

欧拉反褶积在重磁位场中应用与发展

王明^{1,2}, 骆遥^{1,2}, 罗锋^{1,2}, 田嵩^{1,2}

(1. 中国国土资源航空物探遥感中心, 北京 100083; 2. 中国国土资源航空物探遥感中心 对地观测技术工程实验室, 北京 100083)

摘要:介绍了欧拉反褶积方法原理, 概述了国内外近几十年地球物理学者对欧拉反褶积方法进行的一系列改进及相关问题研究取得的主要进展和成就, 并着重分析了构造指数的选取和欧拉解的稳定性等问题。通过分析指出了构造指数的正确选取、多场源混合叠加干扰和高阶次背景场研究及欧拉解的稳定性仍是今后欧拉反褶积方法研究重点和发展的主要方向, 这对解决欧拉反褶积在重磁位场资料解释实用化中具有重要意义。

关键词:欧拉反褶积; 构造指数; 发散解; 滑动窗口; 背景场

中图分类号: P631 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2012)05-0834-08

位场勘探方法是以不同岩、矿石之间物理性质差异(密度、磁性等)为物质基础, 通过探测和研究地球物理的空间与时间分布规律来寻找目标矿藏的一种方法。随着重磁技术方法的发展与提高, 位场资料处理和解释中如何准确推断构造体场源的边界、深度、产状、规模及场分布规律和性质等越来越受到重视, 重磁异常自动反演技术是位场资料处理和解释的重要组成部分。目前, 常用的方法有解析信号法(analytic signal, 或称总梯度模法)^[1-4]、温纳反卷积法(Werner deconvolution)^[5-9]、小波变换法(wavelet transform)^[10-16]和欧拉反褶积法(Euler deconvolution)^[17-20]等。地球物理研究者也一直努力地研究这些能自动化或半自动化处理和解释重磁位场资料的技术, 来提高位场资料反演的效率和实际应用效果。

欧拉反褶积方法是重磁位场数据处理和解释的重要方法, 既适用于重磁位场剖面数据, 又能利用网格数据快速地自动反演解释重磁位场资料, 并能在较少先验信息的情况下自动化或半自动化地确定场源位置、解释场源起因的方法; 可以有效地圈出构造体的范围, 推算出构造体的具体位置, 具有较强的适应性和灵活性、计算简便、结果直观等特点; 对大面积的重磁位场资料处理和解释具有潜在的优势和广泛的应用前景, 对推断构造体边界和位场资料解释成果提供了重要依据, 因而受到了广泛的关注。

1 基本理论及改进

自20世纪80年代中后期以来, 欧拉反褶积方法凭借着无需已知地质信息控制的优势得到了迅速发展及较为广泛的应用。欧拉反褶积方法最初是由Peters^[21]以欧拉齐次方程为基础理论, 利用方程中的构造指数来反演磁测数据场源深度和水平位置提出来的; Hood^[22]和Ruddock等^[23]分别讨论了借助于欧拉方程用实测垂直梯度数据计算点极子或点偶极子的深度和利用垂直梯度仪计算磁场的深度及构造指数(SI)等; Thompson^[17]提出了二维欧拉褶积反演方法(EULDPH), 在磁测数据的处理中引出了欧拉齐次方程, 用于剖面磁测资料的解释。

在笛卡尔坐标系中, 选取z轴向下为正, $z=0$ 为观测平面; x轴指向北, y轴指向东, 若函数 $f(x, y, z)$ 满足:

$$f(tx, ty, tz) = t^n f(x, y, z), \quad (1)$$

则称函数 $f(x, y, z)$ 是n阶齐次的。可以证明, 如果 $f(x, y, z)$ 是n阶齐次的, 并令 $t=1$, 则其满足:

$$x \frac{\partial f}{\partial x} + y \frac{\partial f}{\partial y} + z \frac{\partial f}{\partial z} = nf, \quad (2)$$

即为欧拉齐次方程(欧拉方程)。

设地质体场源 (x_0, y_0, z_0) 在观测点 (x, y, z) 处的位场函数 $f(x, y, z)$ 表达式为

$$f(x, y, z) = k/r^N, \quad N = 1, 2, \dots, \quad (3)$$

收稿日期: 2011-06-07

基金项目: 国家“863”计划重大项目(2006AA06A200)、中国地质调查局计划项目(1212011120189)和中国国土资源航空物探遥感中心对地观测技术工程实验室课题

