

可视化动态编辑在重力模拟退火反演中的应用

陈华根, 李嘉虢, 许惠平, 覃如府

(同济大学 海洋地质国家重点实验室, 上海 200092)

摘要: 以重力模拟退火反演为例对传统模式进行改造, 引进可视化动态编辑技术, 实现建模、参数设置和计算结果的“透明化”, 为在综合先验约束信息条件下进行精细反演, 监测反演状态, 适当干预反演, 提高反演合理性提供了一种方法。

关键词: 可视化; 动态编辑; 模拟退火算法; 重力反演; 全局寻优

中图分类号: TP301.6

文献标识码: A

Application of Visualized Dynamic Editing Technology in Gravity Simulated Annealing Inversion

CHEN Huagen, LI Jiaxiao, XU Huiping, QIN Rufu

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

Abstract: Taking gravity simulated annealing as an instance, traditional method was modified. And the process of transparent modeling, parameter setting and calculating with visualized dynamic editing technology was realized. Inversion status could be monitored and rationality could be judged with comprehensive information. Editing inversion result properly provided a solution to reducing ambiguity of inversion.

Key words: visualization; dynamic editing; simulated annealing algorithm; gravity inversion; global optimization

地球物理反演问题不可避免存在多解性, 反演结果是在某种条件下的最优解。因此, 即便是最优解, 也需要经过地质及钻探等综合信息验证, 才能说明反演结果是否符合实际。反演不可能完全避免多解性, 但可以通过采用非线性反演算法并结合可靠的反演策略、综合多种信息增加约束等手段来降低反演结果多解性的影响。

非线性算法虽然复杂, 但能更好的描述和解决实际问题, 因此也成为解决反演问题的重要手段和必然趋势^[1-3]。与此同时, 随着计算机技术的发展, 对反演结果的表达也有更高的要求。由于人对图形认识方便而直观, 对反演研究的可视化表达不应仅限于反演结果, 更应该是对整个过程的可视化表达。这是实时监督反演过程甚至干预反演, 提高反演效率和精度的有效手段。近年来, 可视化动态编辑技术的相关研究大多集中在计算机图形学和三维设计方面^[4-9], 针对地球物理反演领域的研究较少。

本文采用相对简单的重力场模型与模拟退火 (Simulated Annealing, 以下简称 SA) 算法相结合的方式, 对可视化动态编辑技术在反演问题中的应用进行初步研究。已经有相关研究^[10-17]对 SA 算法原理及其与重力场结合反演进行了详细论述, 在此基础上, 本文根据重力场反演特点, 初步实现了可视化建模及参数设置, 基本实现了对反演结果的可视化评判及动态修正, 并针对研究过程中发现的问题提出若干建议。

1 GSA 算法

SA 算法具备出色的全局寻优能力以及良好的稳定性和实用性, 已有很多研究论证了该法在地球物理反演及其他应用中的有效性^[18-21]。与其他非线性算法一样, SA 算法在地球物理反演中的研究主要集中在两个方面: 一是提高算法效率; 二是提高反演结果的合理性。

提高算法效率方面, 已有研究^[22-23]结合不同地球物理场的特点对 SA 算法本身进行改进, 取得了一定成果。本文旨在以正确合理的地质思想为前提, 为研究人员提供一种可视化合理建模、参数设置和

收稿日期: 2010-12-04

基金项目: 极地科学战略研究基金(20080101); 中国深部探测技术与实验研究专项(SinoProbe-08-02)

第一作者: 陈华根(1968—), 男, 副教授, 工学博士, 主要从事 GIS 与地球物理反演研究。E-mail: huagen_chen@tongji.edu.cn

通讯作者: 李嘉虢(1986—), 男, 硕士生, 主要从事 GIS 与地学可视化研究。E-mail: michael_9hu@yahoo.com.cn

反演监督的解决方案,从而提高反演结果合理性.

本文首先将改进的 SA 算法^[22]应用于重力场数

据反演,编程实现了重力模拟退火(GSA)算法.其算法流程见图 1.

