假异常。这初步验证了不同高度面观测重力数据融合反演的良好效果。相比于图 2c，图 3a 显然与图 2f 更接近，说明近源平面数据对反演结果影响更大。图 3b 与图 2b、d 相比，密度分布更收敛，密度值更接近理论密度值，与图 2f 相比，压制了异常体两侧的假异常。这再次验证了不同高度面观测重力数据融合反演的良好效果。图 3c 与图 3b 相比，增加了两个面的观测数据，反演效果并未见明显提高。这说明为保证计算效率，需选择适当、适量平面的观测重力数据进行融合反演，过多的数据将导致计算量增大，但反演效果并没有明显的提高。

仅有一个观测面的重力数据时，可通过延拓技术得到多个不同高度面的延拓重力数据。使用延拓

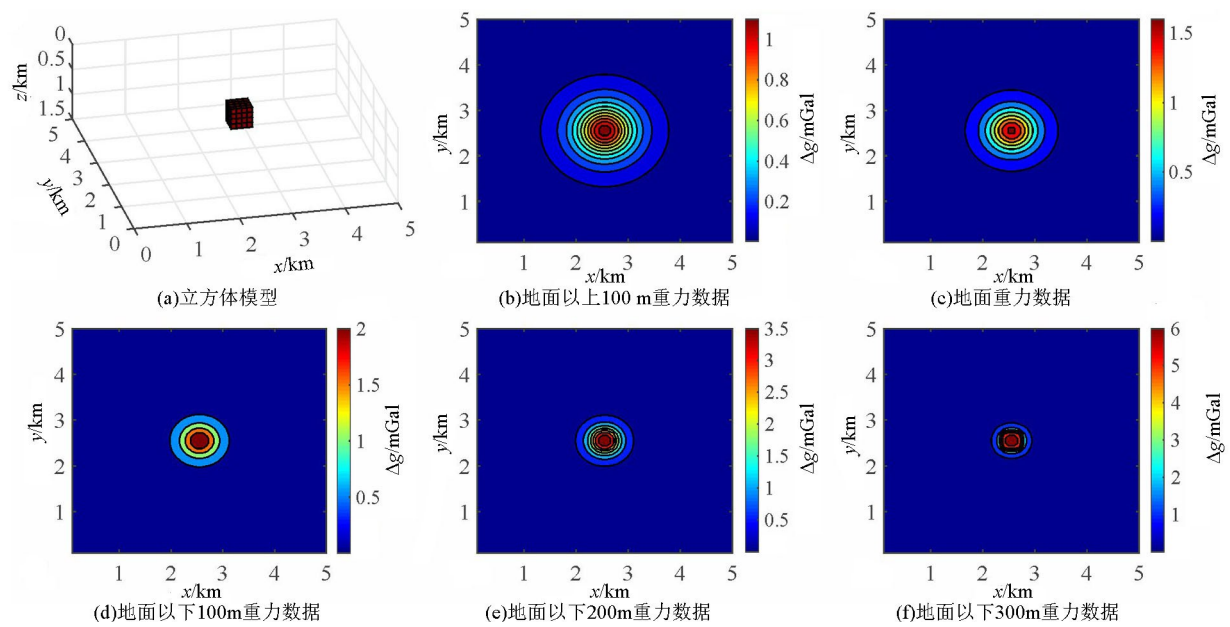


图 1 立方体模型及正演重力数据

Fig.1 Cube model and its forward gravity data

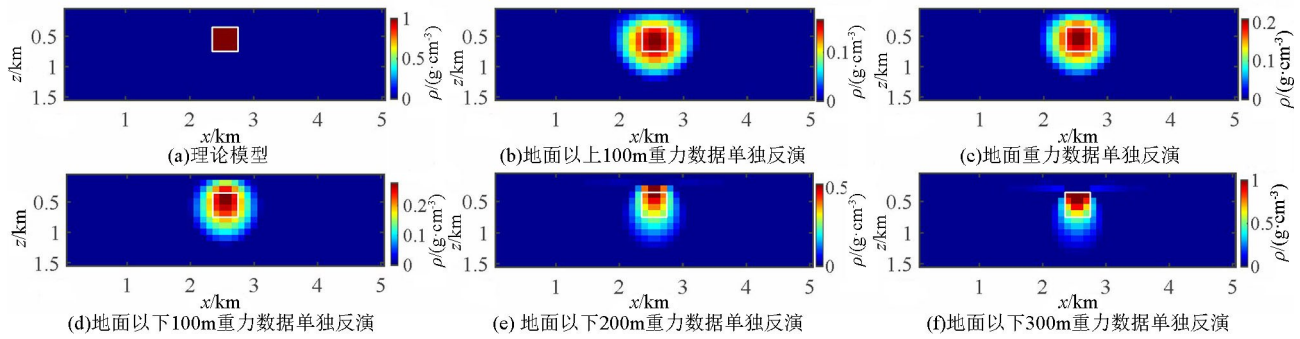


图 2 不同高度面观测重力数据单独反演结果的竖直切片 ($y=2.5\text{ km}$)

Fig.2 Vertical slices of inversion results of gravity data at different heights

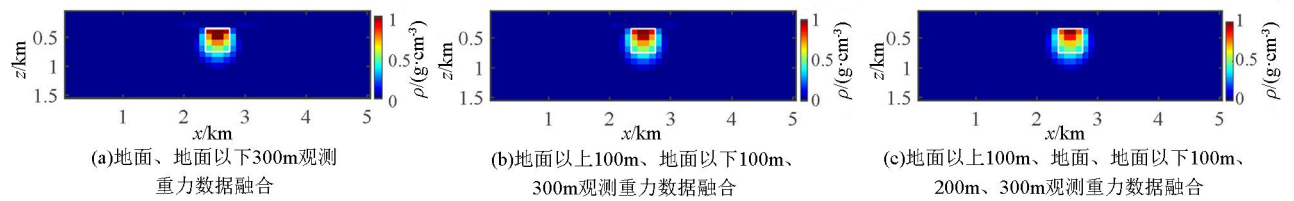


图 3 不同高度面观测重力数据融合反演结果的竖直切片 ($y=2.5\text{ km}$)

