

文章编号:1001-1595(2009)03-0202-08

利用航磁数据向下延拓得到海面磁场的方法

于 波¹,翟国君²,刘雁春¹,黄谟涛²

1. 大连舰艇学院 海测工程系,辽宁 大连 116018; 2. 海洋测绘研究所,天津 300061

The Downward Continuation Method of Aeromagnetic Data to the Sea Level

YU Bo¹, ZHAI Guojun², LIU Yanchun¹, HUANG Motao²

1. Department of Hydrography and Cartography, Dalian Naval Academy, Dalian, 116018, China; 2. Naval Institute of Hydrographic Surveying and Charting, Tianjin, 300061, China

Abstract: Aeromagnetic data downward continuation to sea level instead of marine magnetic survey data can improve use capability of survey data. Based on principle of multiscale edge detection, a new method to improve accuracy of aeromagnetic data downward continuation to sea level is studied, multiscale edge constraint iteration method is presented. By the calculation, it is shown that the new algorithm can improve accuracy of downward continuation, accord with accuracy specification of three or four level marine magnetic survey.

Key words: marine magnetic survey; aeromagnetic; downward continuation; iteration method; multiscale edge

摘 要: 采用航磁数据向下延拓到海面代替船测数据,可提高磁力测量成果的综合利用率。基于多尺度边缘检测理论,研究改善航磁数据向下延拓到海面精度的方法,提出多尺度边缘约束迭代法,并给出模型和实测数据算例。计算结果表明,当航磁数据中噪声水平较大时,利用多尺度边缘约束迭代法可以提高向下延拓的精度,满足三、四级海洋磁力测量的精度要求。

关键词: 海洋磁力测量;航磁;向下延拓;迭代法;多尺度边缘

中图分类号:P229

文献标识码:A

基金项目:国家自然科学基金(40671161);国家 863 计划(2007AA12Z326)

1 引 言

海洋磁力测量是海洋测绘的重要内容之一,是测定海洋磁场、研究海底板块运动、海底磁性目标探测的重要技术手段。它是以测量船为载体,综合利用磁力传感器(拖鱼)、GPS 及深度传感器等设备测定海洋地磁场的一种方法。进行海洋磁力测量时由于磁场传感器(拖鱼)距离磁源近而分辨率高,但作业效率较低。相反,航空磁力测量的效率高,但数据分辨率低。目前我国利用船载方法进行海洋磁力测量刚刚起步,而航空磁力测量已经覆盖了我国及周边海域。对于需要进行三、四级海洋磁力测量的海区^[1],可以考虑利用航磁数据向下延拓到海面来代替船测数据,提高磁力测量成果的综合利用率。

向下延拓是一个不恒定问题,在增强真实磁异常的同时也放大了数据中的噪声,并且有可能掩盖测线剖面的真实磁异常变化。通过低通傅里叶滤波可以减弱放大的噪声,但同时也削弱了真实的磁异常突变部分,这显然与向下延拓的目的

不适应。因此研究向下延拓的方法主要是研究在向下延拓过程中既有效地抑制噪声又保留和增强真实的磁异常突变的方法。目前用于磁场向下延拓的方法很多,代表性的方法有:快速傅里叶法(FFT)、正则化方法和迭代法^[2]。由于正则化法的计算结果是有偏估计,如果正则化参数选择不当,可能引起较大的系统偏差^[3]。徐世浙对迭代法和 FFT 方法的延拓效果进行了分析比较,迭代法在计算精度上要远远大于 FFT 方法^[2],并研究了利用迭代法将航磁数据向下延拓到海面的可行性^[4]。迭代法的核心是利用 FFT 进行迭代,通过迭代削弱 FFT 本身的计算误差。由于实测数据中不可避免存在高频噪声,噪声在 Fourier 域内通过指数因子被放大,仅仅通过迭代并不能削弱噪声的影响。

Mallat 和 Zhong 的研究表明信号或图像可以通过其多尺度边缘重构^[5],宁津生等采用模型数据计算了不同高度的重力场多尺度边缘,证明了它们之间存在相似性,并研究了利用多尺度边缘约束向下延拓的可行性^[6]。本文首先分析噪声

对迭代法的计算精度影响,然后以迭代法为基础,充分利用航磁数据的边缘特性,提出了基于多尺度边缘约束的迭代法。结合模型和实测数据,通过与迭代法的延拓结果比较,分析多尺度边缘约束对改善延拓精度的作用,得出有益的结论。

2 方法原理

多尺度边缘检测是在不同的尺度上先磨光原始信号,再由磨光后信号的一阶或二阶导数检测出原信号的剧变点。这些剧变点就是原信号边缘点,将边缘点连成一条曲线形成信号的边缘,它通常是重要结构的边界,包含了信号的主要信息^[6-8]。在小波域中,边缘的检测相当于计算小波变换的模极大值点。

$$\left[\begin{array}{c} \text{Mod} \left\{ W_{2^j} f(x, y) \right\} \\ \text{Arg} \left\{ W_{2^j} f(x, y) \right\} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c} \sqrt{|W_{2^j} f(x, y)|^2 + |W_{2^{j+1}} f(x, y)|^2} \\ \arctan \left[\frac{W_{2^j} f(x, y)}{W_{2^{j+1}} f(x, y)} \right] \end{array} \right] \quad (1)$$

