

文章编号: 1001-1595(2011)03-0386-07

## 应用改进欧拉算法解算磁性目标空间位置参数

卞光浪<sup>1,2</sup>, 翟国君<sup>2</sup>, 刘雁春<sup>1</sup>, 黄谟涛<sup>2</sup>, 欧阳永忠<sup>2</sup>

1. 大连舰艇学院 海洋测绘科学与工程系, 辽宁 大连 116018; 2. 海洋测绘研究所, 天津 300061

### Computation of Spatial Position Parameters of Magnetic Object with Improved Euler Approach

BIAN Guanglang<sup>1,2</sup>, ZHAI Guojun<sup>2</sup>, LIU Yanchun<sup>1</sup>, HUANG Motao<sup>2</sup>, OUYANG Yongzhong<sup>2</sup>

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

Abstract: Considering the deficiency of conventional Euler approach in magnetic detection at present, the combining influence of geomagnetism and adjacent bodies' anomaly was assumed as linear variation. The non-linear problem of Euler equation had been figured out utilizing multivariate linear regression with unprescribed structural index. In quality control scheme, filtering technique of Euler solutions was presented based on the relationship between structural index and object depth. Adopting hierarchical clustering method, the dispersed Euler solutions were isolated to different clusters. The effectiveness of the suggested techniques had been illustrated by real magnetic data from a collection of environmental ferro-metallic objects. The conclusion shows that Euler approach, provided by relative threshold parameters, becomes a fully automatic interpretation approach, and the calculated horizontal position together with depth has very high precision. However, the noise influence to depth's result is more serious than it to horizontal position.

Key words: magnetic object detection; magnetic source's depth and horizontal position; Euler deconvolution; linear regression; hierarchical clustering analysis

摘 要: 指出目前磁性目标探测中常规欧拉方法存在的局限性, 提出在欧拉窗口内视地磁场和其他目标干扰异常联合影响为线性变化, 将构造指数作为动态变化参数代入欧拉方程并求解, 并利用多元线性回归方法解决了欧拉方程非线性问题。在质量控制方案中, 根据构造指数和目标深度变化规律, 给出离散欧拉解滤波措施; 采用层次聚类分析方法对滤波后欧拉解进行分类。通过实测数据验证表明: 给定相关阈值参数后, 实现欧拉方法全自动反演, 磁性目标空间位置参数具有很高解算精度, 噪声对目标平面位置解算结果基本上没有影响, 但对深度解算结果存在一定影响。

关键词: 磁性目标探测; 磁性目标空间位置; 欧拉反褶积法; 线性回归; 层次聚类分析

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(2009AA121405-05)

## 1 引言

欧拉方法能自动或人机交互式反演磁性目标空间位置参数信息<sup>[1]</sup>, 在磁性目标探测、矿产资源勘测以及地质地球物理调查中得到广泛应用<sup>[2,3]</sup>。早期理论研究没有考虑地磁背景场因素影响, 将磁异常直接代入欧拉方程建立线性方程组, 利用最小二乘法求解磁性目标空间位置参数。然而, 实际观测值均包含背景场影响, 仍然采用类似处理方法会导致解的严重发散<sup>[4]</sup>, 克服这一问题的常用方法是将移动窗口内背景场视为常数, 这时方程组转变为非线性方程组。为求解非线性方程组, 需要给定准确的构造指数对方程组进行线

性化<sup>[5]</sup>。长期以来, 构造指数的选取主要依靠人为主观判断, 且各窗口内都要给定构造指数, 当测区包含多种类型异常目标时, 这种做法实现起来非常困难。而错误的构造指数或构造指数动态变化时, 也会导致解的发散, 特别是深度计算结果受此影响更甚<sup>[6]</sup>; 而且, 过多的人为干预使欧拉方法不再是自动反演方法, 难以自动处理大容量、多目标磁场数据。文献[7]提出将观测磁场的垂向导数或其高阶导数代入欧拉方程, 以达到方程组线性化目的, 通过二维测线磁场数据检验应用效果, 但高阶导数容易造成噪声严重放大, 制约该方法在三维磁场数据中的应用。

目前, 利用欧拉方法解算磁性目标空间位置

时,基本上仍然采用滑动欧拉窗口方式,且欧拉窗口与磁性目标属于一一对应<sup>[8]</sup>。当地磁场变化平缓且磁性目标相互间干扰很少时,可通过缩小欧拉窗口方式来减弱地磁场变化和其他目标干扰影响,从而将欧拉窗口内背景场视为常数来处理,此时磁性目标空间位置参数解算精度较高。但是,当磁性目标所在测区地磁场变化复杂或多个磁性目标磁场之间相互叠加,如果仍视欧拉窗口内背景场为常数,就会明显降低解算结果精度<sup>[9]</sup>。为解决此类问题,本文给出欧拉窗口的选取方法,提出采用多元线性回归法计算各欧拉窗口内磁性目标空间位置参数、构造指数和背景场参数,研究离散欧拉解的质量控制方案。通过实测数据检验方法的有效性。

