

欧拉反演方法分析及实用技术改进

姚长利¹, 管志宁¹, 吴其斌³, 张聿文¹, 刘浩军^{1,3}

(1. 中国地质大学 地下信息探测技术与仪器教育部重点实验室, 北京 100083 2. 国土资源部 信息中心, 北京 100812 3. 中国国土资源航空物探遥感中心, 北京 100083)

摘要: 欧拉反演是重磁资料反演解释的重要方法。在深入研究的基础上, 针对欧拉反演存在的问题提出了具体的技术措施: 水平梯度滤波准则、距离约束评价准则、聚集度约束评价准则等方法, 从而使三维欧拉反演的适用能力得到很大加强, 使欧拉反演方法技术进入实用化阶段。

关键词: 欧拉反演, 水平梯度滤波准则, 距离约束评价准则, 聚集度约束评价准则

中图分类号: P631 文献标识码: A 文章编号: 1000-8918(2004)02-0150-06

欧拉反演方法又称欧拉反褶积, 是近十多年发展起来的一种自动估算场源位置的位场反演方法。它是以欧拉齐次方程为基础, 运用位场异常、空间导数以及各种地质体具有特定的“构造指数”来确定异常场源的位置。它有如下特点: ①反演时无需知道场源物性(密度或磁性)的先验知识, 不需要准确的解释模型, 只要事先确定出与场源性质有关的构造指数; ②方法简明、快速, 只需利用重磁异常及其导数就可以进行反演, 快速而有效地圈出异常源的基本轮廓, 尤其适合于大面积位场数据的分析和解释, 因此该反演方法近年来成为位场反演方法研究的一个热点。20 世纪 90 年代以来, 地球物理学家在该领域开展了较为深入的研究, 几乎每年国际上权威的地球物理学术刊物都发表有关于该方法研究和应用的学术论文。在应用方面, 20 世纪 80 年代中后期, 欧拉方法已得到了较为广泛的应用, 尤其适用于大面积重磁测量数据的解释。

然而, 在理论研究与实际应用中, 欧拉方法仍有一些问题或弊端没有得到很好解决, 主要包括: ①在多数情况下, 反演出的异常源参数出现发散的现象, 使解释人员无法真正识别和确认异常源分布, 缺乏消除发散反演的有效措施; ②以往的研究主要是针对单一场源, 当存在多个异常源(尤其是异常源之间的距离较小)时, 用单一场源的欧拉方法不能准确地确定出异常源的位置, 有时甚至会出现虚假的结果。然而, 从目前国内外的研究现状看, 在理论和

方法上尚缺乏对同时反演多个场源参数组合模型的研究; ③欧拉方法中构造指数是一个极为重要的参数, 了解构造指数的变化规律以及如何正确地选择它, 对欧拉方法的反演效果将产生直接影响, 也对其应用的范围产生很大的约束, 因此需要对该方法进行丰富和完善, 使其达到实用程度。作者在充分掌握欧拉反演理论基础上, 采用有效技术措施, 使欧拉反演的能力得到很大提高, 得以满足实用要求。

1 欧拉反演方法理论与基本公式

位场在场源之外满足 Laplace 方程, 一些特殊形状场源的位场为 N 阶齐次方程, N 阶齐次方程也满足欧拉方程, 其表达式为

$$r \nabla T = -NT. \quad (1)$$

式中 r 为场源点到观测点的距离向量, T 是位场异常, N 是方程的阶数。该方程的一个解为

$$T = k/r^N. \quad (2)$$

在重磁异常情况下, k 为一常数, N 可认为是异常幅值随距离增大的衰减速率。

针对任意起伏地形, 将位场异常视为区域场与点源场之和, 则具体的欧拉方程(1)式可表示为

$$\begin{aligned} & (\ell^{(1)} - \ell_0^{(1)}) \frac{\partial T}{\partial \ell^{(1)}} + (\ell^{(2)} - \ell_0^{(2)}) \frac{\partial T}{\partial \ell^{(2)}} + \\ & (\ell^{(3)} - \ell_0^{(3)}) \frac{\partial T}{\partial \ell^{(3)}} = N(B - T). \end{aligned} \quad (3)$$