式中, $W_{2^j} f(x, y)$ 为函数 $f(x, y)$ 的二进小波变换, $\text{Mod} \left\{ W_{2^j} f(x, y) \right\}$, $\text{Arg} \left\{ W_{2^j} f(x, y) \right\}$ 分别表示小波变换的模和幅角。梯度向量的方向指明了磁异常沿这些方向的变化最大。因此,在不同尺度下,二进小波变换的模极大值点沿梯度向量的垂直方向连接成曲线构成了磁异常的多尺度边缘。

为便于说明问题,本文列出如下多尺度边缘约束迭代法的具体步骤:

1. 利用迭代法对航磁数据向下延拓到海平面;
2. 计算航磁数据和延拓到海平面后数据的多尺度边缘^[6];
3. 修改海面延拓数据的多尺度边缘,即只保留与航磁数据多尺度边缘位置相同的边缘;
4. 利用修改后的多尺度边缘重构延拓值。

由于观测数据中含有噪声,所以在计算观测信号的多尺度边缘时同样要消除噪声的影响。噪声与信号在小波变换下具有不同的性质,噪声引起的边缘通常集中在小尺度(高频)上,长度较短,幅值较小。可以采用阈值法对不同尺度上的模极大值进行处理,滤除噪声引起的模极大值。目前阈值确定的方法有很多,本文采用的阈值确定公式为^[9]

$$Thr = C \cdot M / level \quad (2)$$

式中, C 取小于 1 的任意数,本文取 0.8, $level$ 为分解尺度, M 为模极大值最大值。

由二进小波变换模极大值重构信号可分为 2 个步骤^[10]:第一步是由各个尺度下的小波变换模极大值重建小波变换;第二步再由信号的小波变换重建信号。其中第二步相对简单,实际上就是小波逆变换。而前一步重建小波系数的工作较为复杂,需进行迭代计算,常用的方法是在 Hilbert 空间的多个闭凸集之间做交替投影^[5,11-12]。但由于其计算量很大,程序复杂,因此速度较慢,而且其计算过程可能不稳定,不便于实际应用^[13]。本文采用分段三次样条插值算法(PCS 法)重构小波系数^[13],再结合 Mallat 重构算法,进行重构。

3 模型数据分析

假设在海底不同深度分布 4 个球体,建立如下坐标系(图 1):以球 1 的球心在海面的投影点作为坐标原点 O , Y 轴指向北方向, X 轴垂直于 Y 轴指向东, Z 轴垂直向下, XOY 面为海平面。4 个球体的分布如图 1 所示,在图 1 中 1~4 个球体球心坐标分别为 $(0, 0, -100)$ 、 $(3\ 000, 3\ 000, -90)$ 、 $(3\ 000, -3\ 000, -120)$ 、 $(-3\ 000, -3\ 000, -110)$ 。用于计算球体磁场分布所用参数如表 1 所示,选定测区范围为 $(-6\ 000, 6\ 000)$,网格间距为 $50\text{ m} \times 50\text{ m}$,点数为 241×240 。根据球体磁场公式分别计算得到 XOY 平面的磁异常分布(海面为 0 m 高度)和 500 m 高度磁异常(利用航空磁测手段进行海洋磁力测量时飞机的飞行高度不超过 500 m ^[14-15]),如图 1 所示。

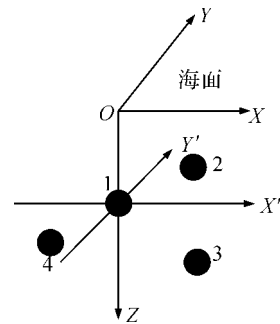


图 1 球体位置坐标系

Fig. 1 Location of spheres coordinates system

表 1 仿真球体所用参数

Tab. 1 Parameter of simulation sphere

球体半径/m	磁化强度/A/m	磁化倾角/(°)	磁化偏角/(°)
50	100	45	45

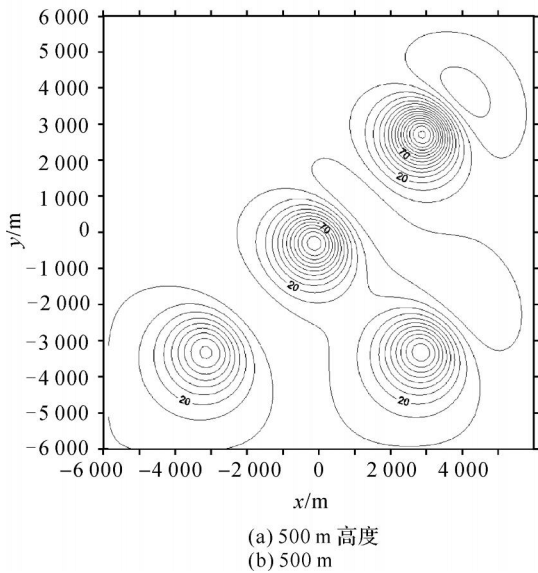
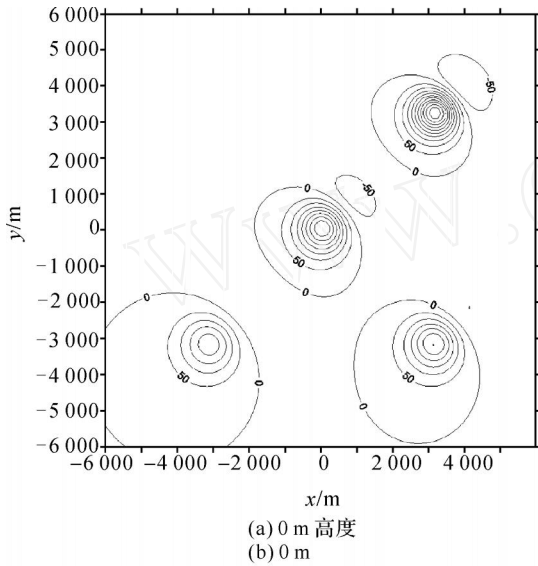