其中, $r = \sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + (z-z_0)^2}$ 为观测点 (x, y, z) 到场源点 (x_0, y_0, z_0) 的距离; k 是与 x, y, z 无关的常数。方程(3)是 $n = -N$ 阶齐次的, 常见的规则重、磁场源都满足该方程的形式, 只是 N 不同而已。对于上述函数, 其必然满足:

$$(x-x_0) \frac{\partial f}{\partial x} + (y-y_0) \frac{\partial f}{\partial y} + z_0 \frac{\partial f}{\partial z} = -Nf(x, y), \quad (4)$$

N 为异常幅值随距离增大的衰减率, 与场源几何构造有关, 因此将 N 称为构造指数。不同地质体的构造指数也不同, 郭志宏^[20]指出场源水平位置与 N 值无关, 而场源垂直位置与 N 值呈线性相关。

设 $\partial f / \partial y = 0$, 则二维欧拉反褶积方程为

$$(x-x_0) \frac{\partial f}{\partial x} + z_0 \frac{\partial f}{\partial z} = -Nf, \quad (5)$$

若考虑区域场或背景场 B 的影响, 则上述方程可改写为

$$(x-x_0) \frac{\partial f}{\partial x} + z_0 \frac{\partial f}{\partial z} = -N(f-B). \quad (6)$$

无论是在理论上还是实用价值方面, Thompson^[17]提出的二维欧拉褶积反演方法均具有重要意义, 并奠定了后期欧拉反褶积方法的发展与应用的基础, 但其局限于剖面数据处理, 适用范围较窄, 且容易受到邻近异常场源的干扰等。Reid等^[18]将欧拉齐次方程与位场的异常函数相对应, 把二维欧拉褶积反演方法推广到三维网格情况, 扩大了欧拉反褶积方法的适用范围, 并实际应用到了美国中南部位场资料处理和解释, 则三维欧拉齐次方程表述式为

$$(x-x_0) \frac{\partial f}{\partial x} + (y-y_0) \frac{\partial f}{\partial y} + (z-z_0) \frac{\partial f}{\partial z} = -N(f-B). \quad (7)$$

虽然三维欧拉反褶积反演方法对位场网格数据自动反演解释具有较强的适应性和灵活性, 受到了地球物理学者的重视, 成为重磁场反演的一个热点, 但仍然存在一定的局限性。随着其应用范围的扩大, 许多地球物理学者开展了相关方面的深入研究, 在理论方法上提出了一些改进措施, 或与其他方法(希尔伯特变换、解析信号、Tilt 梯度等)相结合, 进一步改善欧拉反褶积反演方法, 提高实用性。

Mushayandebvu等^[24-26]利用欧拉齐次方程旋转变换性质不变的特点提出了二维扩展欧拉反褶积方法(2D extended Euler deconvolution), 能自动估算出磁剖面数据中的场源的位置、倾向和强度等, 有效地减少了发散解, 提高了场源位置及相关参数解的可

信度; Nabighian等^[27]对二维扩展欧拉反褶积算法进行了改进, 推广到三维空间, 其通过广义希尔伯特变换(generalized Hilbert transforms)来实现三维扩展欧拉反褶积方法(3D extended Euler deconvolution), 进一步提高了欧拉反褶积算法的稳定性, 虽然希尔伯特变换自身受到背景场的影响较小, 但需要较多的先验信息, 且异常形体判断的准确度对反演参数的精度有一定的影响。

$$(x-x_0) \frac{\partial f}{\partial x} + (y-y_0) \frac{\partial f}{\partial y} + (z-z_0) \frac{\partial f}{\partial z} + N(f-B) = \alpha \quad (8)$$

为三维扩展欧拉反褶积表达式;

$$(x-x_0) \frac{\partial H(f)}{\partial x} + (y-y_0) \frac{\partial H(f)}{\partial y} + (z-z_0) \frac{\partial H(f)}{\partial z} + NH(f) = \beta \quad (9)$$

为引入广义希尔伯特变换的三维扩展欧拉反褶积表达式。如果一个拉普拉斯方程的解满足 N 次欧拉方程, 同样也满足广义希尔伯特变换; α, β 为常量, 通常除 $N=0$ 外, α, β 是不存在的。基于希尔伯特变换扩展欧拉反褶积反演方法得到了众多地球物理学者的普遍认可, 关于这方面的研究及应用发展很快^[28-32], 如 Davis等^[31-32]利用基于希尔伯特变换的扩展欧拉反褶积法自动探测未爆炸物(UXO)的磁异常等。

Salem等^[33]将欧拉反褶积方法与解析信号法相结合, 提出了 AN-EUL 法, 其利用解析信号幅度的极大值可以直接估算出场源的深度及构造指数 N , 但 AN-EUL 法在计算过程中, 有求导容易受高频干扰的问题, 对测量的数据质量要求较高, 且反演向下有限延伸的场源时存在一定局限性。

$$N = \left(\frac{2|S_1| |S_0|^2 - |S_2| |S_0|}{|S_2| |S_0| |S_1| - |S_1|^2} \right)_{x=x_0, y=y_0} \quad (10)$$