Fig.3 Vertical slices of inversion results of joint gravity data at different heights ($y=2.5\text{ km}$)

数据反演需注意几个问题:一是为提高反演效果,使用向下延拓重力数据进行反演,原因是:单个平面重力数据反演验证,观测面高度越低,反演效果越好;二是为保证反演可靠性,下延平面应高于异常体顶面,原因是:穿过或低于异常体的延拓数据不准确,不适合用于反演;三是为了拟合原始观测重力数据,使用延拓数据与原始观测数据融合反演,原因是:向下延拓得到的重力数据存在误差,单独反演延拓数据将导致反演结果可能无法拟合原始观测数据。

观测重力数据及其延拓重力数据融合反演结果如图 4 所示,图 4a 与图 3a 相比,密度分布较发散,密度值较小,这是由于向下延拓数据中存在误差,说明延拓数据不能取代观测数据;与图 2c 相比,密度分布更收敛,密度值更接近真实密度值,反演效果明显提高,这说明,在多平面数据不可得时,延拓数据的加入可提高反演效果。图 4b 与图 3b 相比,密度分布较发散;但与图 2b 相比,反演效果明显提高,再次验证了加入延拓数据的意义。图 4c 与图 4b 对

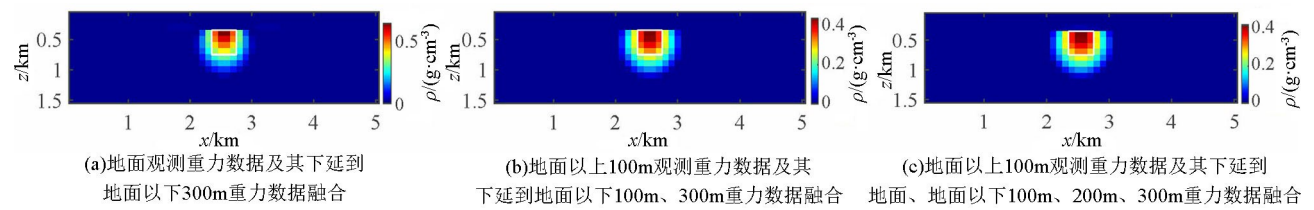


图 4 观测重力数据及其延拓重力数据融合反演结果的竖直切片 ($y=2.5\text{ km}$)