图 2 不同高度理论模型磁异常等值线

Fig. 2 Theoretical magnetic anomaly in different height

在 500 m 高度的理论磁异常中加入不同方差的噪声作为观测数据向下延拓到海面。本文采用以下 3 种方案进行计算：直接采用迭代法对观测数据进行延拓计算；先对观测数据进行 FFT 平滑^[16]，然后采用迭代法计算(将平均平滑时所用相邻点的数目定义为平滑系数 PTS ， PTS 越大，测线越光滑。表 2、4 中采用方案 2 计算时取

$PTS = 8$)；对 2 中数据进行多尺度边缘约束。表 2 给出了 500 m 延拓高度时由式(3)计算得到不同方案的延拓精度。精度计算公式如式(3)

$$m = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (i - \bar{i})^2}{n}} \quad (3)$$

式中， m 为延拓精度， i 为 0 m 高度的理论磁异常值， \bar{i} 为向下延拓到 0 m 高度的磁异常值， n 为测线总点个数。

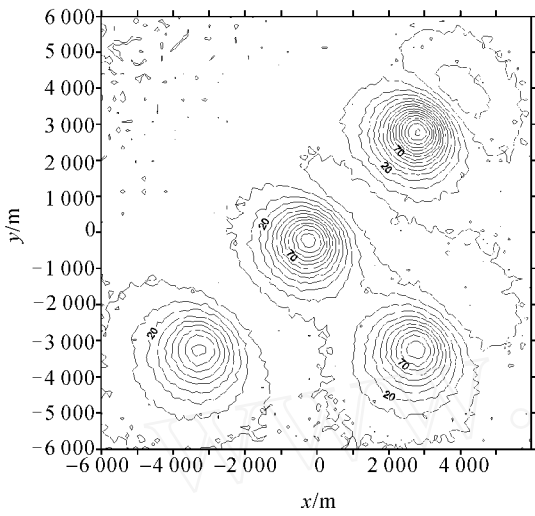
表 2 不同延拓方案的结果比较

Tab. 2 Comparison between the results of difference noise and downward continuation schemes

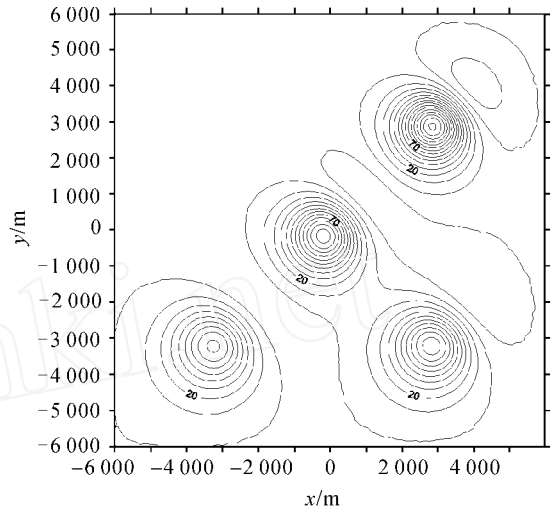
方案	噪声水平				
	2 nT	1.5 nT	1 nT	0.5 nT	0.2 nT
1	45.40	34.13	22.68	14.41	4.77
2	5.78	4.62	3.67	2.96	2.71
3	4.09	3.10	2.65	2.79	2.58