式中 $(\ell^{(1)}, \ell^{(2)}, \ell^{(3)})$ 为观测点的笛卡儿坐标系的 3

个正交坐标轴 $(l_0^{(1)}, l_0^{(2)}, l_0^{(3)})$ 为场源中心点的坐标, $\frac{\partial T}{\partial l^{(1)}}$ 、 $\frac{\partial T}{\partial l^{(2)}}$ 、 $\frac{\partial T}{\partial l^{(3)}}$ 为位场异常 T 在 $l^{(1)}$ 、 $l^{(2)}$ 、 $l^{(3)}$ 方向的梯度; N 为构造指数; B 为区域场或背景场。

无论观测面是否水平, 都将坐标系的 2 个坐标轴设置成水平, 并恒定不变, 这样 $(l^{(1)}, l^{(2)}, l^{(3)})$ 、 $(l_0^{(1)}, l_0^{(2)}, l_0^{(3)})$ 通常表示成 (x, y, z) 、 (x_0, y_0, z_0) 。

如果能测量或计算出位场异常及其梯度值, 方程 (3) 只有 5 个未知数 $l_0^{(1)}$ 、 $l_0^{(2)}$ 、 $l_0^{(3)}$ 、 B 和 N (或 x_0 、 y_0 、 z_0 、 B 和 N)。一般而言, 需要根据场源形状或有关异常性质的先验知识来选择构造指数 N , 这样, 可以利用 3 个或更多相邻观测点的数据, 组成一个观测移动数据窗口, 用于若干数据点构成的数据段。平面网格化数据通常为矩形数据窗口, 通过解方程 (3) 组成的线性方程组计算出场源位置。在整个异常区将观测移动窗口从一处移到相邻的另一处, 可以求得同一场源的多个解, 这些解汇聚的位置可以被认为是场源中心点的位置。

理论研究表明, 对于一些形状规则的异常源, N 为恒定的正整数, 如均匀磁化水平圆柱体为 2, 均匀磁化球体为 3, 均匀质量水平圆柱体为 1 等。对于这些异常源, 若能正确地选择 N , 则利用该方程能够非常准确地求出异常源的位置, 但若选择错误的 N 将会导致解的发散。此外, 对于那些 N 值不随场源至观测点距离变化而明显变化的异常源来说, 也有可能根据单一场源的异常计算出所有未知数 (x_0 、 y_0 、 z_0 、 B 和 N)。但是, 当异常源的 N 值随场源至观测点距离变化显著时, 该方法的应用受到了一定的局限。此时, 如果仍取固定的 N 值来计算异常源的位置, 则大部分解发散。在这种情况下, 需要对 N 值随场源至观测点距离的变化规律和特征进行研究, 选择合理的观测点距离方能得到可靠的解。

2 欧拉反演方法关键技术及措施

我们通过从理论上分析和探讨欧拉方程场源参数解的稳定性问题, 得出: ①当重磁场的水平梯度值太小 (接近于 0) 时, 易造成解的不稳定性; ②对于同样大小的窗口, 其所处位置不同时, 计算出的解也相差甚大。若取的移动窗口大体上能覆盖场源产生的主体异常, 则得到的场源位置解就接近理论值, 但当移动数据窗口位于异常尾部时, 梯度值往往偏小或变化不大 (近于一个小的常数), 这时计算出的解易于发散; ③构造指数 N 值选择很重要, 它决定了反演的场源深度和位置的准确性。因此, 如何选取移

动窗口大小、位置以及构造指数 N 值, 是取得正确的欧拉解的关键所在。

为了克服上述困难, 我们提出针对性的技术措施: 水平梯度滤波、有效性统计筛选方法。

2.1 水平梯度滤波方法

该方法的基本思路是, 计算测网区域内的水平梯度值的模, 运用适当的滤波准则, 滤掉那些水平梯度模较小的区域, 从而选择出水平梯度模较大的区域参与反演。这样, 既可以消除虚假的解而得到稳健的解, 又可以减少解的数量。具体方法如下。

设 H_i 为测区内任意测点 (网格点) i 的重磁异常水平梯度模, n 为整个测区网格点的总数, 则整个测区重磁异常水平梯度模的平均值为 $H_A = H_i/n$ 。按照 $H_i \geq kH_A$ 的滤波准则, k 为系数, 选择相应的网格点构成欧拉反演的区域, 一般选择 $0.5 \leq k \leq 1.5$ 。

