

低磁纬度磁界面反演

雷文敏, 吴健生

(同济大学 海洋地质国家重点实验室, 上海 200092)

摘要: 指出了低磁纬度地区化极存在的误差, 研究了磁异常数据的模拟退火反演方法, 以立方体单元剖分网格充填磁场参数后模拟磁界面, 同时反演磁界面, 并结合模拟退火非线性算法的特点, 研究易于加入约束条件的、方式灵活的建模方法, 设计磁异常结构较复杂的模型. 通过模型试验和实际资料处理, 验证了该方法的正确性.

关键词: 低磁纬度; 斜磁化; 化极; 模拟退火; 磁界面反演
中图分类号: P 318.4 **文献标识码:** A

Magnetic Interface Inversion at Low Magnetic Latitudes

LEI Wenmin, WU Jiansheng

(State Key Laboratory of Marine Geology, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The error of reduction to pole in the low magnetic latitude area was revealed, and a study was made of study simulated annealing inversion of magnetic data. By subdividing the grid into cube elements and filling them with magnetic field parameters, magnetic interface can be simulated and inversed. In combination with the nonlinear characteristics of simulated annealing algorithm, a study was made of the modeling method with easy and flexible way of adding constraints, and magnetic anomaly model was established with complex structure. Feasibility is proved through model test and field data processing

Key words: low magnetic latitude; oblique magnetization; reduction to the pole; simulated annealing; magnetic interface inversion

我国处于中纬度地区, 磁异常具有斜磁化的特征, 即一个完整的异常总是由正负两部分伴生组成, 且异常

极值与磁体的位置关系比较复杂, 增加了反演和解释推断的困难. 尤其是广阔的南部海域处于磁赤道两侧 $\pm 30^\circ$ 以内的低磁纬度区, 地球磁场是以水平磁化为主的斜磁化条件, 磁性体所产生的磁异常强度 ΔT 是以负异常为主体, 多数伴生两个较弱的正异常. 长期以来, 在定量反演解释^[1]中, 一些成熟的方法大多数都是以垂直磁化磁异常的解释为主, 如磁性界面反演计算等; 对于低磁纬度 ΔT 异常, 若直接使用中高纬度地区斜磁化下的解释方法, 即先化到地磁极, 然后在垂直磁化条件下反演, 无疑误差较大, 甚至得出错误结论.

为了更好解决低磁纬度反演的问题, 许多学者从改造化极因子的角度化极赤道. 化极因子属放大性一类转换因子, 纬度越低, 放大作用越强. 在磁赤道地区, 其放大作用达到极点, 变成无穷大, 无法计算. 在接近低纬度时, 化极结果也很不理想. 在低磁纬度地区 ΔT 异常转换中, 在化极图内, 一是存在条带干扰, 二是有畸变拉长. 为了解决低纬度地区化磁极的不稳定问题, Hansen 和 Pawlowski 提出基于噪声干扰的维纳滤波化极方法, 引进噪声干扰一说, 并将其转化为稳定化极转换的因素, 程序设计与常规化极相仿, 较易实现^[2]. 姚长利等提出的压制因子法, 化极参数物理意义更加直接, 操作更加直接、简单, 但是仍然立足于改造化极因子^[3].

为了研究低磁纬度化极误差的问题, 对长方形凸起界面进行正演和化极. 取 101×81 的网格, 网格间距纵横方向均为 1 km, 长方形凸起界面位于测网中心, 长宽是 $40 \text{ km} \times 20 \text{ km}$, 顶面埋深为 2 km. 基底的磁化强度 $= 0.5 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$, 磁偏角为 0° , 磁倾角为 10° , 平均深度为 1 km.

图 1 和图 2 显示了低磁纬度条件下磁异常的化极处理. 虽然恢复了磁异常的基本形态, 但数值误差很大, 压制因子法误差为 10%, 常规的化极方法误差

收稿日期: 2010-01-27

基金项目: 国家“九七三”重点基础研究发展计划(2007CB4110602); 国家自然科学基金(40674063); 国家“八六三”高技术研究发展计划(2010AA09Z302)

第一作者: 雷文敏(1986—), 女, 博士生, 主要研究方向为综合地球物理. E-mail: min7887@163.com

通讯作者: 吴健生(1961—), 男, 教授, 博士生导师, 理学博士, 主要研究方向为综合地球物理. E-mail: wujiansh@tongji.edu.cn