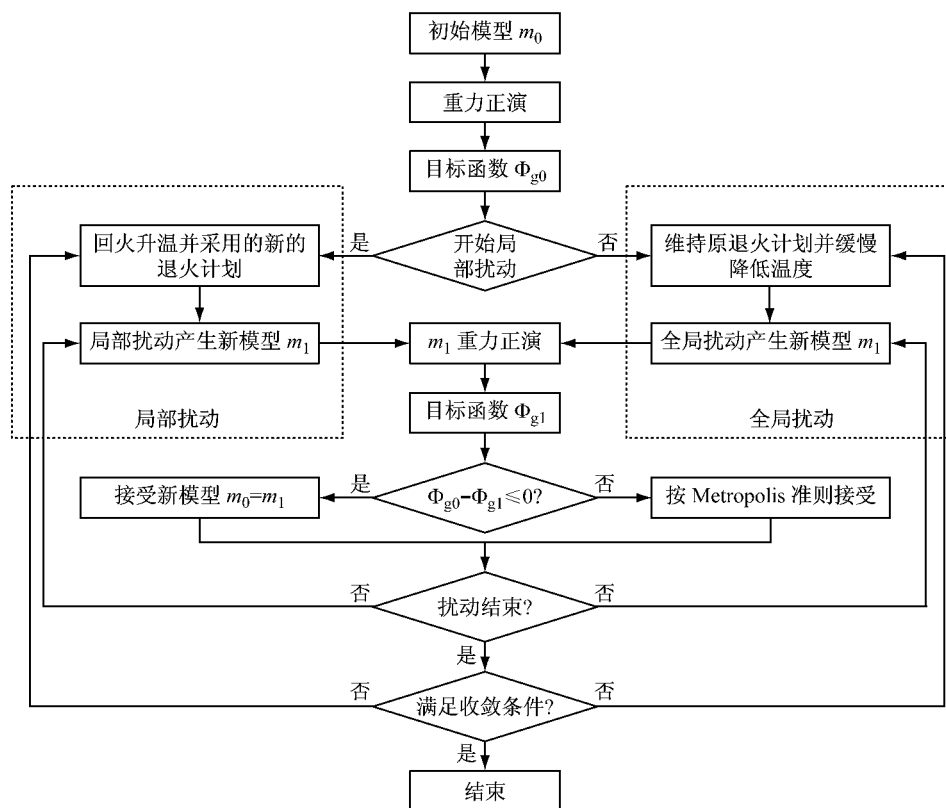


图 1 GSA 算法流程图

Fig.1 GSA algorithm flow chart

如图 1 所示,将改进的 SA 算法应用于重力反演研究,需要对扰动后的模型进行正演并计算目标函数,以此作为进行全局扰动或局部扰动的依据,并根据收敛条件(如迭代次数、温度参数等)判断反演是否结束. GSA 算法采用的目标函数是

$$\Phi_g = \sum_{i=1}^M (1 - \frac{g_i^{\text{cal}}}{g_i^{\text{obs}}})^2 / M$$

式中: g_i^{cal} 和 g_i^{obs} 分别为重力的正演值和实测值; M 为测点数.

2 可视化动态编辑技术与 GSA 算法相结合

GSA 算法对效率有了很大的改进,但对于解决多解性问题尚有不足,具体分析至少存在三个问题:设计模型与实际情况有偏差或反演参数设置不合理;反演过程如扰动过程可能产生了偏差;不能及时综合评判反演结果,更无法在反演过程中进行干预.

若能突破传统的非可视的反演过程,并引入可视化动态编辑技术,将有可能解决上述困扰. 因此参

照 GSA 算法的流程,对以下环节进行了可视化动态编辑技术的引进:将传统方法中以数据表达的设计模型改为图形方式,因此在反演之前可以以图形方式对设计模型进行修改和编辑,同时算法的相关参数也可根据需要进行调试;在图形界面中进行重力场正演和反演计算,反演结果在图形界面中实时显示,在综合信息的约束下进行动态修正或重新反演.

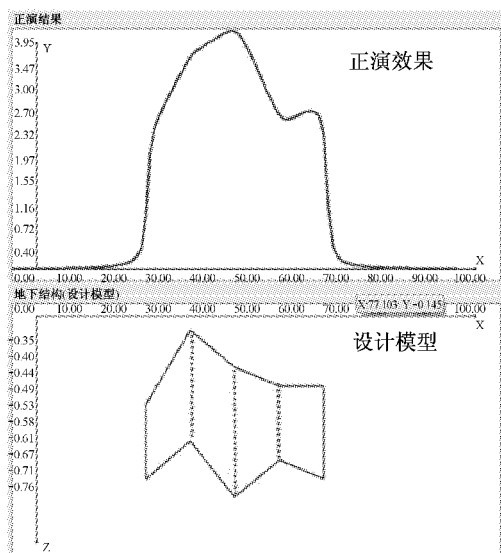
程序实现以 C# 作为编程语言,利用 GDI+ 技术^[24-25]实现可视化与动态编辑功能,实现过程分为可视化建模与正演,反演计算及可视化,反演结果动态编辑修正三个步骤.