在实际计算中, 采取对反演结果进行区域检查的后验方法, 确定结果的取舍, 这样更加方便。

2.2 有效性统计筛选方法

欧拉反演的使用条件是欧拉齐次方程, 当模型类型满足条件时, 反演是准确的。但实际应用中, 由于场源本身形态复杂、多体叠加有其它干扰, 这种条件或多或少难以满足, 其结果是造成构造指数的变化。而如果选择了错误的构造指数, 会使解发散, 从而造成反演结果不好。实际资料计算中, 由于数据范围较大, 异常类型多样, 采取单一的构造指数, 必然会使大多数结果因发散而无效, 所以, 必须采取必要的措施。一种方法是将目标异常提取出来, 作为孤立场源进行确定的构造指数的反演, 但场源异常的提取是有很大难度的, 这是由位场的本质特点决定的。另一种方法则是针对大面积数据形式, 采取变化的多构造指数, 但须加上自动识别真伪的技术, 进行有效筛选。通过多构造指数, 将不同类型的场源反映出来, 根据反演结果本身的性质做文章, 通过有效的评价技术, 去伪存真, 筛选出有效结果。具体有以下几条原则。

2.2.1 主体异常距离准则

据位场理论, 密度体或磁性体产生的重磁异常, 尽管磁性体还受磁化方向的影响 (可以通过化极减弱或消除这种影响), 但主要部分总是分布在场源的附近。为研究方便, 我们称该密度体或磁性体产生的重磁异常主要部分为主体异常 (一定距离外的), 邻近干扰体产生的重磁异常则为干扰异常。在实际欧拉反演情况下, 由于干扰的影响, 不同移动窗口反演结果就会有差异, 但只要移动窗口覆盖主

体异常,受干扰的影响必然会最小。当反演的结果位置离滑动窗口近(甚至在数据窗口里面)时,反演的结果(推测场源)是主体异常,结果应该是可靠的;反之,反演的结果离窗口远时,结果的可信度低,应将其淘汰。因此,我们在具体反演时可以选择一个距离准则:较近的反演结果保留,而较远的被淘汰。这种淘汰策略是有理论基础的,且非常容易操作,可以利用这处原则来提高反演的质量。图1是滑动窗口及其有效区域示意,星号为可能的反演结果分布位置。这种借助于主体异常概念,依据反演结果与数据窗口的距离关系对反演进行评价筛选的方法,被称之为主体异常距离准则。实际情况是复杂的,在大片实际数据中选取各个主体异常是不现实的,这里采取的评价手段,既避免了主体异常选取的困难,又达到了选取的效果。

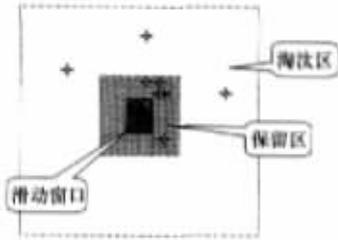


图1 滑动窗口有效性区域示意

该距离准则是在反演过程中判断计算结果的有效性,从而进行保留与淘汰选择的。

2.2.2 反演结果的聚散度准则

如果构造指数选择正确,在真实场源上方,相邻多个滑动窗口所得到的结果是比较集中的;反之,如果构造指数选择不正确,或不在真实场源上方,多个滑动窗口所得到的结果就没有相关性,或相关性不强,因而会比较分散。据此,当选择某个构造指数进行反演,在上述距离准则和水平梯度准则筛选淘汰后,聚集度高的反演结果必然是可信度高,对此需保留,否则可被淘汰。保留的结果对应该构造指数下的特定场源,这就是聚散度准则。图2是聚散度示意,计算过程中对每一个反演结果的聚散度进行评

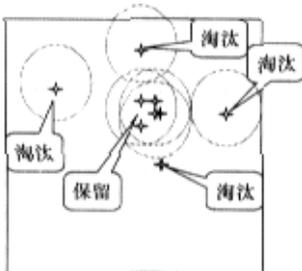


图2 聚散度示意

价,即给定一个作用半径,统计该半径作用的圆周内有多少反演结果。在实际的组合场源情况下,不同的构造指数会突出不同类型的场源,为了将各种类型的场源都反演出来,我们采取多构造指数对数据滑动窗口重复进行扫描,并使不同类型的场源都得到反映。