Fig.4 Inverted density models using the joint observed gravity and continuation gravity data ($y=2.5\text{ km}$)

比,反演效果提高并不明显。因此,为保证计算效率,选择适当、适量的延拓数据加入反演是至关重要的,过多的延拓数据导致计算量增大,但反演效果并没有明显提高。

利用单立方体模型验证加入井数据约束对反演效果的影响。模拟设计 3 口竖直井,3 口竖直井分别位于立方体中心、立方体外 100 m、立方体外 300 m,其坐标分别为 $(2.5\text{ km}, 2.5\text{ km})$ 、 $(2.8\text{ km}, 2.5\text{ km})$ 、 $(3.0\text{ km}, 2.5\text{ km})$ 。井中观测重力数据、岩石密度数据如图 5 所示。在地面、地面以下 300 m 重力

数据融合反演中,分别加入 3 口井数据做约束,得到的反演结果如图 6 所示。与图 3a 相比,反演效果明显提高,这说明加入位于立方体中心的井数据做约束可有效改善反演效果;加入位于立方体外 100 m 的井数据做约束对邻近井位的密度分布有一定改善作用,对整体反演结果影响较小;加入位于立方体外 300 m 的井数据做约束对反演结果的影响很小。这说明,井口穿过异常体,能有效改善反演效果;井口距离异常体越远,对反演效果的有益影响越小。