## 2 改进欧拉回归模型

满足关系式(1)的  $m$  元函数  $f(v_1, v_2, \dots, v_m)$ , 称为  $n$  次齐次函数。

$$f(tv_1, tv_2, \dots, tv_m) = t^n f(v_1, v_2, \dots, v_m) \quad (1)$$

式中,  $v_1, v_2, \dots, v_m$  为变量参数;  $t$  为比例参数。式(1)左侧参数同乘  $t$ , 等价于度量空间线性映射,  $t > 1$  时为膨胀映射,  $0 < t < 1$  时为压缩映射。

如果  $f(v_1, v_2, \dots, v_m)$  中参数在  $D$  域内存在连续偏导数, 则式(1)成立的充分必要条件为

$$\sum_{i=1}^m v_i f'_{v_i}(v_1, v_2, \dots, v_m) = n f(v_1, v_2, \dots, v_m) \quad (2)$$

式(2)即为欧拉公式, 用向量形式表示为

$$\mathbf{v} \Delta_{\mathbf{v}} f(\mathbf{v}) = n f(\mathbf{v}) \quad (3)$$

式中,  $\Delta$  为梯度算子;  $\mathbf{v} = [v_1 \ v_2 \ \dots \ v_m]$ 。

由于欧拉方程适用于任意右手笛儿坐标系  $Oxyz$ , 实际测量中, 观测面通常为地表或水面等准水平面, 且磁性目标位于观测面以下, 此时, 可令  $xOy$  面与观测面平行,  $z$  垂直向下。球体、圆柱体和长方体等磁性目标所引起的磁异常在一定条件下可视为齐次函数<sup>[10]</sup>, 测点  $P(x, y, z)$  处欧拉方程形式为

$$\begin{aligned} (x-x_0) \frac{\partial T(P)}{\partial x} + (y-y_0) \frac{\partial T(P)}{\partial y} + \\ (z-z_0) \frac{\partial T(P)}{\partial z} = -NT(P) \end{aligned} \quad (4)$$

式中,  $T$  泛指磁性目标引起的位场异常(磁位、磁异常分量、总场磁异常或解析信号等);  $N$  为构造指数(与  $T$  选择有关, 当  $T$  为总场磁异常时,  $N =$

$-n$ );  $(x_0, y_0, z_0)$  为磁性目标中心  $C$  的位置。

用向量形式表示式(4)为

$$\mathbf{r}_{CP} \Delta_P [T(P)] = -NT(P) \quad (5)$$

式中,  $\mathbf{r}_{CP} = \mathbf{r}_{OP} - \mathbf{r}_{OC}$ ,  $\mathbf{r}_{OP}$  和  $\mathbf{r}_{OC}$  分别为测点  $P$  与磁性目标中心  $C$  至坐标原点间的矢量。

式(5)中只有 4 个未知数  $x_0, y_0, z_0, N$ , 如果能测量或推算出位场异常及其梯度值, 就可以通过磁性目标所在区域 4 个或更多测点磁场数据联立线性方程组, 采用最小二乘法求解磁性目标空间位置参数及构造指数。由式(5)可以看出, 该式每次仅能求解单一磁性目标空间位置参数。为了确定测区中多个磁性目标参数, 需要采用如图 1 的滑动窗口(称为“欧拉窗口”)方式, 分别计算各窗口内的磁性目标参数。

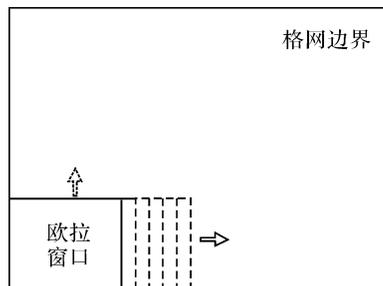


图 1 滑动欧拉窗口示意图

Fig. 1 Shifted Euler window sketch

上述欧拉模型推导过程中, 采用磁性目标位场异常。通常情况下, 背景场(或称正常场)与异常场是个相对的概念, 有广义和狭义之分。狭义磁异常专指研究或探测对象引起的磁场, 非其引起的磁场则为背景场。广义背景场专指地球引起的地磁场, 而磁异常是各种磁性目标引起的磁场。欧拉方法研究范围为欧拉窗口, 其研究对象为窗口内主体异常对应的磁性目标, 显然, 此时应采用狭义划分方法, 即窗口内除研究对象磁异常外的所有磁场均为背景场。实际磁探测中通常直接获取总场强度, 为背景场与位场异常两者之和

$$F(P) = B(P) + T(P) \quad (6)$$

式中,  $F(P)$ 、 $T(P)$  和  $B(P)$  分别为测点  $P$  处观测总场强度、位场异常以及背景场, 其中背景场包含地球磁场与其他磁性目标引起的磁场。