达26%。尽管在低纬度化极的研究上,已取得不少成果,但化极转换后的磁异常幅值变化较大。这样,对 ΔT 磁异常用化极方式反演,在低磁纬度区域会导致较大误差,故有必要研究低磁纬度磁界面反演方法。

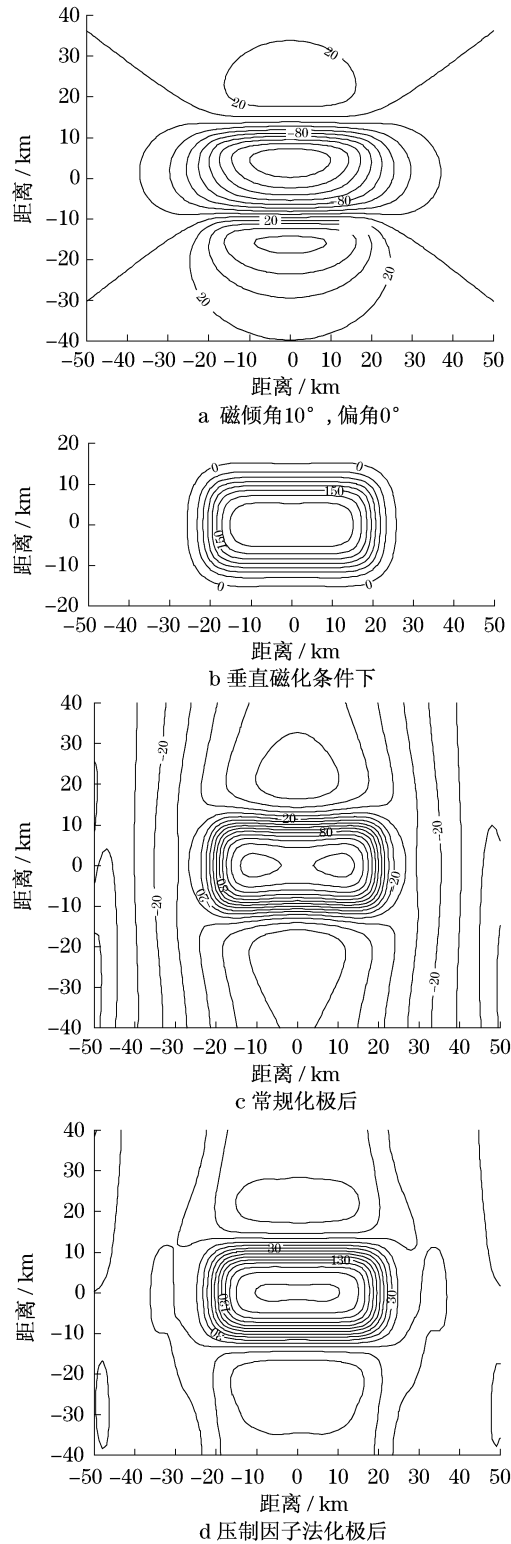


图1 低磁纬度磁异常化极 ΔT

Fig.1 Reduction-to-the-pole at low magnetic latitudes

1 方法原理

1.1 三维磁界面的磁异常正演计算

对于任意形状的界面,可以近似地表示成很多不同磁性的长方体的组合^[4](图3)。长方体排布在参考界面上,长方体的顶深组成磁性界面的深度。用解析方法^[5]计算出所有这些长方体在计算点的磁异常并累加,就得到整个异常界面在计算点的磁异常值。

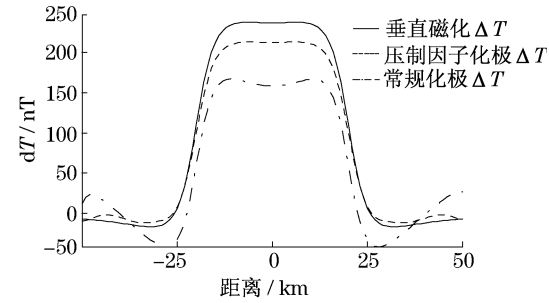


图2 $y=0$ 剖面处不同化极处理结果

Fig.2 Results of reduction-to-the-pole at $y=0$ section

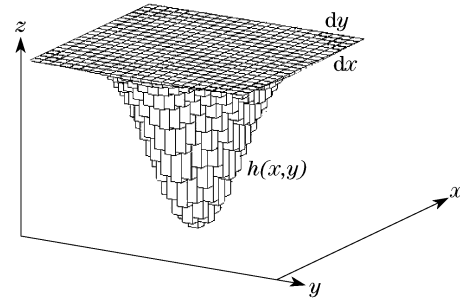


图3 立方体组成磁界面

Fig.3 Magnetic interface composed of cubes

利用引力位与磁位的泊松公式导出磁场的表达式。设 (ξ, η, ζ) 为直立长方体内体积微元的坐标,边界范围为 $\xi_1, \xi_2, \eta_1, \eta_2, H, h(x, y)$, H 为参考界面的深度, $h(x, y)$ 为磁异常界面的深度, I 为磁倾角; D 为磁偏角。磁场的各分量的表达式为