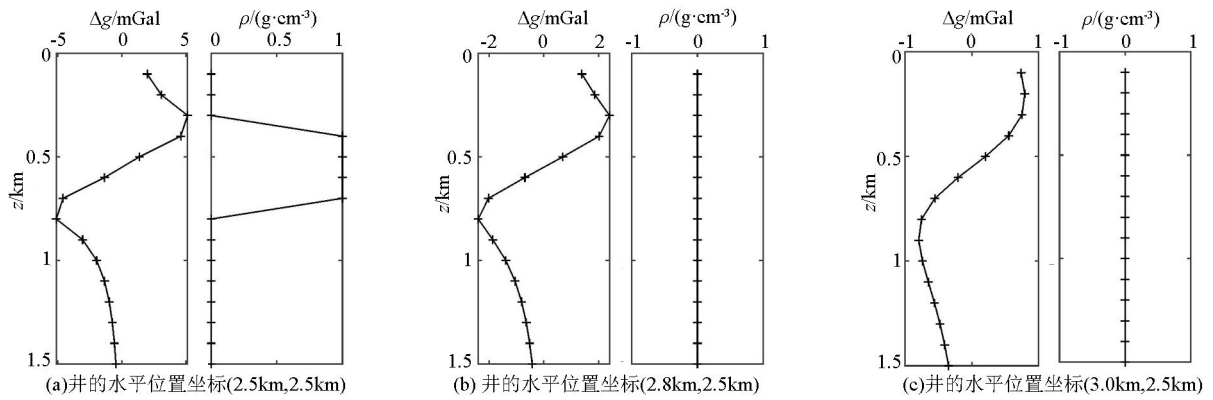


图 5 不同位置井的井中重力和岩石密度

Fig.5 Well gravity and well density at different locations

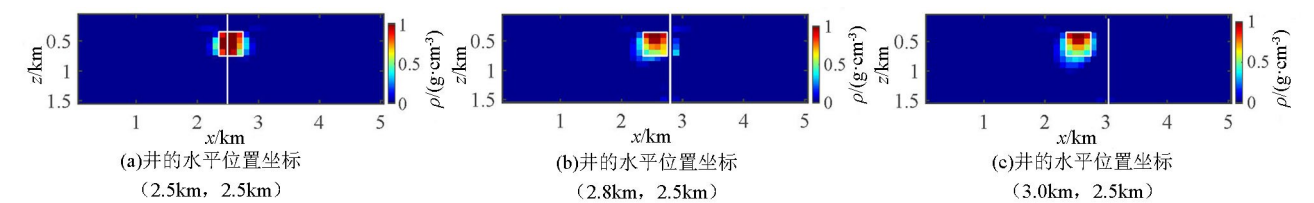


图 6 地面、地面以下 300 m 重力数据和井中重力、岩石密度数据融合反演结果(白色实线代表钻井位置)

Fig.6 Recovered density models in the constraint of well data(the solid white line represents the drilling location)

2.2 模型二:双长方体模型

为进一步验证不同高度重力数据和井数据融合反演的效果,设置不同埋深的双长方体模型,左侧长方体顶面埋深 300 m,中心位置坐标为 $(550\text{ m}, 1\text{ }050\text{ m})$,大小为 $300\text{ m}\times300\text{ m}\times400\text{ m}$,密度为 $1\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,右侧长方体顶面埋深为 500 m,中心位置坐标为 $(1\text{ }350\text{ m}, 1\text{ }050\text{ m}, 700\text{ m})$,其大小、密度与左侧长方体相同。地下空间剖分为 $38\times42\times15$ 个大小为 $50\text{ m}\times50\text{ m}\times100\text{ m}$ 的立方体单元, 38×42 个地面观测数据采样间距为 50 m,井中观测数据采样间距为 50 m。加入 3% 的高斯噪声的正演理论地面重力数据如图 7a 所示,将地面重力数据向下延拓 300 m 得到的延拓重力数据如图 7b 所示。模拟两口竖直井:井 A、井 B,其水平位置分别为 $(550\text{ m}, 1\text{ }050\text{ m})$ 、 $(1\text{ }350\text{ m}, 1\text{ }050\text{ m})$,即位于两个长方体中心,填加 3% 高斯噪声的井中重力、岩石密度数据如图 8 所示。