实际磁探测时, 测区内往往含有多个磁性目标, 各目标磁异常间相互叠加, 如果仍视背景场为常数, 必然降低解的计算精度。如前所述, 合理做法是选择大小合适的欧拉窗口, 使窗口内包含的

主体异常不多于 1 个, 并将地磁场和其他磁性目标磁异常联合影响视为线性变化, 即

$$B(x, y, z) = b_0 + b_x x + b_y y + b_z z = r_{OP} b + b_0 \quad (7)$$

将式(6)中  $T(P)$  代入式(5)得

$$r_{CP} \Delta_P [F(P)] + NF(P) = r_{CP} \Delta_P [B(P)] + NB(P) \quad (8)$$

令  $\psi^N [B(P)]_C = r_{CP} \Delta_P [B(P)] + NB(P)$ , 因欧拉窗口内背景场  $B(P)$  是线性变化, 容易证明,  $\psi^N [B(P)]_C$  为线性变化, 由式(8),  $\psi^N [F(P)]_C = r_{CP} \Delta_P [F(P)] + NF(P)$  同样为线性变化。

考虑到观测值  $F(P)$ 、 $\Delta_P [F(P)]$  和观测点坐标  $r_{OP}$  受噪声影响, 随机变量  $\psi^N [F(P)]_C$  用线性回归模型表示为

$$\psi^N [F(P)]_C = \beta_0 + \beta_x x + \beta_y y + \beta_z z + \varepsilon \quad (9)$$

式中,  $\beta_0, \beta_x, \beta_y$  和  $\beta_z$  均为回归系数,  $\varepsilon$  是服从正态分布的随机变量。

$$B = \begin{bmatrix} F_{x1} - F_x & F_{y1} - F_y & F_{z1} - F_z & F_1 - F & x_1 - x_0' & y_1 - y_0' & z_1 - z_0' \\ F_{x2} - F_x & F_{y2} - F_y & F_{z2} - F_z & F_2 - F & x_2 - x_0' & y_2 - y_0' & z_2 - z_0' \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ F_{xK} - F_x & F_{yK} - F_y & F_{zK} - F_z & F_K - F & x_K - x_0' & y_K - y_0' & z_K - z_0' \end{bmatrix}$$

$$L = \begin{bmatrix} x_1 F_{x1} - \overline{x F_x} & y_1 F_{y1} - \overline{y F_y} & z_1 F_{z1} - \overline{z F_z} \\ x_2 F_{x2} - \overline{x F_x} & y_2 F_{y2} - \overline{y F_y} & z_2 F_{z2} - \overline{z F_z} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_K F_{xK} - \overline{x F_x} & y_K F_{yK} - \overline{y F_y} & z_K F_{zK} - \overline{z F_z} \end{bmatrix}$$

$\{x_0', y_0', z_0'\}$  为欧拉窗口中心点坐标;  
 $\{x_i, y_i, z_i\}$  为欧拉窗口内第  $i$  个测点空间坐标;  
 $F_{xi}, F_{yi}$  和  $F_{zi}$  是总场强度在坐标轴方向偏导数;  $\Psi$  为对应  $\Psi$  函数在窗口内所有测点的平均值, 即  $\Psi = \sum_{i=1}^K \Psi_i$ 。

可以看出, 应用式(11)求解参数时, 需要对窗口内测点矩阵形坐标进行拉直处理。特别要指出的是, 如果磁性目标观测面为水平面时, 会使得矩阵  $B$  最右侧列为零向量, 导致  $B$  矩阵奇异, 无法给出合理的参数解。这种情况下, 可令  $\beta_z = 0$ , 并去除  $B$  矩阵最右侧列向量, 进而再求解其他参数。

将式(8)右端与式(9)右端回归模型对应分析后, 得欧拉窗口内背景场参数  $\hat{b}_x, \hat{b}_y, \hat{b}_z$  和  $\hat{b}_0$  表达式如下

合理的参数估计值  $\hat{x}_0, \hat{y}_0, \hat{z}_0, \hat{N}, \beta_0, \beta_x, \beta_y$  和  $\beta_z$  应使残差平方和  $Q_F^2$  达到最小, 即

$$Q_F^2 = \sum_{i=1}^K \left\{ \psi^N [F(x_i, y_i, z_i)]_C - \left[ \beta_0 + \beta_x x_i + \beta_y y_i + \beta_z z_i \right] \right\}^2 = \min \quad (10)$$