$$\left. \begin{aligned} H_{ax}(x, y) &= \left\{ -J_x \arctan[(\eta - y) \cdot (\zeta - z)/r(\xi - x)] + J_y \ln[r + (\zeta - z)] + J_z \ln[r + (\eta - y)] \right\} \Big|_{\xi_1}^{\xi_2} \Big|_{\eta_1}^{\eta_2} \Big|_H^h \\ H_{ay}(x, y) &= \left\{ J_x \ln[r + (\zeta - z)] - J_y \arctan[(\xi - x)(\zeta - z)/r(\eta - y)] + J_z \ln[r + (\xi - x)] \right\} \Big|_{\xi_1}^{\xi_2} \Big|_{\eta_1}^{\eta_2} \Big|_H^h \\ Z_a(x, y) &= \left\{ J_x \ln[r + (\eta - y)] + J_y \ln[r + (\xi - x)] - J_z \arctan[(\xi - x) \cdot (\eta - y)/r(\zeta - z)] \right\} \Big|_{\xi_1}^{\xi_2} \Big|_{\eta_1}^{\eta_2} \Big|_H^h \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \Delta T(x, y) = & H_{ax}(x, y)\cos(I)\cos(D) + \\ & H_{ay}(x, y)\cos(I)\sin(D) + \\ & Z_a(x, y)\sin(I) \end{aligned} \quad (2)$$

叠加得到观测点上的磁异常为

$$\Delta T(i, j) = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N J_{ij} Q_{ij}, \quad i = 1, 2, \dots, K \quad (3)$$

式中: $\Delta T(i, j)$ 为测点 i, j 的总强度磁异常; M, N 分别为 x, y 方向上微元的个数; K 为测点总数; J_{ij} 为微元的磁化强度, 大小可变而方向不变; Q_{ij} 仅与 i, j 规则体和计算点之间的相对位置有关。

1.2 用模拟退火方法反演 ΔT

模拟退火算法^[6]是基于 Monte Carlo^[7]迭代求解策略的一种随机寻优算法, 出发点是基于物理中固体物质的退火过程与一般组合优化问题之间的相似性. 该算法在某一初温下, 利用具有概率突跳特性的 Metropolis 抽样策略, 在解空间中随机搜索, 伴随温度的不断下降重复抽样过程, 最终得到问题的全局最优解, 即在局部最优解中概率性地跳出并最终趋于全局最优解. 于鹏等采用矩形单元体网格剖分的二度半体组合模型, 模拟任意多层密度界面或形体, 用改进的全局寻优的快速模拟退火算法, 联合反演重、磁力异常, 提高了反演精度并减少了多解性^[8].

磁界面模型正演采用上述立方体组合的方法^[9], 按设定的深度线和沿测点的垂向线剖分矩形网格并充填磁化强度值, 然后正演. 磁异常反演的目标函数为

$$\phi = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \left[1 - \frac{dt_{cal, ij}(\lambda)}{dt_{obs, ij}} \right]^2 \quad (4)$$

式中: M 为测点数; N 为测线数; $dt_{cal, ij}$ 与 $dt_{obs, ij}$ 为第 i, j 个测点上 ΔT 磁力异常的理论计算值与观测值; $\lambda = [J_{11}, J_{12}, \dots, J_{MN}, h_{11}, h_{12}, \dots, h_{M-1, N}]^T$, 为模型的参数矢量; J_{ij} 为单元的磁化强度; h_{ij} 为第 i, j 个立方体的顶深.

利用模拟退火算法的磁异常反演流程见图 4.

2 理论模型试验

2.1 简单模型

设计如图 5 的模型, 由 3 个向上突起部分组成, 模拟低磁纬度地区起伏的地下磁异常界面. 取 64×64 的网格, 网格间距沿纵横方向均为 2 km. 基底的磁化强度 $= 0.5 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$, 磁偏角为 0° , 磁倾角为 10° , 平均深度为 2 km.