地面重力数据单独反演结果如图 9b 所示,左侧埋深较浅的异常体中心位置识别准确,右侧埋深较

深的异常体未被有效识别,且无法区分两个异常体,反演结果整体较为发散,分辨率较低。加入向下延

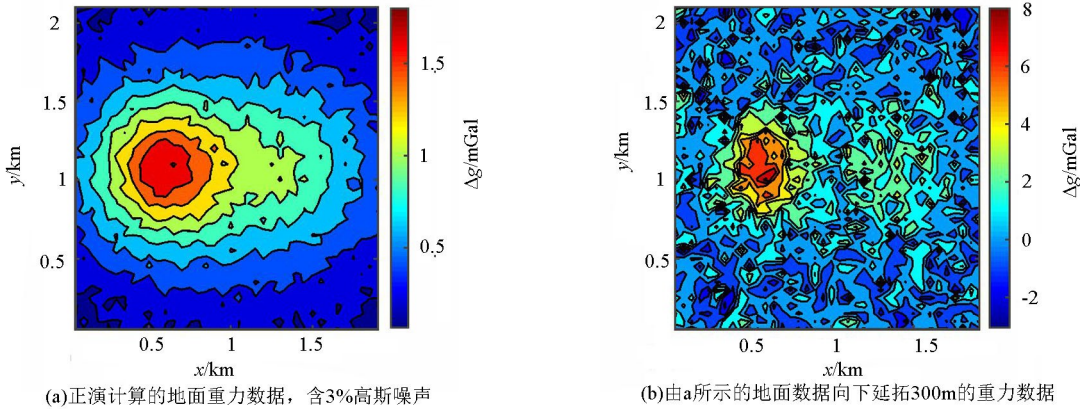


图 7 双长方体模拟重力数据

Fig.7 Gravity data based on double prisms

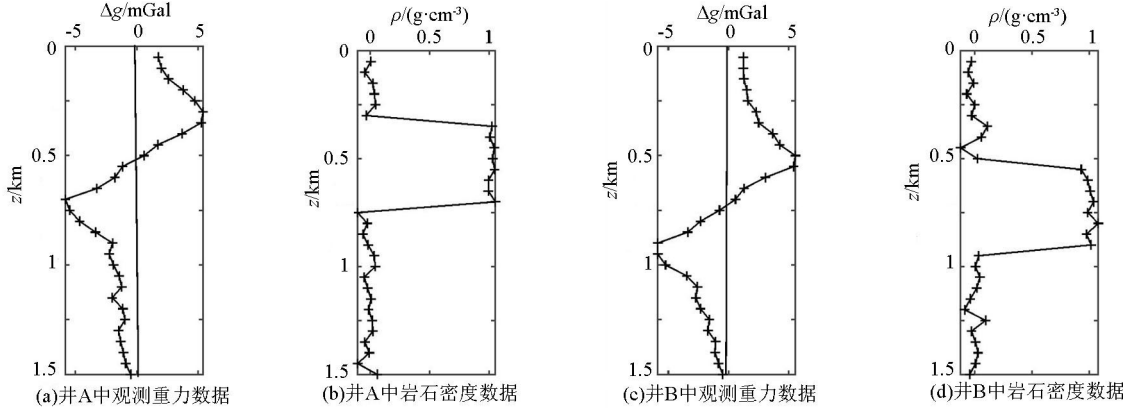


图 8 含 3%高斯噪声的模拟井中观测数据

Fig.8 The simulated data observed in the wells

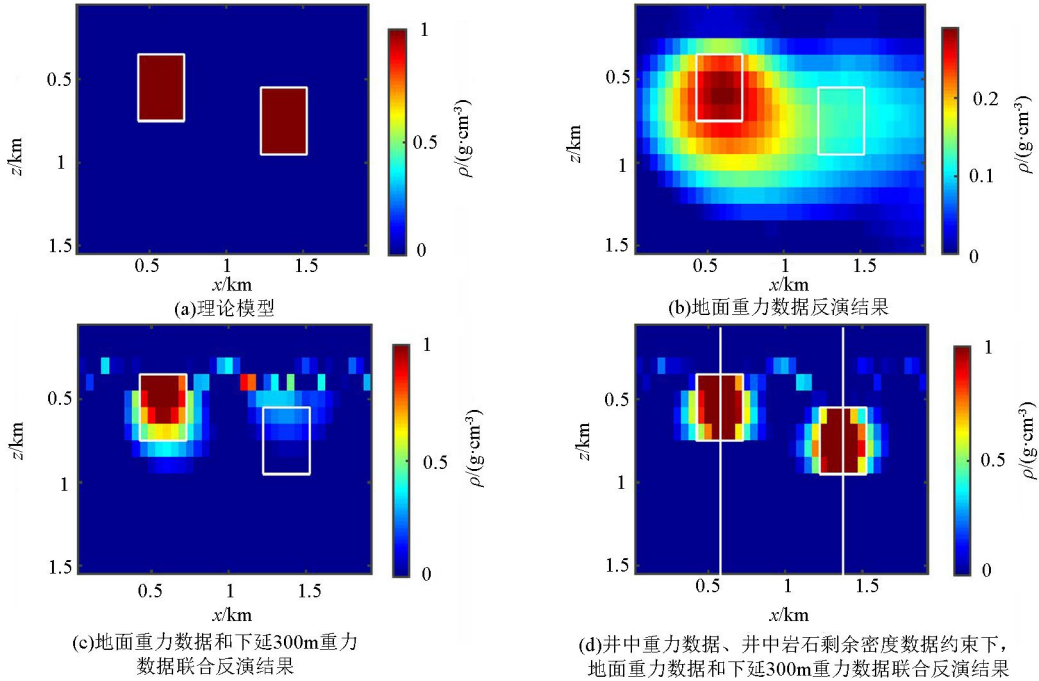


图 9 双立方体模型反演结果 (白色实线代表钻井位置)