3 具体方法实现

3.1 可视化建模与正演

采用构建垂直侧边梯形组合模拟地质体的方法建模,将复杂的地质体结构分解为具有 4 个角点的梯形单元组合,只需按顺序连接角点即可完成对地质体模型的可视化表达. 如图 2a 所示的设计模型,虚线将其分成 4 个垂直侧边梯形. 分别记录每个梯

形单元,再对其进行整合,便可用来模拟一个不规则的地质体.依据各种地质和地球物理信息的有机综合,这种对地质体的抽象可以很好的模拟地质界面上起伏的特征,同时便于设计模型的可视化参数设置,见图 2b.



a



b

图 2 可视化综合信息建模

Fig.2 Visualized comprehensive information modeling

尽管采用动态编辑方式所建立的模型比较复杂,但模型正演计算时还是采用了分割成垂直侧边梯形单元进行计算后再累加重力场值的方法,由此把复杂问题简单化.为了便于研究,选择二度半长方体组合模型^[16,26]模拟地下构造进行试验,以便以后向更复杂的模型深入.

如果直接采用野外实测重力场数据,将无法验

证可视化动态编辑技术与 GSA 算法结合的正确性.因此采用模型正演得到的重力场曲线模拟野外实测重力场数据.在可视化动态编辑建立模型基础上,设定地下密度体的物性参数(密度差),求取空间任意点的重力场值(模拟实测重力场值),并将计算结果实时可视化表达出来,便得到设计模型的正演结果,如图 2a 所示,为下一步 GSA 反演算法做好准备.

3.2 反演计算及可视化

根据图 1,整个反演分为全局扰动和局部扰动两个部分,其目的是:充分利用模拟退火算法中的有效机制进行模型扰动和 Metropolis 准则跳出局部最小进行全局寻优,在退火温度降低到一定程度时使模型状态落到最优模式区间内;模型落到最优模式区间后进行局部搜索,使其有效快速收敛到精确结果.这样的好处是既在反演前期充分借助了模拟退火算法的全局寻优能力,又在反演后期对最优模式进行快速“抛光”.反演过程的参数设置如图 3 所示.

下面用伪码形式描述反演过程:

//GSA 函数

private array GSA(model design)

{

GSA core algorithm;

return inversion result;

}

//反演过程

private array Inversion()

{

parameters setting;

establish model Design;

return GSA(Design);

}

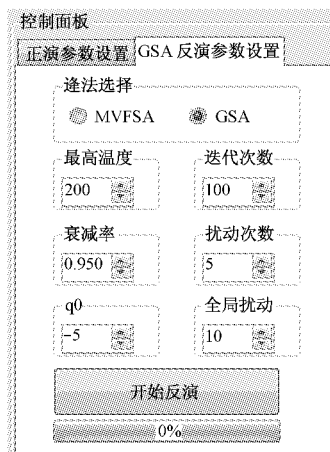
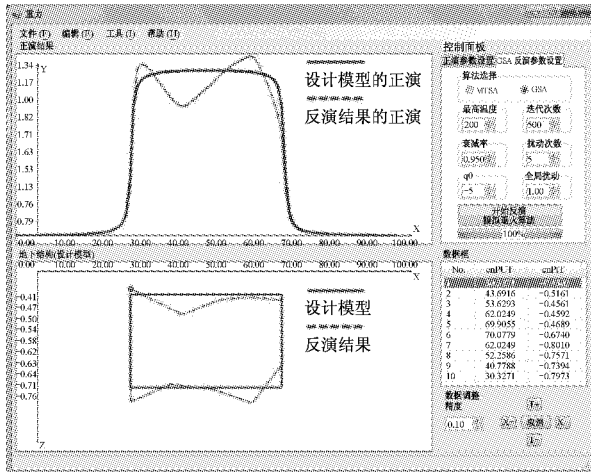