图 6 为正演结果. 将磁异常 ΔT 模拟退火反演, 得到图 7 的结果. 由图可见, 反演结果与模型形态和位置相符. 表 1 列出的数据为图 7 测线处反演结果

与模型数据的比较, 相对误差均在 0.05% 以下. 低磁纬度磁异常反演方法在起伏界面上获得满意效果, 说明低磁纬度的磁界面用 ΔT 数据反演是可行的.

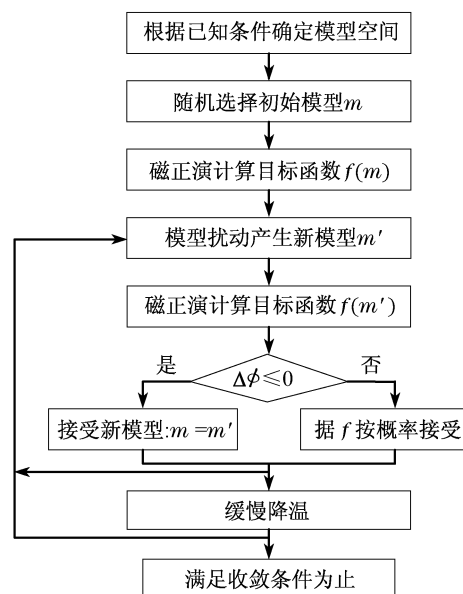


图 4 磁异常数据模拟退火反演流程图

Fig.4 Flow chart of magnetic inversion using VFSA algorithm

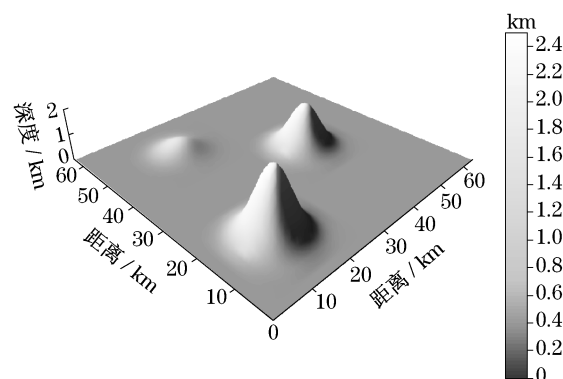


图 5 凸起界面模型

Fig.5 Convex interface model

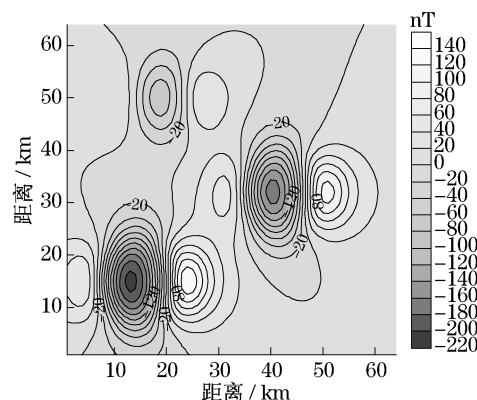


图 6 凸起模型的磁异常 ΔT

Fig.6 ΔT of convex interface model

2.2 复杂模型

将此方法应用于一个复杂的起伏的磁界面模型(图 8a),将其表示为界面的等值线图(取自文献[10]中模型的一部分),如图 8b. 取 21×21 的网格,网格间距为 5 km. 同样,其基底磁化强度差为 $0.5 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$,磁偏角为 0° ,磁倾角为 10° ,平均深度为 5 km.

表 1 反演结果与模型数据比较

Tab.1 Comparison of results of joint inversion and model

模型数据/km	反演结果/km	二者相对误差与绝对值之比/%
1.491 25	1.491 49	0.006
1.681 38	1.680 91	0.028
1.750 00	1.750 84	0.048
1.681 38	1.681 01	0.022
1.491 25	1.490 67	0.039
1.220 93	1.221 04	0.009

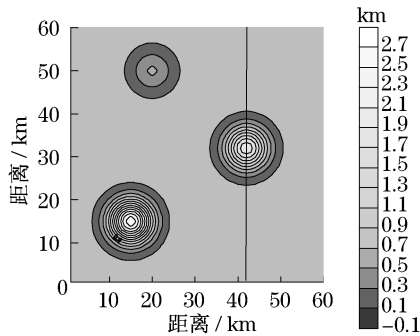


图 7 反演结果
Fig.7 Result of inversion

根据 8a 模型反演,得到如图 8d 的结果.可以看出,反演所得到的界面形态与所给定的模型基本相同.这说明,用磁异常 ΔT 反演对于复杂模型较为适应.但是在起伏较剧烈的地方,如图 8b 中间等值线圈闭之处,反演结果不够精确.