与反演结果的距离准则不同,聚散度准则是在反演后再判断计算结果的有效性,做保留与淘汰的选择。下面以模型和实际资料的计算说明其作用。

3 模型研究

同样的模型,磁异常在形态上远比重力异常复杂。这里,我们以磁异常模型为例,对欧拉方法改进的效果进行评价。

3.1 简单模型

图3中,等值线是水平地形下倾斜磁化的三维等轴状地质体模型(小正方体)产生的 ΔT 磁异常,模型的顶面深度为7,中心深度为7.2。对于近似等轴状的孤立模型这种情况,常规欧拉反演就可以很好地确定其位置,这里不再讨论准确地确定出构造指数情况下的反演结果。

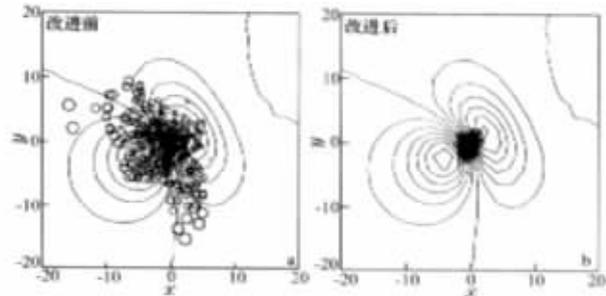


图3 变构造指数(2~3)的欧拉反演结果

计算中取构造指数变化范围为2~3(对应的磁场源相当于从二度体变化到三度体,与野外实际情况对应,具有一般性意义),滑动窗口大小为 3×3 ,滑动中移动步长为1个单位。图3a是没有采取上述3条准则的常规反演结果,图中的小圆圈表示场源位置,其直径大小表示场源深度。可以看出,结果很分散,这是由四周边缘非主体异常窗口的反演和错误构造指数共同作用的反演结果,反演出的场源深度范围为0.76~24.03,误差很大;图3b是改进后的反演结果,反演出的深度范围为4.48~7.18,有明显的改善,场源位置也更集中,更准确。

3.2 复杂模型

图4a为水平地形下倾斜磁化的三维复杂地质体模型分布情况;图4b中该模型产生的 ΔT 磁异常

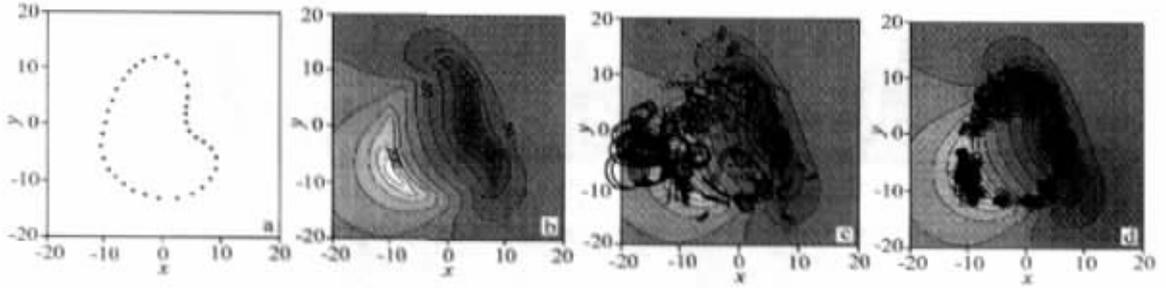


图 4 水平地形倾斜磁化三维复杂地质体模型 ΔT 磁异常欧拉反演结果

a—模拟 36 边形无限延深直立柱体(深度 4)的位置,倾斜磁化(磁化倾角 30° , 偏角 60°) ; b— ΔT 磁异常(磁化倾角 30° , 偏角 60°) ; c—改进前的效果(深度为 0.10 ~ 50.42) ; d—改进后的效果(深度为 2.92 ~ 5.30)