限于篇幅，本文只给出了噪声水平为 2 nT 和 0.2 nT 时，采用不同方案向下延拓到 0 m 高度的磁异常图(图 3)。

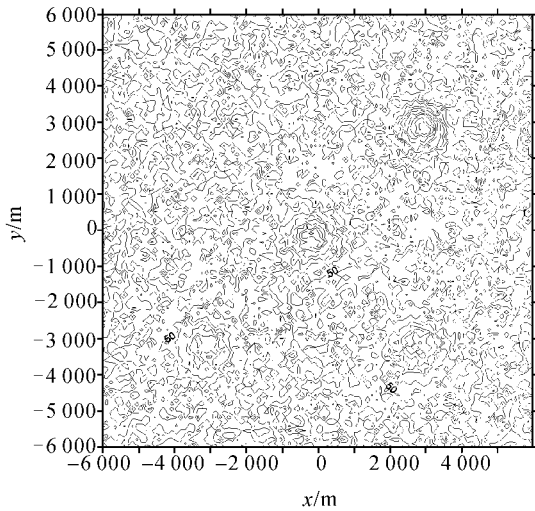
当模型数据中不含噪声时，利用迭代法进行向下延拓只有 FFT 计算产生的误差。将 500 m 高度的理论磁异常向下延拓到 0 m 平面，计算精度为 1.53 nT，这也说明了迭代法在无噪声时有较高的向下延拓精度和高度^[2]。从表 2 中可以看出，当模型数据中加入噪声后，向下延拓会使噪声得到放大，仅仅通过迭代并不能消除噪声对延拓精度的影响，当噪声水平大于 0.5 nT 时，通过方案 1 延拓到海面的磁异常远远超出了船载海洋磁力测量的精度要求。先对观测数据进行 FFT 平滑，然后采用迭代法进行延拓计算大大提高了精度。从图 3(a)中可以看出，当噪声水平 = 2 nT 时，噪声对 500 m 高度磁异常影响较大，采用方案 1 向下延拓到 0 m 平面后，放大的噪声掩盖了真实磁异常的变化趋势，采用方案 2 向下延拓后，噪声得到抑制。在相同延拓高度下，不同的噪声水平对延拓精度的影响不同。从表 2 中可以看出，随噪声水平的减小，3 种方案的延拓精度的差值逐渐减小。当噪声水平 = 2 nT 时，方案 2 的延拓精度提高了 39.62 nT，采用方案 3 后比方案 2 精度提高了 1.69 nT，对比图 3(d)，图 3(e)，噪声得到了进一步抑制；当噪声水平 = 0.2 nT 时，3 种方案的延拓精度基本不变，并且都接近于无噪声向



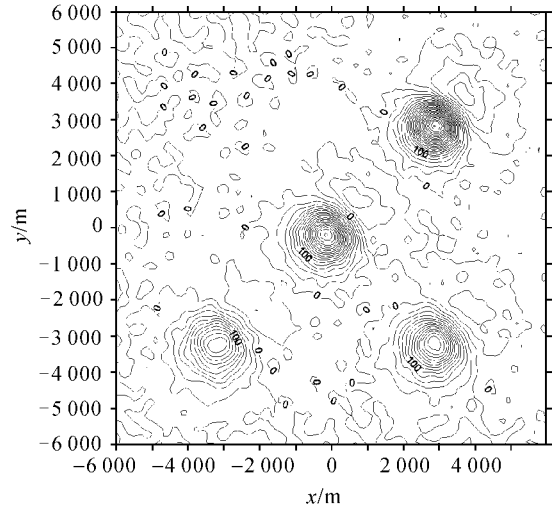
(a) $\sigma=2\text{ nT}$ 时500 m高度磁异常
 (a) $\sigma=2\text{ nT}$ magnetic anomaly in 500 m



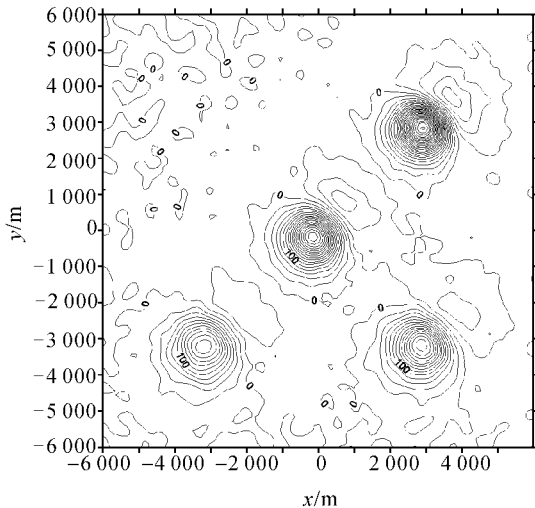
(b) $\sigma=0.2\text{ nT}$ 时500 m高度磁异常
 (b) $\sigma=0.2\text{ nT}$ magnetic anomaly in 500 m



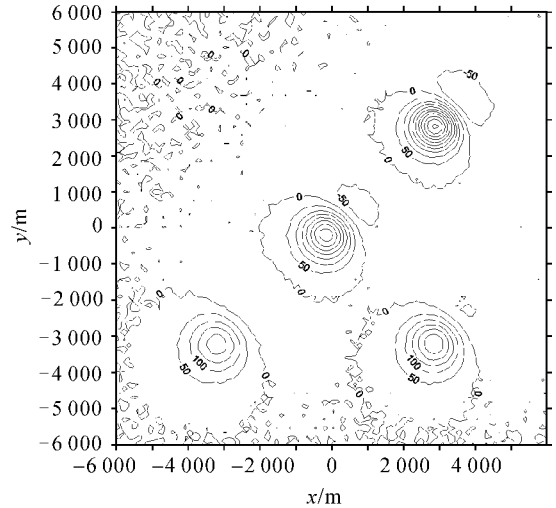
(c) 采用方案1将(a)中数据向下延拓到0 m高度
 (c) Data (a) downward continued to 0 m with scheme 1