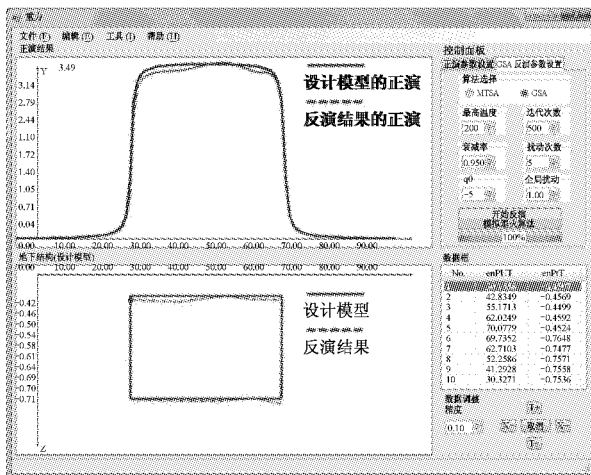
图 3 GSA 反演参数设置

Fig.3 Parameters of GSA inversion

计算返回的结果是一个数列,该数列记录了与设计模型对应的各角点的反演结果.将此结果利用图 2a 中的方法进行可视化表达,即完成了反演计算及可视化,见图 4.



a 修正前



b 修正—反馈后

图4 反演结果可视化与动态编辑示意图

Fig.4 Visualization and dynamic editing of inversion result

3.3 反演结果动态编辑修正

GSA 算法虽然有很好的稳定性,但是由于重力场本身的特点使得反演结果无法避免扰动过程的随机性和不确定性,造成反演结果不合理,比如反演后目标函数虽然符合反演结束的判别准则,但反演界面呈现与实际地层界面不符的锯齿状起伏,如图 4a.因此对反演结果要进行不断修正、反馈,直至满意的方式,这符合反演中“多次修改,多次反馈”的原则.

修正—反馈的原则是保证模型及反演结果尽量符合地质思想的宏观指导和各种反演所需的约束条件,这也是通过可视化动态编辑方式进行重力模拟退火反演的最基本前提.该原则具体体现为:地下模

型以可视化动态编辑的方式进行调整,同时实时进行重力正演,实时计算、显示模型调整后的重力场曲线,实时进行正演曲线与实测曲线比较,并且以地球物理、地质的基本原理和客观实际情况作为约束条件.该原则可以保证调整后的模型既符合实际情况,又符合反演所要求的目标函数判断准则,使反演与正演实现联动.

对于不理想的反演结果甚至可以在动态编辑修正的基础上,重新进行模拟退火反演,可视化动态编辑技术为“多次修正,多次反馈,多次反演”奠定了技术基础.下面用伪码形式描述动态编辑过程:

```
//判定反演结果是否符合要求
private bool isInversionOK ( array
inversionResult)
{
    set rules to judge inversion result;
    return judge inversionResult;
}

//动态编辑与重新反演
private array dynamicEdit ( array
inversionResult)
{
    while(! isInversionOK(inversionResult))
    {
        If(edit under constraints)
        {
            Set inversionResult as new design
            model;

            inversionResult = Inversion
            (inversionResult);
        }
    }

    return inversionResult;
}
```

重新反演过程只针对用户进行过调整的点位及周边点位进行重新反演,这样不仅能保证其他点位的反演结果,同时也可以减少运算量,提高反演效率.

3.4 实现效果

通过以上对基础理论的准备和关键问题的解决,初步实现了基于可视化动态编辑技术的重力模拟退火反演.为突出反演效果,设计模型采用规则的二度半长方体组合模型,图 4 给出了此次研究的反演效果以及经过动态编辑后的效果.

传统方法得到如图 4a 所示结果是通过一系列数据表达的,具有两个主要缺点:一是无法直观评判反演结果是否完全符合实际情况,即图 4a 两条正演曲线是否吻合;二是若对反演结果不满意,需要调整参数重新反演,且不能保证重新反演结果的准确性.本文根据正演曲线的差异,在综合先验信息的约束条件控制下通过对反演结果进行适当修正,使两条正演曲线逐步吻合,与此同时,反演结果也逐渐逼近设计模型,见图 4b.在这个过程中,约束条件是目标函数的判别准则始终保持一致,且反演结果的垂直侧边梯形各点位要符合客观事实.如果认为图 4b 的结果还不够合理,可以以修改过的反演结果为设计模型,重复反演过程,以这样的可视化方式执行多次修改与反馈,直到得到满意的反演结果为止,这是减少反演多解性及提高反演解合理性的具体表现.