式中,  $K$  为欧拉窗口内观测点  $P(x_i, y_i, z_i)$  总数。

根据函数自由极值条件, 可采用最小二乘法

求解  $\hat{x}_0, \hat{y}_0, \hat{z}_0, \hat{N}$  及回归系数估值, 本文求解参数时, 对数据进行了中心化处理, 限于篇幅, 这里略去推导过程, 直接给出参数解算公式。

$$\hat{p} = (B^T B)^{-1} B^T L \quad (11)$$

式中

$$\hat{p} = [\hat{x}_0 \quad \hat{y}_0 \quad \hat{z}_0 \quad \hat{N} \quad \beta_x \quad \beta_y \quad \beta_z]^T$$

$$\left. \begin{aligned} \hat{b}_x &= \frac{\beta_x}{\hat{N} + 1} \\ \hat{b}_y &= \frac{\beta_y}{\hat{N} + 1} \\ \hat{b}_z &= \frac{\beta_z}{\hat{N} + 1} \\ \hat{b}_0 &= \frac{1}{\hat{N}} \left\{ \overline{x F_x} + \overline{y F_y} + \overline{z F_z} + \hat{b}_x [\hat{x}_0 - (\hat{N} + 1) x_0'] + \right. \\ &\quad \left. \hat{b}_y [\hat{y}_0 - (\hat{N} + 1) y_0'] + \hat{b}_z [\hat{z}_0 - (\hat{N} + 1) z_0'] \right\} \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

式(11)、(12)即为改进的欧拉回归模型。

### 3 质量控制

欧拉窗口尺寸大小是影响磁性目标参数解稳定性的重要因素之一, 而滑动的欧拉窗口方式使得磁性目标参数解为一群离散欧拉解。为准确获取磁性目标相关参数, 下面对欧拉窗口尺寸大小的选取、发散解的消除以及磁性目标参数的确定等方法进行研究。

磁性目标探测时, 测区往往含有类型不同的多个磁性目标, 且各种场源异常间相互叠加。将研究目标产生的磁异常主要部分定义为主体异常, 邻近磁性目标引起的磁异常为干扰异常。传统欧拉方法欧拉窗口选取原则是: 欧拉窗口大体上能覆盖场源产生的主体异常, 同时受其他干扰异常影响极小, 此时欧拉窗口应尽可能小<sup>[11]</sup>, 这样处理的结果使得较大磁性目标的计算结果与实际情况相差较大。本文将欧拉窗口内地磁背景场与其他目标磁异常联合影响视为线性变化, 以削弱了解的发散性, 从而在一定程度上放宽了欧拉窗口尺寸的限制, 只需欧拉窗口内包含磁性目标的主体异常数目不多于 1 个即可, 当主体异常数目等于 1 时, 欧拉窗口与主体异常一一对应, 计算的欧拉解应为可信的, 在发散解的处理中将予以保留; 反之, 当欧拉窗口内不包含主体异常时, 计算的欧拉解不可信, 经过发散解处理后可以消除。

消除欧拉发散解是准确获取磁性目标空间位置信息的关键。本文将背景场视为线性变化, 降低欧拉窗口尺寸对解的影响; 同时改进了传统欧拉方法中构造指数为常数的做法, 设其为动态变化参数, 进一步提高解的稳定性。但当某些欧拉窗口内无主体磁异常时, 梯度值往往偏小或变化不大(近似一个小的常数), 计算出的解易于发散。文献[12]提出水平梯度滤波方法, 选择水平梯度较大的区域参与反演, 增强解的稳定性, 该方法属于一种预处理方法, 欧拉方法适用于矩形区域, 而经过滤波后的区域为非矩形区域, 给后续数据处理带来了一定困难, 为此, 本文提出如式(13)判断准则对发散解进行初步处理。

$$\left. \begin{aligned} \hat{N} > 0 \\ J - 1 < \hat{N} \leq 2 + J \\ \hat{z}_0 > 0 \\ \hat{z}_0 / \hat{N} \sigma_{z_0} \geq \tau \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

构造指数在欧拉方法中是一个重要参数, 负值构造指数仅在某些特定情况下出现, 大多数情况下构造指数大于零, 其取值区间如式(13)第二式所示, 式中的  $J$  对应  $T$  与其磁位间的导数关系, 如  $T$  选择总场磁异常、磁异常及其分量时, 它们是磁位的一阶导数, 此时  $J = 1$ ; 当  $T$  为磁异常解析信号或磁异常导数时,  $J = 2$ 。水下磁性目标探测时, 磁性目标一般位于观测面以下, 当  $xOy$  面取水平面时,  $\hat{z}_0$  的取值应大于 0。同时, 本文在式(13)中还引入目前普遍采用的信噪比检验式(第

三式)作为解算结果可靠性判断准则, 式中的  $\alpha_0$  为欧拉窗口内  $\hat{z}_0$  的中误差,  $\tau$  取大于 1 的常数, 实际计算时, 可以对  $\tau$  进行动态调整, 使初步处理后的欧拉解分布能大致对应各磁性目标的磁异常。