3 实际数据处理

南海北部陆缘属于低磁纬度地区.结合南海东北部中生界基底界面的反演,选取其中某区块作为本方法的试验区.图 9a 为该区小波分解处理后的磁异常等值线图.结合地震资料分析,认为这一磁异常是由基底与上层沉积层的分界面所引起.取磁化强度为 $180 \times 10^{-3} \text{ A} \cdot \text{M}^{-1}$,计算得到如图 9b 的基底深度等值线图,界面深度范围为 5~7 km.反演出的结果大体趋势与磁异常的表现是相符的,界面起伏主要为东北部和西部的浅埋区与北部和南部的深埋区,东南部存在 7 km 的深埋区.

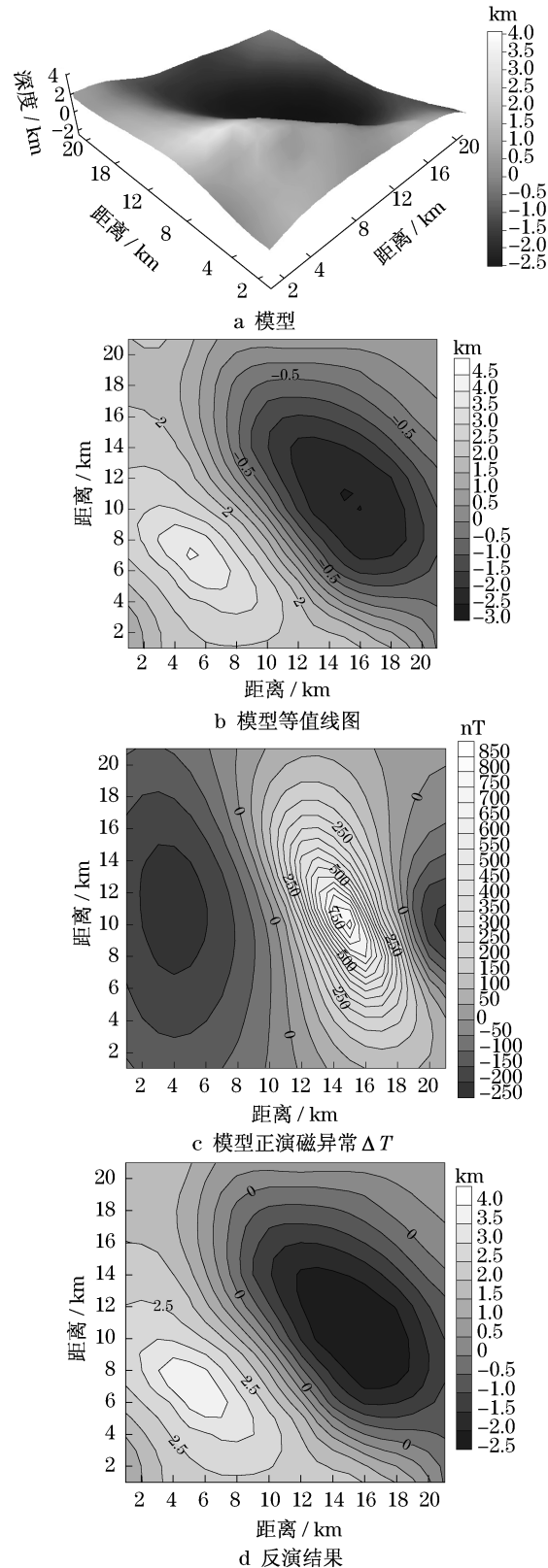


图 8 复杂模型试验
Fig.8 Test of complicated model

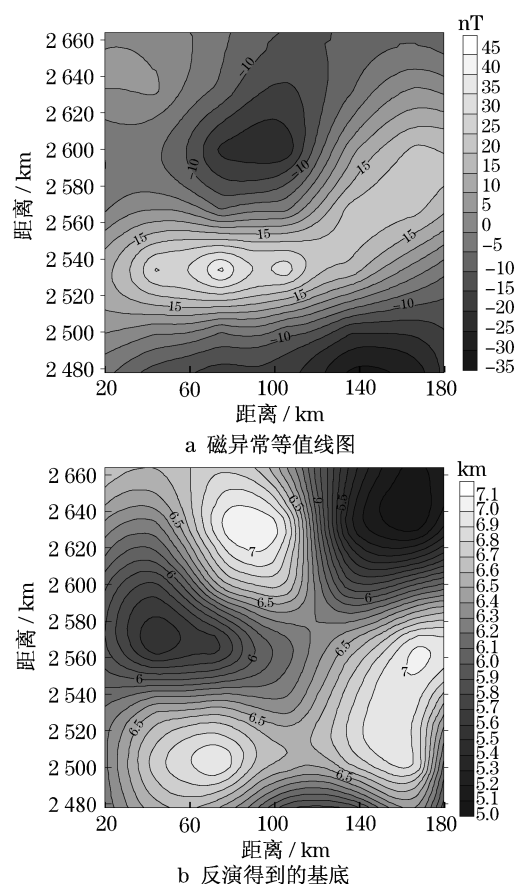


图9 南海某区块实际资料处理

Fig.9 Field data processing in a zone of South China Sea

4 结语

常规的低磁纬度磁异常反演主要采用磁化方向转换的方法,将低磁纬度区的磁异常强度 ΔT 异常形态转换成垂直磁化的 ΔT 异常,然后使用垂直磁化磁异常反演解释.这是一条简捷途径.但是对磁化方向转换运算中产生的干扰与畸变,改善措施有限.这给低磁纬度磁界面反演带来较大的影响.将低磁纬度区的实测 ΔT 异常直接反演,可更好地确定磁界面深度和位置的精度.此方法不论在简单模型还是复杂模型中均取得了较好效果.理论和实践表明,模拟退火反演法适应性很强,受条件限制小,可获得满意的解集.本方法还存在计算效率不高、加入先验信息和约束条

件较困难等不足,有待进一步研究解决.

参考文献:

- [1] 杨文采. 地球物理反演的理论与方法[M]. 北京:地质出版社,1997.
YANG Wencai. Theory and method of geophysical inversion [M]. Beijing:Geology Press,1997.
- [2] Hansen R O, Pawlowski R S. Reduction to the pole at low latitudes by wiener filtering[J]. Geophysics,1989,54:1607.
- [3] 姚长利,管志宁,高德章,等. 低磁纬度磁异常化极方法:压制因子法[J]. 地球物理学报,2003,46(5):690.
YAO Changli, GUAN Zhining, GAO Dezhong, et al. Reduction-to-the-pole of magnetic anomalies at low latitude with suppression filter[J]. Chinese Journal of Geophysics,2003,46(5):690.
- [4] 管志宁. 地磁场与磁力勘探[M]. 北京:地质出版社,2005.