上述过程在可视化基础上实现了对反演结果进行合理修正—反馈—再反演.尽管模拟退火算法具有全局寻优功能,但结合到重力场单靠算法本身是不够的,因此必需通过研究人员在综合各种地学信息的基础上进行综合专业评判,而可视化动态编辑技术的引入使得这样的专业评判成为可能.

4 结 语

可视化动态编辑思想在本文中主要体现在反演前的建模和反演后对结果多次修正—反馈—再反演.建模需要以正确的地质思想指导为前提,在综合各种已知约束的前提下,建立符合实际情况的设计模型并设定反演参数;反演后可视化实时显示反演结果,此时动态编辑技术主要用于对反演结果综合评判、合理修正及重新反演.虽然没有实现整个反演迭代计算过程的“透明化”,但实际上已经通过可视化动态编辑技术和 GSA 算法的有机结合,充分发挥了 SA 算法本身全局寻优的功能,模型试验表明如果在充分结合先验约束信息的基础之上对反演进行干预,对减少反演问题多解性将是可行且有效的.

综合非线性及地球物理场特点,认为在以下方面还需进一步研究:

(1)对于复杂的地球物理场,正演计算时间较长,因此要使算法走向实际,需要建立更灵活、更接近实际但相对简化的地质体建模方法.符合实际但相对简化的模型只有在综合各种地学信息下取得,可视化动态编辑技术是其有效的手段.

(2)在目前研究基础上,结合地球物理、地质等

专业知识,并在计算机硬件允许的条件下实现反演迭代计算过程“透明化”,并在计算过程中发现不合理时能够及时干预,从而缩短取得合理反演结果的时间,避免反演问题的多解性.

参考文献:

- [1] 王家映. 地球物理反演问题概述[J]. 工程地球物理学报, 2007, 4(1): 1.
WANG Jiaying. Introduction to geophysical inverse problems [J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2007, 4(1): 1.
- [2] 杨文采. 非线性地球物理反演方法: 回顾与展望[J]. 地球物理学进展, 2002, 17(2): 255.
YANG Wencai. Non-linear geophysical inversion methods: review and perspective [J]. Progress in Geophysics, 2002, 17(2): 255.
- [3] 杨文采. 评地球物理反演的发展趋向[J]. 地学前缘, 2002, 9(4): 389.
YANG Wencai. A perspective to development of geophysical inversions [J]. Earth Science Frontiers, 2002, 9(4): 389.
- [4] Rougvié M, Olivier P. Dynamic editing methods for interactively adapting cinematographic style [C] // Adjunct Proceedings of the 5th European Conference on Interactive TV (Doctoral Consortium), Amsterdam: EuroITV, 2007: 304—308.
- [5] Jan Oliver Wallgrün. Voronoi graph matching for robot localization and mapping [J]. Lecture Notes in Computer Science, 2010, 6290: 76.
- [6] Jack Jansen, Pablo Cesar, Dick C A Bulterman. A model for editing operations on active temporal multimedia documents [C] // Proceedings of the 2010 ACM Symposium on Document Engineering, New York: ACM 2010: 87—96.
- [7] 郑然, 张国峰, 戴树岭. 具有动态编辑功能的视景仿真平台的开发[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(5): 1229.
ZHENG Ran, ZHANG Guofeng, DAI Shuling. Development of scene simulation platform with online edit ability [J]. Journal of System Simulation, 2008, 20(5): 1229.
- [8] 李勇, 徐昆. 三维物体表面材质实时编辑[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2009, 21(9): 1238.
LI Yong, XU Kun. Real-time surface material editing of 3D objects [J]. Journal of Computer-aided Design & Computer Graphics, 2009, 21(9): 1238.
- [9] Wikipedia. Scalable vector graphics [EB/OL]. [2011-04-10]. http://en.wikipedia.org/wiki/Scalable_Vector_Graphics.
- [10] Ingber L. Very fast simulated annealing [J]. Math Compute Modeling, 1989(12): 967.
- [11] Arts E, Korst J. Simulated annealing and boltzmann machine [M]. New York: Wiley & Sons, 1989.
- [12] 陈华根, 吴健生, 王家林, 等. 模拟退火算法机理研究[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2004, 32(6): 802.
CHEN Huagen, WU Jiansheng, WANG Jialin, et al. Mechanism study of simulated annealing algorithm [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2004, 32(6): 802.