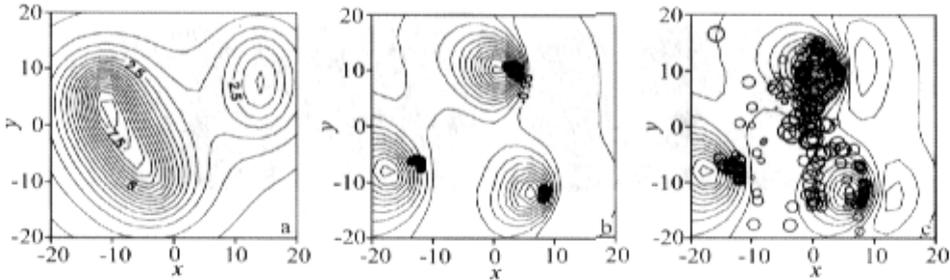


图 5 起伏地形复杂磁化三维组合等轴状地质体模型 ΔT 磁异常欧拉反演结果

地形最大坡度大于 45° 地质体的位置分别在 $(-12, 6, 7)$ 、 $(4, 10, 6)$ 、 $(8, -12, 6)$ 模型为倾斜磁化(左边模型磁化倾角 30° , 偏角 60° ; 上边模型磁化倾角 45° , 偏角 90° ; 下边模型磁化倾角 60° , 偏角 120°) ΔT 磁异常(磁化倾角 45° , 偏角 90°)。a—起伏地形 b—反演结果(图中小黑点为场源位置) ; c—必要的改进技术措施之前反演计算结果

等值线。比较改进前(图 4c),用距离准则、聚散度准则以及水平梯度准则反演出的结果(图 4d)很好地再现了岩体的边界(图中小黑点位置)。

3.3 组合模型

由单体的研究可以看出,约束判断准则在单体反演中具有很好的效果。这些评价准则只对反演结果进行评价,不涉及复杂的运算,另外,将该评价标准应用到实际资料情况下的多体反演,不存在技术上的困难。聚散度准则依据的是统计理论,它含有“真实再现”的简单道理。主体异常距离准则实际上就是自动地选择场源的附近区域进行反演,在某种程度上它包含水平梯度选择的功能;组合场源相互干扰严重的区域主要是两者中间区域,这样的区域在反演中,被主体异常距离准则淘汰的概率是比较大的,如果场源之间的距离已经近得难以区分主体异常,实际上是一个等效异常了(图 4a 中的直立 36 棱柱体,显然已不是简单的三度体了)。图 4 已表明了采用统计性方法等约束技术可以取得好的结果。统计理论本身就是在研究复杂问题中诞生的,复杂问题很难用确定的方法研究,统计理论重视的不是具体的变化的表面现象,而是隐藏的事物的本质特征。大面积磁测资料中包含各种场源的复杂信息,所以统计性的技术应该能发挥作用。下面我们

应用该方法技术对组合模型进行计算试验。

图 5a 为起伏地形,图 5b 为起伏地形下复杂磁化(各模型的磁化方向不同)的三维组合地质体模型(小立方体) ΔT 磁异常等值线图及反演的结果,场源的位置很清楚(图中小黑点位置)。

比较反演结果:理论场源 1 位置 $(-12, -6, 7)$, 磁化方向 $(30^\circ, 60^\circ)$, 反演结果 $(-13.32 \sim -11.98)$, $(-7.31 \sim -5.67)$ $(6.91 \sim 7.63)$, 平均值 $(-12.65, -6.49, 7.27)$; 理论场源 2 位置 $(4, 10, 6)$, 磁化方向 $(45^\circ, 90^\circ)$, 反演结果 $(2.12 \sim 4.34)$ $(8.79 \sim 11.14)$, $(5.50 \sim 7.53)$, 平均值 $(3.23, 9.96, 6.52)$; 理论场源 3 位置 $(8, -12, 6)$, 磁化方向 $(60^\circ, 120^\circ)$, 反演结果 $(7.98 \sim 8.84)$ $(-12.81 \sim -10.87)$ $(5.09 \sim 7.88)$, 平均值 $(8.41, -11.84, 6.48)$ 。

图 5c 是没有采取统计筛选等约束评价准则措施进行反演的结果,实际上已无法将场源位置明显地识别出来了,其反演范围 $(-15.91 \sim 8.80)$ $(-18.76 \sim -16.57)$ $(0.19 \sim 20.12)$, 误差很大。

4 实际资料处理及分析

图 6a 是我国云南某地实际航磁数据,测区范围约 $250 \text{ km} \times 50 \text{ km}$,磁异常范围 $(-342.7 \sim 482.7 \text{ nT})$ 。除边部无数据区插值出的假异常外,从异常