GUAN Zhining. Geomagnetic field and magnetic exploration [M]. Beijing:Geology Press,2005.
- [5] 郭志宏,管志宁,熊盛青. 长方体 ΔT 场及其梯度场无解析奇点理论表达式[J]. 地球物理学报,2004,47(6):1131.
GUO Zhihong, GUAN Zhining, XIONG Shengqing. Cuboid ΔT and its gradient forward theoretical expressions without analytic odd points[J]. Chinese Journal of Geophysics,2004,47(6):1131.
- [6] 师学明,王家映. 模拟退火法[J]. 工程地球物理学报,2007,4(8):165.
SHI Xueming, WANG Jiaying. Simulated annealing method[J]. Chinese journal of engineering geophysics,2007,4(8):165.
- [7] Metropolis N, Rosenbluth A, Rosenbluth M, et al. Equation of state calculation by fast computing machines[J]. Chem Phys, 1953,21:1087.
- [8] 于鹏,王家林,吴健生. 二度半长方体组合模型的重力模拟退火反演[J]. 地球物理学报,2007,50(3):882.
YU Peng, WANG Jialin, WU Jiansheng. An inversion of gravity anomalies by using a 2.5 dimensional rectangle gridded model and the simulated annealing algorithm[J]. Chinese Journal of Geophysics,2007,50(3):882.
- [9] 陈华根,吴健生,王家林,等. 剖面叠置思想在地球物理反演建模中的应用[J]. 同济大学学报:自然科学版,2003,31(11):1309.
CHEN Huagen, WANG Jialin, WU Jiansheng, et al. Section overlay and its application in geophysical inversion modeling [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2003, 31(11):1309.
- [10] Pilkington M. Joint inversion of gravity and magnetic data for two-layer models[J]. Geophysics,2006,71(3):35.