(d) 采用方案2将(a)中数据向下延拓到0 m高度
 (d) Data (a) downward continued to 0 m with scheme 2



(e) 采用方案3将(a)中数据向下延拓到0 m高度
 (e) Data (a) downward continued to 0 m with scheme 3



(f) 采用方案1将(b)中数据向下延拓到0 m高度
 (f) Data (b) downward continued to 0 m with scheme 1

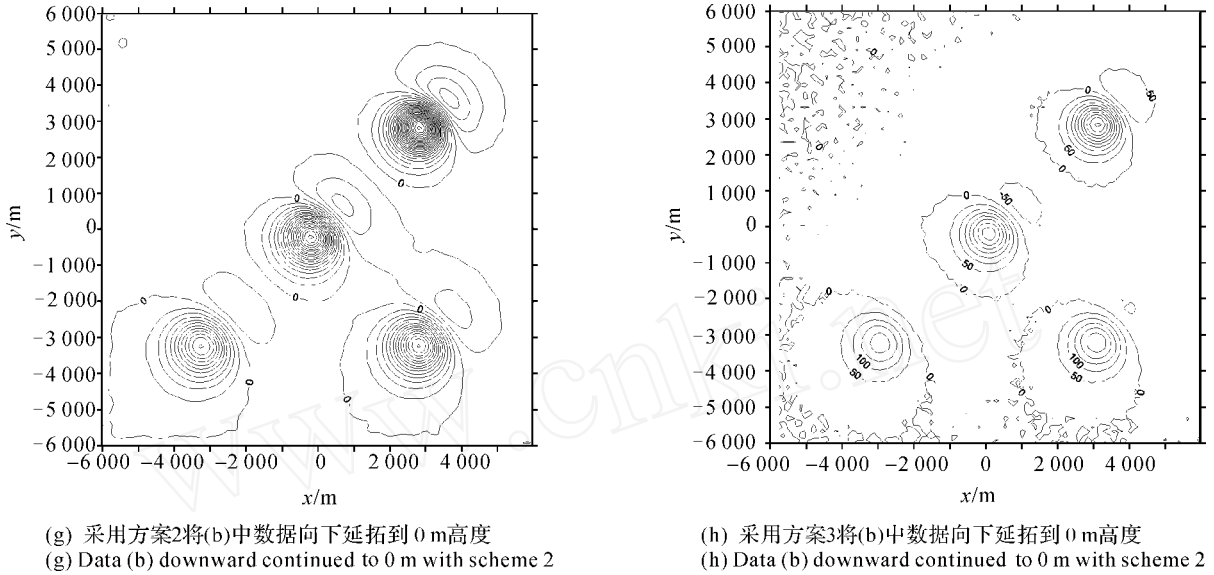


图3 不同方案计算的磁异常比较

Fig. 3 Comparison between the results of difference noise and downward continuation schemes at different noise levels

下延拓时的精度。比较图 3(f), 图 3(g), 图 3(h) 发现, 采用方案 2 延拓后的磁异常形状发现变化, 说明平滑系数过大, 将真实磁异常平滑。

为进一步对方案 2, 3 进行分析, 本文计算了 500 m 高度、噪声水平为 2 nT 时, 采用方案 2 在取不同平滑系数时的延拓精度, 如表 3 所示。从表 3 中可以看出, 当平滑系数增大时, 延拓精度是先减小后增大, 当 $PTS = 10$ 时, 延拓精度最高为 4.90 nT。当 $PTS = 10$ 采用方案 2 延拓计算得到 0 m 高度的磁异常如图 4 所示。图 4 与图 3(e) 相比, 相差不大。因此当噪声水平较大时, 采用方案 2 进行延拓计算时需要不断改变平滑系数实验提高计算精度, 与方案 3 相比较, 对精度的改善不是特别明显, 反而会增大工作量。

表3 噪声水平为 2 nT 时, 取不同平滑系数的延拓精度
Tab. 3 Accuracy of continuation with different PTS at noise variance is 2 nT

平滑系数 PTS	6	8	10	15	20
精度	8.09	5.78	4.90	6.22	9.64

通过以上分析, 当噪声水平大于 0.5 nT 时, 方案 2, 3 对延拓精度改善比较明显。在采用方案 2 时, 需要通过不断实验平滑系数 PTS 的大小来提高精度, 这样增大了工作量, 相同噪声水平时, 与采用方案 3 相比精度改善不明显。当噪声水平小于 0.5 nT 时, 采用方案 2 和 3 的精度差别不

大, 说明当噪声水平较小时, 采用先平滑后迭代延拓的方法可以很好的削弱噪声的影响; 当观测数据中不含噪声时, 采用迭代法向下延拓到海面就可以得到较好的效果。

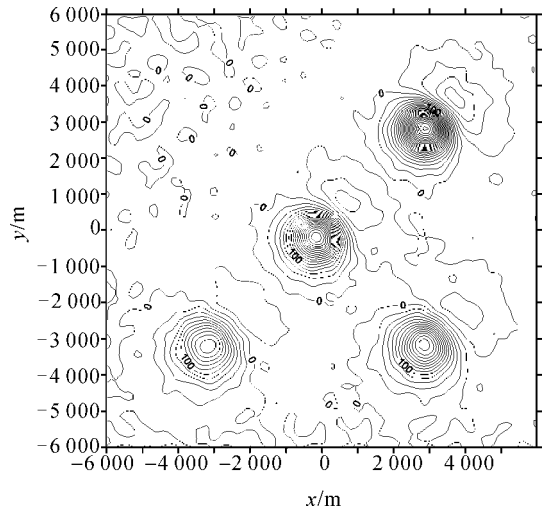


图4 噪声水平为 2 nT、平滑系数为 10 的磁异常
Fig. 4 Magnetic anomaly at noise variance is 2 nT and PTS = 10