欧拉方法解算出的参数解经过上述措施处理后, 得到的仍然是一群空间离散解, 需要根据这些离散解进一步求解磁性目标参数估值。由理论和实践可知, 同一磁性目标上方相邻几个欧拉窗口所得结果是比较集中的; 相反, 无磁性目标区域得到的解则较为分散。根据这一特征, 本文采用聚类分析方法对解算结果进行分类处理, 将满足聚类条件的解算结果归为一簇, 并将该簇空间位置重心作为磁性目标空间参数的估计值。本文聚类方案采用层次聚类方法, 分以下三个步骤:

(1) 初步分类。如果第  $i$  个欧拉解与第  $j$  个欧拉解平面位置距离  $d_{ij}$  小于给定阈值  $\omega$ , 则将第  $i$  和第  $j$  个欧拉解归为同一簇, 阈值大小视磁性目标尺度大小和采样分辨率而定。而某欧拉解与其他所有解的平面位置距离都大于给定的阈值时, 则称该欧拉解为孤立解, 孤立解的产生主要是因为欧拉窗口内未包含明显磁性目标所造成的伪解, 所以在初步分类的同时, 对孤立解应予以消除。

(2) 修正分类。初步分类消除了孤立欧拉解, 同时将平面距离较近的欧拉解归为一簇, 但由于采用条件较为严格的硬阈值法, 使得即使是相同磁性目标参数也归为不同簇, 造成分类过多, 为此提出软阈值法对初步分类结果进行融合处理。因为欧拉解平面坐标越接近磁性目标平面位置中心越为密集, 视欧拉解平面坐标总体由一定数量的正态分布混合而成, 借助统计检验理论判断两簇重心是否存在显著差异。假定  $G_i$  和  $G_j$  为初步分类后的两簇, 所包含的欧拉解个数分别为  $s_i$  与  $s_j$ , 且方差相同, 满足表达式(14)说明两簇无显著差异, 应合并为一簇, 否则认为两者来自不同的总体。

$$\left. \begin{aligned} |x_i - x_j| < t_{\alpha/2} \left( s_i + s_j - 2 \right) \sqrt{\frac{1}{s_i} + \frac{1}{s_j}} S_x \\ |y_i - y_j| < t_{\alpha/2} \left( s_i + s_j - 2 \right) \sqrt{\frac{1}{s_i} + \frac{1}{s_j}} S_y \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

式中

$$S_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{s_i} (x_{it} - x_i)^2 + \sum_{j=1}^{s_j} (x_{jt} - x_j)^2}{s_i + s_j - 2}}$$

$$S_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{s_i} (y_{it} - y_i)^2 + \sum_{j=1}^{s_j} (y_{jt} - y_j)^2}{s_i + s_j - 2}}$$

$(x_i, y_i)$  与  $(x_j, y_j)$  分别为  $G_i$  和  $G_j$  簇平面位置重心;  $(x_{it}, y_{it})$  与  $(x_{jt}, y_{jt})$  分别为  $G_i$  和  $G_j$  簇内第  $t$  个欧拉解平面位置坐标;  $t_{\alpha/2}(s_i + s_j - 2)$  为在置信水平  $\alpha$  下, 自由度  $s_i + s_j - 2$  时  $t$  分布临界值。

(3) 消除伪解并确定参数。初步分类结果经过修正分类后, 部分类簇所包含的欧拉解数目较多, 有些则较少。由于真实存在的磁性目标附近对应的欧拉解数目一定较多, 而包含欧拉解数目较少的类簇可能是由于噪声或微扰动异常所引起, 称其为“伪解”, 因此对于这些伪解应予以淘汰。由于磁性目标正上方的欧拉窗口及周边 8 个欧拉窗口计算的欧拉解通常是可信的, 即有效簇里的欧拉解至少应大于 9 个, 因此, 本文将欧拉解数目少于 10 个的簇予以淘汰。经过上述步骤处理后, 各类簇中欧拉解空间位置参数重心就对应磁性目标位置。

#### 4 实例计算与分析

为验证提出方法的可行性和有效性, 采用实测数据进行分析。

数据来源于 1999-04-15 美国加州磁探测试验, 测区中心  $(37.431^\circ \text{ N}, 122.185^\circ \text{ W})$ , 面积约  $100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$ , 试验采用的磁性目标主要是类鼓状物, 直径  $0.59 \text{ m}$ , 高度  $0.98 \text{ m}$ , 目标中心至地表深度介于  $0.5 \text{ m}$  与  $3 \text{ m}$  之间。测量中共布设 50 条测线(如图 2), 测线方式为  $45^\circ/315^\circ$  往返连续测量, 设计测线和测点间距分别为  $2 \text{ m}$  和  $0.3048 \text{ m}$ 。磁力仪采用灵敏度为  $0.01 \text{ nT}$  的 G-858 铯光泵磁力仪, 磁力仪观测面高度为  $0.9 \text{ m}$ 。