Fig.9 Recovered double-prism models (the solid white line represents the drilling location)

拓 300 m 重力数据与地面重力数据融合反演结果如图 9c,与图 9b 相比,左侧异常体中心位置定位准确,且异常体边界清晰,密度值的最大值达到真实值,右侧异常体反演效果仍不理想,且由于下延数据中噪声很大,导致反演结果中也出现了假异常。再加入两口井的井中重力、岩石密度数据约束,反演结果如图 9d,准确定位了两个不同埋深的异常体的中心位置,边界清晰,分辨率高,两个异常体的最大异常值都达到了理论值,与图 9a 所示的理论模型剖面匹配度较高。

3 结论

1) 单一观测面重力数据三维反演效果与测量面高度有关,观测面高度越低(观测面距离异常源越近),反演效果越好。

2) 与单一观测面重力数据反演相比,多个高度面观测重力数据融合反演的效果可得到改善,其中,近源高度面数据比远源高度面数据对反演结果影响大。

3) 过多个观测面的重力数据对反演效果改善不明显,因此,为保证计算效率,应选择适当、适量的观测面的重力数据进行融合反演。

4) 当多个高度面的观测重力数据不可得时,通过向下延拓技术可得到多个平面的延拓重力数据(延拓平面应高于异常体顶面),观测重力数据与向下延拓重力数据融合反演,也可改善反演效果。

5) 井中重力、岩石密度数据约束,可一定程度改善反演效果,改善程度受钻井位置影响明显,穿过异常体的井数据可明显改善反演效果,钻井位置距离异常体越远,对反演效果影响越小。

参考文献(References):

- [1] 曾华霖. 重力场与重力勘探[M]. 北京:地质出版社,1995.
Zeng H L. Gravity field and gravity exploration [M]. Beijing: The Geological Publishing House,1995.
- [2] Blakely R J. Potential theory in gravity and magnetic applications [M]. Cambridge: Cambridge University Press,1996.
- [3] Li Y G, Oldenburg D W. 3-D inversion of gravity data [J]. Geophysics, 1998, 63(1): 109-119.
- [4] 姚长利,郝天珧,管志宁. 重磁反演约束条件及三维物性反演技术策略[J]. 物探与化探, 2002, 26(4): 253-257.
Yao C L, Hao T Y, Guan Z N. Restrictions in gravity and magnetic inversions and technical strategy of 3D properties inversion [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2002, 26(4): 253-257.
- [5] Geng M, Huang D, Yang Q, et al. 3D inversion of airborne gravity-gradiometry data using cokriging [J]. Geophysics, 2014, 79(4): 37-47.
- [6] Last B J, Kubik K. Compact gravity inversion [J]. Geophysics, 1983, 48(6): 713-721.
- [7] Guillen A, Menichetti V. Gravity and magnetic inversion with minimization of a specific functional [J]. Geophysics, 1984, 49(8): 1354-1360.
- [8] Silva. Potential-field inversion: Choosing the appropriate technique to solve a geologic problem [J]. Geophysics, 2001, 66(2): 511-520.
- [9] Sun J J, Li Y G. Adaptive Lp inversion for simultaneous recovery of both blocky and smooth features in a geophysical model [J]. Geophysical Journal International, 2014, 197: 882-899.
- [10] 高秀鹤,黄大年. 基于共轭梯度算法的重力梯度数据三维聚焦反演研究[J]. 地球物理学报, 2017, 60(4): 1571-1583.
Gao X H, Huang D N. Research on 3D focusing inversion of gravity gradient tensor data based on a conjugate gradient algorithm [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2017, 60(4): 1571-1583.
- [11] Sun J J, Li Y G. Inversion of surface and borehole gravity with thresholding and density constraints [C]//80th Annual international meeting, Society of Exploration Geophysicists, Expanded Abstracts, 2010, 1798-1802.
- [12] 陈华根,李嘉斌,吴健生,等. MT-重力模拟退火联合反演研究[J]. 地球物理学报, 2012, 55(2): 663-670.
Chen H G, Li J X, Wu J S, et al. Study on simulated-annealing MT-gravity joint inversion [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2012, 55(2): 663-670.
- [13] Luis A. Gallardo, Max A. Meju. Characterization of heterogeneous near-surface materials by joint 2D inversion of dc resistivity and seismic data [J]. Geophysical Research Letters, 2003, 30(13): 1658.
- [14] 殷长春,孙思源,高秀鹤,等. 基于局部相关性约束的三维大地电磁数据和重力数据的联合反演[J]. 地球物理学报, 2018, 61(1): 358-367.
Yin C C, Sun S Y, Gao X H, et al. 3D joint inversion of magnetotelluric and gravity data based on local correlation constraints [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2018, 61(1): 358-367.
- [15] Zhang C, Huang D N, Wu G C, et al. Calculation of Moho depth by gravity anomalies in Qinghai-Tibet plateau based on an improved iteration of parker-oldenburg inversion [J]. Pure and Applied Geophysics, 2015, 172(10): 2657-2668.
- [16] Fedi M, Hansen P C, Paoletti V. Analysis of depth resolution in potential-field inversion [J]. Geophysics, 2005, 70(6): A1-A11.
- [17] Portnaguine O, Zhdanov M S. Focusing geophysical inversion images [J]. Geophysics, 1999, 64(3): 874-887.
- [18] Fedi M, Rapolla A. 3D inversion of gravity and magnetic data with depth resolution [J]. Geophysics, 1999, 64: 452-460.
- [19] Commer M. Three-dimensional gravity modelling and focusing inversion using rectangular meshes [J]. Geophysical Prospecting, 2011, 59: 966-979.
- [20] 刘双,张大莲,刘天佑,等. 井地磁测资料联合反演及应用[J]. 地质与勘探. 2008, 44(6): 69-72.