4 实测数据分析

在某海区同时进行船载磁力测量和航空磁力测量, 测区面积约为 40 100 × 29 850 m。原始船磁数据的线点距约为 500 m × 6 m, 原始航磁数据的线点距约为 500 m × 32 m, 平均飞行高度为

174 m。通过将 174 m 高度的航磁数据采用 3 种不同方案向下延拓到海面,利用式(3)计算不同方法的延拓精度,如表 4 所示(表 4 中,采用方案 2 计算时,由于不知道航磁数据的噪声水平,若平滑系数 PTS 过大会将真实磁异常平滑,因此令

$PTS = 1$)。在式(3)中, i 为 0 m 高度的船磁数据。首先,将原始数据分别进行网格化,网格间距为 $100\text{ m} \times 50\text{ m}$,测点个数为 $598 \times 402 = 240\ 396$ 。分别绘制了 0 m 高度的船测磁异常和 174 m 高度的航测磁异常等值线图(图 5)。

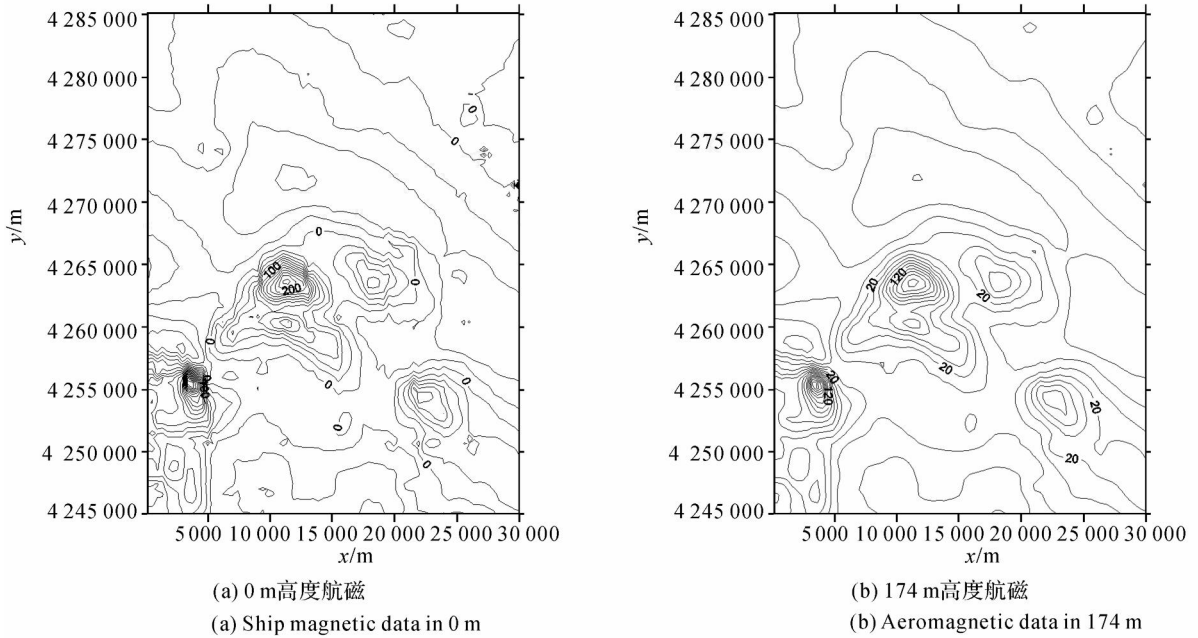


图 5 不同高度实测磁异常等值线

Fig. 5 Practical magnetic anomaly in different height

表 4 不同延拓方案的结果比较

Tab. 4 Comparison between the results of difference noise and downward continuation schemes / nT

方案	最大值	最小值	平均值	均方根/ m
1	32.55	- 34.56	- 0.18	7.47
2	28.99	- 25.32	- 0.16	7.01
3	15.61	- 20.31	- 0.08	6.04

从表 4 中可以看出,直接采用迭代法将航磁数据向下延拓到海面,并不能消除或削弱航磁数据包含的噪声对延拓精度的影响。采用方案 1 向下延拓后与船磁数据的均方根为 7.47 nT,先对观测数据进行 FFT 平滑,然后采用迭代法进行延拓计算的均方根为 7.01 nT,精度提高 0.36 nT;采用方案 3 向下延拓的精度最高,比方案 2 提高 0.97 nT。从图 6(a)中可以看出,采用方案 1 将航磁数据向下延拓到海面后,磁异常等值线比较粗糙,放大的噪声对 0 m 高度磁异常影响明显;图 6(b)中,等值线形状粗糙程度有些

改善,但效果不明显;图 6(c)中,延拓后的磁异常等值线较为光滑,与船测磁异常等值线图差别不大。

为研究不同平滑系数对采用方案 2 时的计算精度影响,本文计算采用方案 2 计算时,在取不同平滑系数 PTS 的延拓精度,如表 5 所示。从表 5 中可以看出,当平滑系数增大时,延拓精度是先减小后增大。当 $PTS = 2$ 时,延拓精度最高为 6.93 nT。平滑系数继续增大,延拓精度降低。其原因主要是当平滑系数小于等于 2 时,平滑的主要是数据中的噪声,平滑系数增大时,数据中真实的小尺度磁异常也被平滑,反而使精度降低。