- [13] 师学明,王家映. 地球物理资料非线性反演方法讲座(三)—模拟退火法[J]. 工程地球物理学报, 2007, 4(3): 165.
SHI Xueming, WANG Jiaying. Lecture on non-linear inverse methods in geophysics (3)—simulated annealing method [J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2007, 4(3): 165.
- [14] 于鹏,王家林,吴健生,等. 重力与地震资料的模拟退火约束联合反演[J]. 地球物理学报, 2007, 50(2): 529.
YU Peng, WANG Jialin, WU Jiansheng, et al. Constrained joint inversion of gravity and seismic data using the simulated annealing algorithm [J]. Chinese J Geophys, 2007, 50(2): 529.
- [15] 杨辉,王家林,吴健生,等. 大地电磁与地震资料仿真退火约束联合反演[J]. 地球物理学报, 2002, 45(5): 723.
YANG Hui, WANG Jialin, WU Jiansheng, et al. Constrained joint inversion of magnetotelluric and seismic data using simulated annealing algorithm [J]. Chinese J Geophys, 2002, 45(5): 723.
- [16] 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 J Geophys, 2007, 50(3): 882.
- [17] 陈永杰,于鹏. 大地电磁、地震与重力资料综合反演在徐闻地区的应用[J]. 勘探地球物理进展, 2005, 28(4): 271.
CHEN Yongjie, YU Peng. Application of joint inversion of magnetotelluric, seismic and gravity data in Xuwen area [J]. Progress In Exploration Geophysics, 2005, 28(4): 271.
- [18] 张霖斌,姚振兴,纪晨,等. 快速模拟退火算法及应用[J]. 石油地球物理勘探, 1997, 32(5): 654.
ZHANG Linbin, YAO Zhenxing, JI Chen, et al. Fast simulated annealing algorithm and its application [J]. OGP, 1997, 32(5): 654.
- [19] 师学明,王家映. 一维层状介质大地电磁测深模拟退火反演法[J]. 地球科学, 1998, 23(5): 542.
SHI Xueming, WANG Jiaying. One dimensional magnetotelluric sounding inversion using simulated annealing [J]. Journal of China University of Geosciences, 1998, 23(5): 542.
- [20] 任义庆,徐仲达,马在田. 应用模拟退火法反演横波速度[J]. 石油地球物理勘探, 1996, 31(5): 677.
REN Yiqing, XU Zhongda, MA Zaitian. S-wave velocity inversion using simulated annealing method [J]. OGP, 1996, 31(5): 677.
- [21] 陈华根,李丽华,许惠平. 模拟退火定位算法研究[J]. 同济大学学报:自然科学版, 2005, 33(9): 1240.
CHEN Huagen, LI Lihua, XU Huiping. Study of simulated annealing position-algorithm [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2005, 33(9): 1240.
- [22] 陈华根,李丽华,许惠平,等. 改进的非常快模拟退火算法[J]. 同济大学学报:自然科学版, 2006, 34(8): 1121.
CHEN Huagen, LI Lihua, XU Huiping, et al. Modified very fast simulated annealing algorithm [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2006, 34(8): 1121.
- [23] 陈华根,吴健生,王家林. 改进的重力模拟退火反演研究[J]. 吉林大学学报:地球科学版, 2002(3): 294.
CHEN Huagen, WU Jiansheng, WANG Jialin. Research in modified simulated annealing gravity inversion [J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2002(3): 294.
- [24] Mahesh Chand. GDI+图形程序设计[M]. 北京:电子工业出版社, 2005.
Mahesh Chand. Graphics Programming with GDI+ [M]. Beijing: Publishing House of Electronic Industry, 2005.
- [25] 王权海,李灿平,王理. GDI+图像处理程序中的性能提高技术[J]. 物探化探计算技术, 2009, 31(1): 81.
WANG Quanhai, LI Canping, WANG Li. Performance enhancing technology in image process programming with GDI+ [J]. Computing Techniques for Geophysical and Chemical Exploration, 2009, 31(1): 81.
- [26] 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.
WANG Jialin, WANG Yixin, WAN Minghao. Gravitational and magnetic interpretation on petroleum [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1991.