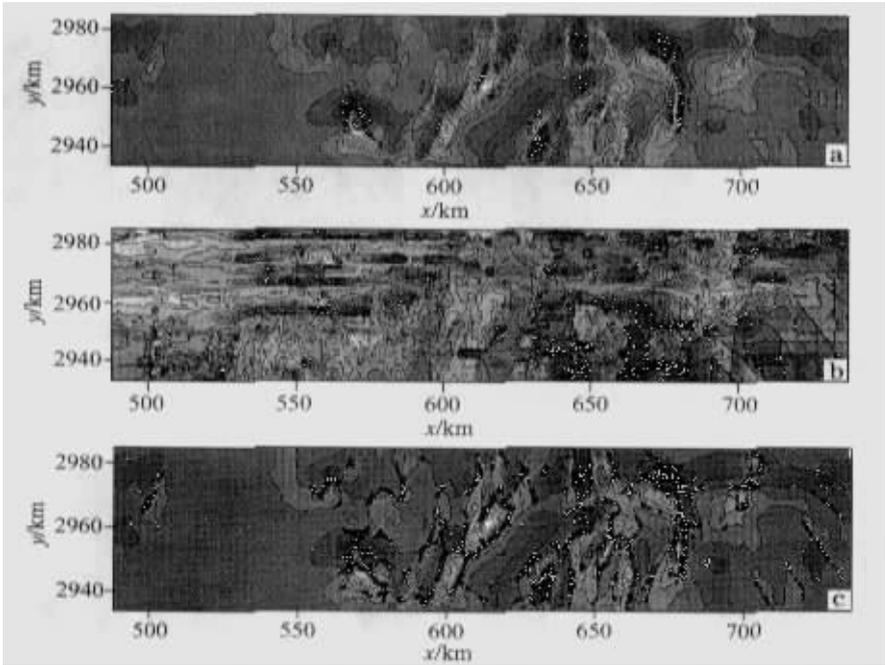


图6 云南某地航磁资料反演结果

a—航磁 ΔT 原始数据 b—起伏观测面 c—反演结果

分布来看,既有近似等轴状的异常,又有一定走向的狭长磁异常,表明场源类型比较复杂,近似二维场源和三维场源都有分布,另外,较低纬度的磁化方向对磁异常形态的影响明显可见。图6b中观测起伏面数据,它是由通过GPS和雷达进行定位得到的,从图上可以看出,起伏观测面过于复杂,给后续计算带来较大干扰。

为了进行欧拉反演,需要原始观测数据转换得到其各阶导数,但是,仅有起伏地形上的总场磁异常,转换其导数是一件十分困难的研究工作,虽然我们进行了一些研究,但尚没有严格而成熟的方法技术,所以,只能依据水平面网格数据的转换处理方法计算出观测磁异常的各阶导数,这是在做实际资料计算中面对的一个问题,其误差有时是不容忽视的。

图6c为反演结果,可以看出,改进后的方法既克服了传统欧拉反演结果的分散无序状况,又将构造分布、走向及局部岩体的位置和范围较好地反映出来,为下一步的地质地球物理推断解释工作提供了重要的参考模型。

5 结论

欧拉反演方法在使用中,无需知道场源物性大小,对磁异常来说,不受磁化方向的影响,这种特点决定了该反演方法必然受到广泛重视,但过去欧拉反演要事先确定出与场源性质有关的构造指数,并且有很强的依赖性,使其使用效果受到很大影响,我

们在经过深入的理论分析的基础上,提出的针对性措施,不合理的构造指数所反演得到的结果会被淘汰,正确构造指数的反演结果自然得到保留,避免了过去众多研究集中在构造指数的复杂选择技术上的困难,避重就轻,从而使欧拉反演的适用能力得到很大加强,向实用迈出了坚实的一步。

尽管欧拉反演方法已有较大的改进,但还有一些需要解决的问题,最主要的就是欧拉反演需要重磁异常与其一阶导数共同构成反演方程,所以在同时测量重磁场及其导数的情况下会得到较好的结果,而没有导数观测,特别是在起伏地形条件下,应用欧拉反演会遇到一些困难,从而影响其计算精度。将来,随着仪器、观测手段的发展,多参数观测会促进反演技术的发展。

参考文献:

[1] Barbosa V C F, Silva J B C, Medeiros W E. Making Euler deconvolution applicable to ground magnetic surveys[J]. J Appl Geophys, 2000, 43: 55-68.