表 5 方案 2 中不同平滑系数的延拓精度

Tab. 5 Accuracy of continuation with different PTS in scheme 2 / nT

平滑系数 PTS	2	3	4
精度	6.93	7.21	7.55

5 结 论

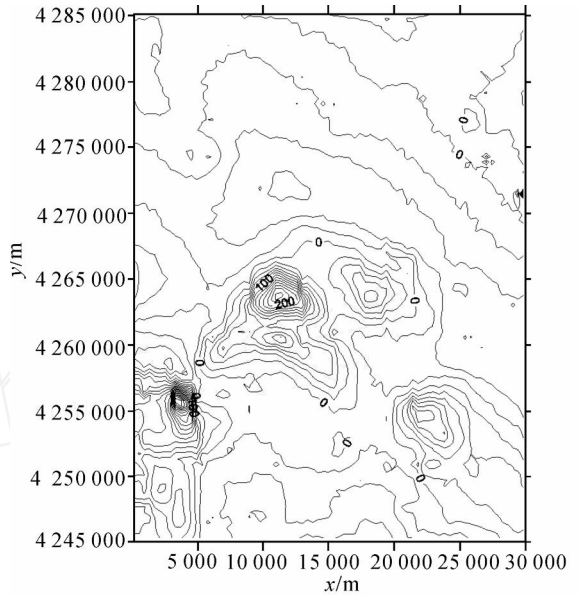
通过模型和实测数据分析可以得出如下结论:在进行向下延拓计算时,应先估计数据中的噪声方差。

1. 当数据中不含噪声或含有较小方差的噪声时,应用迭代法将航磁数据向下延拓可以得到较好的效果,代替船磁数据,满足三、四级海洋磁力测量精度的要求^[1];

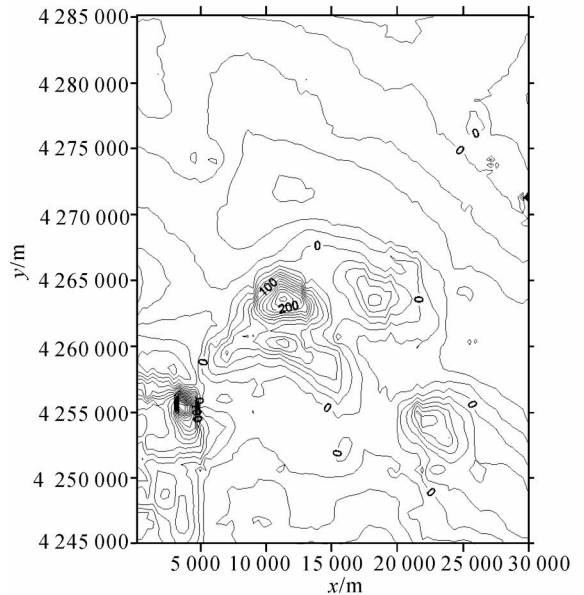
2. 当观测数据中含有较大方差的噪声时,采用方案 2,3 都可以满足海洋磁力测量精度要求。

但是采用方案 2 时,需要通过不断改变平滑系数,来提高计算精度,这样会增大工作量,并且容易削弱或消除真实磁异常。基于多尺度边缘约束迭代法避免了重复试验平滑系数,并提高了延拓精度,充分利用了航空磁测数据中隐含的信息,更加合理。

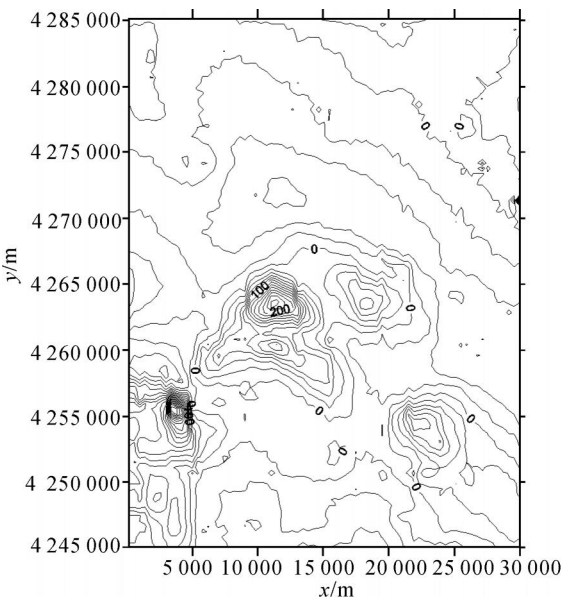
根据延拓理论,磁场信号的光滑性随高度增加而增加,边缘也将随高度增加而逐渐减少,若用高度过高的观测信号的多尺度边缘来约束地面延拓值的边缘,虽然能够抑制因噪声产生的边缘,但是同样会造成某些真实的边缘丢失。利用航磁手段进行海洋磁力测量时飞机的飞行高度一般不超过 500 m,所以在利用航磁数据向下延拓代替船磁数据时采用边缘约束是完全可行的。采用该方法时,利用模极大值进行重构的高精度算法还有待于进一步研究。



(b) 采取方案2将航磁数据向下延拓到 0 m 高度
(b) Aeromagnetic data downward continued to 0 m with scheme 2



(c) 采取方案3将航磁数据向下延拓到 0 m 高度
(c) Aeromagnetic data downward continued to 0 m with scheme 3



(a) 采取方案1将航磁数据向下延拓到 0 m 高度
(a) Aeromagnetic data downward continued to 0 m with scheme 1

图 6 不同方案计算的磁异常比较

Fig. 6 Comparison between the results of difference noise and downward continuation schemes at different noise levels

致谢:徐世浙院士提供了迭代法计算软件,特此致谢!