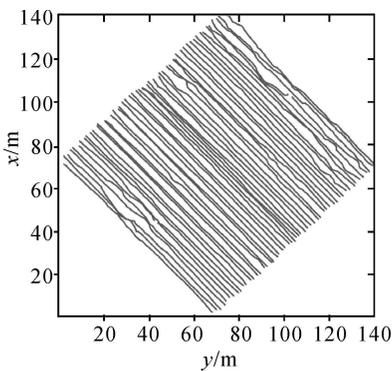


图 2 测线布设图

Fig. 2 Distribution of survey line

由于欧拉方法适用范围为正交坐标系, 在对获取的磁探测数据进行了粗差剔除、地磁日变改正和位置归算等数据预处理后, 为方便计算与分

析, 将测区顺时针旋转  $45^\circ$ , 并采用 kriging 法内插出分辨率  $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$  共计 10 000 个网格点数据。经各项处理后, 测区总场强度等值线如图 3 所示, 可见, 在探测区内明显存在两条东西向和南北向不明二度磁性体, 而磁性目标附近总场强度等值线与球体磁异常形状较为相似, 表明一定条件下可将三度体磁异常看作球体磁异常来处理。

经统计, 数据处理后磁场最大值  $50\,434.31 \text{ nT}$ , 最小值为  $48\,960.74 \text{ nT}$ , 平均值为  $49\,852.01 \text{ nT}$ 。设欧拉窗口同样为正方形, 边长为 11 个网格点长度 ( $10 \text{ m}$ ), 滑动步长为 1 个单位, 共有 7 921 个窗口。采用式(11)解算后欧拉解空间位置和构造指数三维分布如图 4 所示。

图 4 中欧拉解空间位置和构造指数三维分布总体较为杂乱, 部分区域分布较为集中, 为直观反映质量控制过程与结果, 采用位置参数平面分布图。取  $J=1, \tau=5$ , 用式(13)滤波后欧拉解共有 3 716 个有效解, 其分布如图 5(a) 所示, 显然, 滤波后欧拉解很好地对应了图 3 中的异常区域, 且二度体位置也得到了充分反映。本文仅对三度体质量控制方法进行了研究, 还未考虑二度体的质量控制方法, 为确定三度体相关参数, 首先提取二度体欧拉解计算结果, 并采用滑动平均方法确定其平面位置。二度体欧拉解提取后的分布如图 5(b) 所示, 共计 2 666 个欧拉解, 取  $\omega=0.2 \text{ m}$ , 消除其中孤立解后剩余有效解数目为 1 886 个, 经初次分类得 342 簇, 如图 5(c) 所示。设置信水平  $\alpha=0.05$ , 经  $t$  检验各簇重心差异性, 修正分类后共有 33 簇, 其中有 5 簇包含的欧拉解数目少于 10 个, 将其淘汰后欧拉解数目共有 1 856 个, 分为 28 簇, 如图 5(d) 所示, 各簇平面重心如图 5(e) 所示, 图中还同时列出了二度体平面位置滑动平均结果。

各磁性目标相关参数计算结果统计情况如表 1 所示。

根据布设磁性目标时已知先验信息, 在相互正交的两条直线上设置两组磁性目标, 其中第一组为第 21、22 与 20 号目标, 第二组为第 15、20、24 号目标。由于坐标系旋转不影响相互间位置关系, 可以利用表 1 中计算结果和两组目标先验信息, 检验平面位置计算结果精度。经过计算表明: 第 22 号目标至第 20 号与第 21 号目标连线的距离为  $0.07 \text{ m}$ , 第 20 号目标至第 15 号与第 24 号目标连线的距离为  $0.23 \text{ m}$ , 且两组目标平面坐标拟合的直线间夹角为  $89.32^\circ$ , 可以看出, 磁性

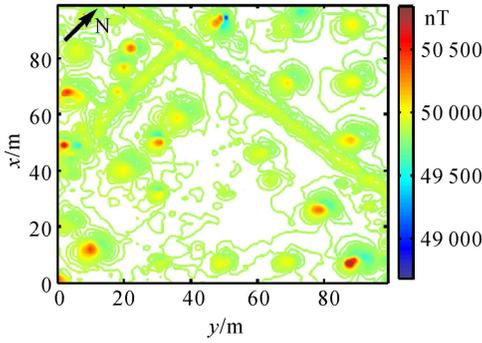


图 3 实测数据总场强度等值线图(等值线间隔 10 nT)  
Fig. 3 Contour map of total field of measured magnetic data (contour interval 10 nT)