Liu S, Zhang D L, Liu T Y, et al. Cooperative inversion and application of surface and borehole magnetic data [J]. *Geology and Prospecting*, 2008, 44(6): 69 – 72.

[21] 周帅. 重磁数据地质目标位置及物性高精度解释方法研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2017.

Zhou S. The study on high-precision interpretation methods of geological target position and physical property for gravity and magnetic data [D]. Changchun: Jilin University, 2017.

A study of joint inversion of gravity data from multi-planes and boreholes

GAO Xiu-He^{1,2,3}, XIONG Sheng-Qing¹, YU Chang-Chun¹, SUN Si-Yuan¹

(1.China Aero Geophysical Survey and Remote Sensing Center for Natural Resources, Beijing 100083, China; 2.Airborne Geophysics and Remote Sensing Geology Ministry of Natural Resources, Beijing 100029, China; 3.School of Geophysics and Information Technology, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100029, China)

Abstract: The essential factor for determining the effect of gravity 3D inversion is the observation data, which include the quality, quantity and location. In this paper, the regularized inversion method is used to study the influence of gravity data from different heights and well observations on the inversion results. First of all, gravity data of different heights are inverted separately to verify the relationship between the inversion effect and the height of the observation surface. Then, the gravity data of different heights are inverted together to verify the improvement effect of the joint inversion. On the basis of the beneficial effects of joint inversion, when multi-plane observation data are unavailable, continuation gravity data at different heights are obtained through continuation technology, and joint continuation data and observation data are inverted to improve the inversion effect. This applies to a variety of situations. For example, when only the ground observation gravity data are available, the down continuation data and ground observation gravity data are inverted jointly; when only the airborne observation gravity data are available, the down continuation data and airborne observation gravity data are inverted jointly. Finally, taking advantage of the fact that the measured data in the boreholes are closer to the anomaly, it is added to the inversion to further improve the vertical resolution.

Key words: different heights; borehole data; gravity; joint inversion; continuation

(本文编辑:王萌)