参考文献:

[1] State Oceanic Administration. GB/ T 12763. 8-2007 Specifi-

- cations for Oceanographic Survey—Part8: Marine Geology and Geophysics Survey [S]. Beijing: Standards Press of China, 2007. (国家海洋局. 海洋调查·规范第8部分:海洋地质地球物理调查[S]. 北京:中国标准出版社, 2007.)
- [2] XU Shizhe. A Comparison of Effects between the Iteration Method and FFT for downward Continuation of Potential Fields[J]. Chinese J Geophys, 2007, 50(1): 285-289. (徐世浙. 迭代法与FFT法位场向下延拓效果的比较[J]. 地球物理学报, 2007, 50(1): 285-289.)
- [3] WANG Xingtao, XIA Zheren, SHI Pan, et al. A Comparison of Different downward Continuation Methods for Airborne Gravity Data[J]. Chinese J Geophys, 2004, 47(6): 1017-1022. (王兴涛, 夏哲仁, 石磐, 等. 航空重力测量数据向下延拓方法比较[J]. 地球物理学报, 2004, 47(6): 1017-1022.)
- [4] XU Shizhe, WANG Rui, ZHOU Jianxin, et al. To Continue Aeromagnetic Data to the Sea Level[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2007, 29(6): 53-57. (徐世浙, 王瑞, 周坚鑫, 等. 从航磁资料延拓出海面磁场[J]. 海洋学报, 29(6): 53-57.)
- [5] MALLAT S, ZHONG S. Characterization of Signals from Multiscale Edges[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1992, 14(7): 710-732.
- [6] NING Jinsheng, WANG Haihong, LUO Zhicai. Downward Continuation of Gravity Signals Based on the Multiscale Edge Constraint[J]. Chinese J Geophys, 2005, 48(1): 63-68. (宁津生, 汪海洪, 罗志才. 基于多尺度边缘约束的重力场信号的向下延拓[J]. 地球物理学报, 2005, 48(1): 63-68.)
- [7] TROMPAT H, BOSCHETTI F, HORNB Y P. Improved downward Continuation of Potential Field Data[J]. Exploration Geophysics, 2003, 34(4), 249-256.
- [8] BOSCHETTI F, HORNB Y P, HOROWITI F. Wavelet Based Inversion of Gravity Data[J]. Exploration Geophysics, 2001, 32, 48-55.
- [9] XIA Minhua. 3 mm Wave Band Pulse Radar System and Analysis of Wavelet De-noise[D]. Nanjing: Nanjing University of Technology, 2004. (夏敏华. 3 mm 波段脉冲雷达系统研究和去噪分析[D]. 南京: 南京理工大学, 2004.)
- [10] YANG Fusheng. Engineering Analysis and Application of Wavelet Transform[M]. Beijing: Science Press, 1999. (杨福生. 小波变换的工程分析与应用[M]. 北京: 科学出版社, 1999.)
- [11] BOSCHETTI F, HORNB Y P, HOROWITZ F. Wavelet Based Inversion of Gravity Data[J]. Exploration Geophysics, 2001, 32, 48-55.
- [12] MALLAT S. A Wavelet Tour of Signal Processing (Second Edition)[M]. 2nd ed. Beijing: China Machine Press, 2002. (MALLAT S. 信号处理的小波导引[M]. 第2版. 北京: 机械工业出版社, 2002.)
- [13] ZHAO Ruizhen. Research on Wavelet Theory and Its Algorithms for Image Processing and Signal Processing [D]. Xi'an: Xidian University, 2001. (赵瑞珍. 小波理论及其在图像信号处理中的算法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2001.)
- [14] WANG Miaoyue. Exploration Geophysics[M]. Beijing: Earthquake Press, 2003. (王妙月. 勘探地球物理学[M]. 北京: 地震出版社, 2003.)
- [15] DZ/T 0142-94. The Standard of Aeromagnetic Survey [S]. (DZ/T 0142-94. 航空磁测技术规范[S].)
- [16] WAN Yongge. Data Signal Processing Based on MATLAB[M]. Beijing: Science Press, 2007. (万永革. 数字信号处理的MATLAB实现. 北京: 科学出版社, 2007.)
- [17] DONOHO D L. De-noising by Soft-thresholding [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1995, 41(3): 613-627.

(责任编辑:丛树平)

收稿日期: 2008-06-30

修回日期: 2008-11-10

第一作者简介: 于波(1981-), 男, 博士生, 主要从事海洋磁力测量理论与数据处理研究。

E-mail: yubozxp@163.com

First author: YU Bo (1981-), male, PhD candidate, majors in marine geomagnetic survey theory and data processing. E-mail: yubozxp@163.com