[2] Barbosa V C F, Silva J B C, Medeiros W E. Stability analysis and improvement of structural index estimation in Euler deconvolution[J]. Geophysics, 1999, 64: 48-60.

[3] Hansen R O, Suci L. Multiple-source Euler deconvolution[J]. Geophysics, 2002, 67: 525-535.

[4] Keating P B. Weighted Euler deconvolution of gravity data[J]. Geophysics, 1998, 63: 1595-1603.

[5] Reid A B, Allsop J M, Granser H, et al. Magnetic interpretation in three dimensions using Euler deconvolution[J]. Geophysics, 1990,

55 80 - 91.

- 1156.

[6] Silva J B C ,Barbosa V C F ,Medeiros W E. Scattering Symmetry , and bias analysis of source-position estimates in Euler deconvolution and its practical implications[J]. Geophysics ,2001 ,66 :1149

[7] Stavrev P. Euler deconvolution using differential similarity transformation of gravity and magnetic anomalies[J]. Geophysical Prospecting ,1997 ,45 :207 - 246.

AN ANALYSIS OF EULER DECONVOLUTION AND ITS IMPROVEMENT

YAO Chang-li¹ ,GUAN Zhi-ning¹ ,WU Qi-bin² ,AHANG Yu-wen¹ ,LIU Hao-jun^{1 3}

(1. Geo-detection Laboratory Ministry of Education China University of Geosciences ,Beijing 100083 ,China 2. Information Center ,Ministry of Land and Resources ,Beijing 100812 ,China ;3. China Aero Geophysical Survey and Remote Sensing Center for Land and Resources ,Beijing 100083 ,China)

Abstract : Euler deconvolution is an important inversion method for the interpretation of magnetic and gravity anomalies. In this paper , some problems related to the practical application of Euler deconvolution have been examined in detail and the improved Euler method has been put forward by introducing three new criteria , i. e. , horizontal gradients filtering criterion , distance constraint criterion and convergence constraint criterion.

Key words : Euler deconvolution , horizontal gradients filtering criterion , distance constraint

作者简介 :姚长利(1965 -)男 ,副教授。1991 年获中国地质大学(北京)应用地球物理专业硕士学位。现于中国地质大学(北京)地球物理与信息技术学院任教 ,主要研究方向为重、磁数据处理解释技术及相关的方法研究 ,已发表论文近 20 篇。



工程地震处理软件综合技术服务

核工业北京地质研究院物化探研究中心多年来一直从事浅层地震方法研究、地震数据采集系统开发及工程检测技术服务 ,并能够紧跟工程地质市场及一些特殊需要 ,开发合适的产品并完善技术服务。主要产品及服务内容 :

1. 多道瞬态瑞利面波处理软件包(Swsview)

随着工程勘查的发展及一些特殊工程评价的需要 ,近几年迅速发展起来的瞬态瑞利面波方法在工程勘查领域发挥越来越重要的作用。核工业北京地质研究院是最早开发瞬态瑞利面波处理软件的单位之一。该软件已被国内外仪器厂家采用 ,在许多工程中发挥了重要作用。到目前为止 ,已从原 DOS 版 FKSWSA 软件包发展到了界面十分友好的 Windows 版 Swsview 软件包。

2. CSP 地震浅反处理软件包

CSP 地震浅反处理软件自推出以来 ,得到了用户的广泛使用和支持 ,并被国内许多地震仪厂家采用。该软件已从原来的 3.0 版升级到 5.1A 版 ,深受用户好评。为适应工程市场的要求 ,最近推出了

CSP6.0 浅反处理软件(版权专有) ,以满足用户的需要。

3. 地脉动(采集)处理软件

该软件可以实现超长时数据采集和处理 ,动态波形显示和一般数据的频谱显示 ,实现实时动态观测。

4. 地震映像采集软件

为适应某些特殊工程的需要 ,专门开发了该软件 ,以直观模拟显示地下结构。

5. 技术咨询与服务

可根据用户特殊工程要求 ,开发合适的(采集)处理软件。本中心全面负责所有上述软件的技术咨询、培训及不断升级。

联系人 :徐贵来 梅汝吾

核工业北京地质研究院 邮编 :100029

E - mail :guilaixu@ 163bj. com

BP (010)96300 呼 382787

Tel : (010)64962690 64921115