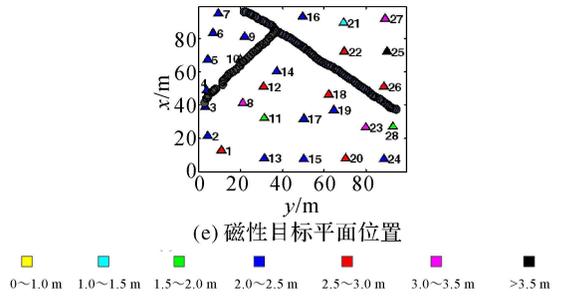
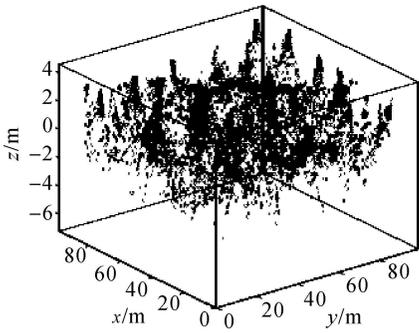
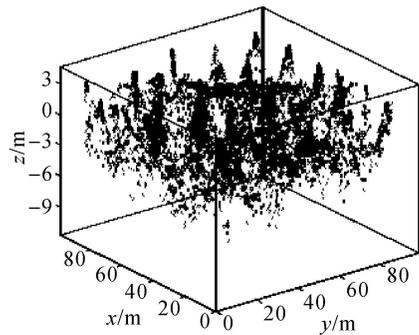


图 5 质量控制过程与结果

Fig. 5 Process and result of quality control



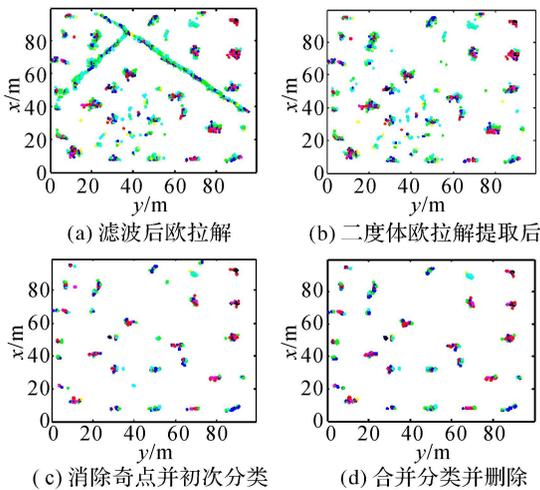
(a) 欧拉解空间位置三维分布图



(b) 构造指数三维分布图

图 4 欧拉解三维分布图

Fig. 4 3D distribution graph of Euler solutions



(c) 消除奇点并初次分类

(d) 合并分类并删除少于10点的簇

表 1 磁性目标参数计算结果

Tab. 1 Calculated results of sources parameters

目标序号	簇内点数/个	$\hat{x}_0/m$	$\hat{y}_0/m$	$\hat{z}_0/m$	$\hat{N}$
1	135	12.78	11.00	2.99	1.91
2	13	21.50	4.64	2.44	1.33
3	17	39.02	3.35	2.16	2.11
4	31	48.98	3.76	2.14	2.06
5	49	67.48	4.46	2.48	1.94
6	51	83.54	6.83	2.36	1.02
7	11	95.08	9.53	2.25	1.78
8	81	41.35	21.19	3.26	1.89
9	71	81.41	22.13	2.39	2.10
10	15	67.43	19.81	1.86	1.43
11	41	32.29	31.55	1.92	1.58
12	66	51.30	31.00	2.58	2.35
13	27	8.07	31.38	2.23	1.90
14	70	60.45	37.33	2.31	1.10
15	115	7.76	50.39	2.20	1.79
16	38	93.25	49.57	2.28	2.19
17	47	31.95	50.15	2.08	1.98
18	105	46.65	62.18	2.80	1.97
19	36	36.92	64.37	2.18	1.01
20	121	8.00	70.13	2.92	2.17
21	71	89.56	69.06	1.44	0.64
22	121	72.31	69.53	2.67	1.85
23	113	26.66	79.61	3.08	2.33
24	112	7.79	88.24	2.25	1.85
25	122	72.23	89.85	3.95	2.61
26	85	51.30	88.47	2.93	1.92
27	76	92.14	88.96	3.42	2.14
28	16	26.94	92.66	1.79	1.70

目标平面位置具有很高的计算精度。在深度计算方面,所有目标深度的平均值为 2.48 m,其中,第 10、11、21 和 28 号目标深度小于 2 m,最小值为 1.44 m;第 8、23、25 和 27 号目标深度大于 3 m,最大值 3.95 m,其余 20 个目标深度均介于 2~3 m 之间,深度计算结果与试验条件(磁力仪至目标深度介于 1.4~3.9 m 之间)同样相符。

## 5 结 论

本文从理论上推导线性背景场下磁性目标空间位置参数及构造指数欧拉回归解算方法,给出欧拉解的质量控制方案,结论表明:

(1) 在欧拉窗口中,将地磁场和其他磁性目标干扰异常联合影响视为线性变化,改进长期以来常规欧拉方法中将背景场当作常数来处理的做法;同时,提出的方法不再需要根据磁性目标先验信息来预先确定每一欧拉窗口的构造指数,而将构造指数作为动态参数代入欧拉方程一并求解,并采用线性回归方法解决欧拉方程的非线性问题,从而很大程度上消除欧拉解的发散性,提高磁性目标空间位置参数计算精度,改进的欧拉方法可以在复杂变化地磁场和多目标测区取得较好的应用效果。

(2) 根据构造指数和目标深度变化规律,提出发散解初步滤波方法,实测数据计算都表明:初步滤波后的欧拉解基本上分布在磁性目标位置附近,验证了该滤波方法的有效性和合理性。通过采用距离准则进一步消除孤立点,保留磁性目标对应平面位置较大密度的欧拉解,为有效实施聚类方案提供前提条件,经过初次分类和修正分类以及淘汰“伪解”后,极大程度上保证磁性目标参数的准确确定。

(3) 本文取得的初步研究成果实现了欧拉方法自动化处理,不仅可以应用于小尺度磁性目标探测中,还可应用于矿产、油气资源勘测以及地质地球物理调查等领域,从而拓宽欧拉方法的应用范围。但仍然存在一些细节问题需要继续深入研究,诸如相关阈值参数最优化确定、削弱噪声对深度计算结果的影响、二度体欧拉解的自动化质量控制方法以及更准确地实现欧拉解的“去伪存真”。

致谢:感谢 Geometrics 公司提供的磁探测数据。

## 参考文献:

- [1] KEATING P, PILKINGTON M. Euler Deconvolution of the Analytic Signal and Its Application to Magnetic Interpretation [J]. *Geophysical Prospecting*, 2004, 52(3): 165-182.
- [2] SALEM A, HAMADA T, ASAHINA J K. Detection of Unexploded Ordnance (UXO) Using Marine Magnetic

Gradiometer Data [J]. *Exploration Geophysics*, 2005, 58(1): 97-103.

- [3] YU Bo, ZHAI Guojun, LIU Yanchun, et al. The Downward Continuation Method of Aeromagnetic Data to the Sea Level [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2009, 38(3): 202-209. (于波,翟国君,刘雁春,等.利用航磁数据向下延拓得到海面磁场的方法[J].*测绘学报*, 2009, 38(3): 202-209.)
- [4] REID A B, ALLSOP J M, GRANSEER H, et al. Magnetic Interpretation in Three Dimensions Using Euler Deconvolution [J]. *Geophysics*, 1990, 55(1): 80-91.
- [5] BARBOSA V C, SILVA J B, MEDEIROS W E. Stability Analysis and Improvement of Structural Index Estimation in Euler Deconvolution [J]. *Geophysics*, 1999, 64(1), 48-60.
- [6] GUAN Zhiming. *Magnetic Field and Magnetic Exploration* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2005. (管志宁. *地磁场与磁力勘探* [M]. 北京:地质出版社, 2005.)
- [7] HSU S K. Imaging Magnetic Sources Using Euler's Equation [J]. *Geophysical Prospecting*, 2002, 50(1): 15-25.
- [8] WILLIAMS S E, FAIRHEAD J D, FLANAGAN G. Comparison of Grid Euler Deconvolution with and without 2D Constraints Using a Realistic 3D Magnetic Basement Model [J]. *Geophysics*, 2005, 70(1): 13-21.
- [9] STAVREV P Y. Euler Deconvolution Using Differential Similarity Transformations of Gravity or Magnetic Anomalies [J]. *Geophysical Prospecting*, 1997, 45(2): 207-246.
- [10] GERALD D F, REID A, MCINERNEY P. New Discrimination Techniques for Euler Deconvolution [J]. *Computers and Geosciences*, 2004, 30(5): 461-469.
- [11] HANSEN R O, SUCIU L. Multiple Source Euler Deconvolution [J]. *Geophysics*, 2002, 67(3): 525-535.
- [12] YAO Changli, GUAN Zhiming, WU Qibing, et al. An Analysis of Euler Deconvolution and Its Improvement [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2004, 28(2): 150-155. (姚长利,管志宁,吴其斌,等.欧拉反演方法分析及实用技术改进[J].*物探与化探*, 2004, 28(2): 150-155.)

(责任编辑:宋启凡)

收稿日期: 2010-04-19

修回日期: 2010-12-27

第一作者简介: 卞光浪(1984—),男,博士生,研究方向为海洋磁力测量数据处理理论与方法。

First author: BIAN Guanglang (1984—), male, PhD candidate, majors in marine magnetic surveying data processing.

E-mail: jsbgl@163.com