为构造指数 N 表达式;

$$z_0 = \left(\frac{|S_1| |S_0|}{|S_2| |S_0| |S_1| - |S_1|^2} \right)_{x=x_0, y=y_0} \quad (11)$$

是场源深度 z_0 的表达式。其中, $|S_0|, |S_1|, |S_2|$ 分别表示位场异常解析信号幅度极大值、位场异常一阶导数解析信号幅度极大值及位场异常二阶导数解析信号幅度极大值。

由上述欧拉反褶积基本公式及改进后的不同形式的欧拉反褶积方程可以看出, 无论欧拉反褶积方程形式如何变换都是以欧拉齐次方程为基础的, 在重、磁位场异常数据和场源的几何参数之间建立了某种关系, 借助于位场异常、空间导数以及各种地质

体具有特定的 N 来估算位场异常场源的空间位置分布情况;而 N 的选取对欧拉反褶积反演结果有重要的影响,如何正确选取合适的构造指数,对欧拉反褶积反演是一个关键问题。

然而, Salem 等^[34-35]在 Tilt 梯度^[36]基础上提出了 Tilt-Euler 反演方法,克服了构造指数的选取及其所引入的误差干扰等问题。Tilt-Euler 方程如下:

$$k_x x + k_y y + k_z z = k_x x_0 + k_y y_0 + k_z z_0, \quad (12)$$

其中, k_x 、 k_y 、 k_z 分别是 Tilt 梯度沿 x 、 y 、 z 方向的导数。

由式(12)中可以看出, Tilt-Euler 方程中仅含未知场源坐标 (x_0, y_0, z_0) , 不包含构造指数 N , 避免了常规欧拉反褶积反演方法因构造指数选取正确与否影响了位场资料处理解释的结果, 且利用二阶求导, 可以自动估算出网格数据中场源的位置, 相对于利用三阶导数的某些方法具有潜在的优势, 但 Tilt-Euler 方程仍然面临着发散解的问题, 需采用有效的措施来压制和消除发散的欧拉解, 改善计算结果, 提高场源参数解的稳定性和收敛性。

Tilt-Euler 方法虽然在表达形式上与常规欧拉反褶积反演方法有所区别, 但实质没有发生太大改变, 在一定程度上, Tilt-Euler 方法推动了欧拉反褶积反演方法迈入了实用化阶段。

随着欧拉反褶积反演方法的广泛应用, 国内外地球物理学者针对其存在的制约着实用化的一些问题(如构造指数的选取、场源解的发散等问题)做了大量相关的研究工作^[17, 19-20, 37-59], 不断地提出新的方法技术加以改进验证, 努力的改善和提高欧拉反褶积的实用性。

2 构造指数选取

构造指数 N 是欧拉反褶积方法的重要参数, 许多地球物理学者针对构造指数的选取提出了一些改进方法和实用化技术。欧拉反褶积反演方法发展的初期, 构造指数的选取需要根据场源形状或有关异常性质的先验知识来判定。而在实际应用中, 由于地下地质体是未知的, 选择合适的构造指数是有困难的。对于构造指数不随场源至观测点距离变化而发生明显变化的场源来说, 可以依据人工经验和地质先验信息总结得到孤立场源的构造指数进行反演计算, 而对于构造指数随场源至观测点距离变化的场源, 若取固定的、经验获取的构造指数来计算场源的位置, 将会导致解的发散, 直接影响解释的结果。因此, 构造指数值选择的正确与否直接影响了场源深度反演解的准确性和稳定性。

构造指数实质上就是场源的形状参数, 目前在欧拉反褶积实际的应用过程中, 构造指数的选取主要包括人工选定和自动估算两种方式。人工选定构造指数要求对反演的位场异常数据及地质情况有一定的认知, 且地质情况较为简单, 才能达到预期的反演效果。实际上地质构造情况是场源类型多样, 形态复杂, 数据范围大, 且不同的构造指数对反演出场源的深度影响也是不同的, 正确选取合适的构造指数是有一定困难的。简单规则的地质体的构造指数与形体有一定的关系, 选取相对较容易。Ruddock^[23]等认为磁异常源的薄板、线源和点源构造指数分别为 1、2、3; Tompson^[17]认为对于极化的磁数据构造指数取值介于 0.5~3 之间是有效的, 构造指数取值大于 3 可以看作是多个场源叠加引起的; Reid 等^[18]认为岩床的构造指数取值为 1, 倾斜接触带的构造指数取值为 0; Fairhead 等^[54]认为规模较小断裂带构造指数取值为 0.2, 规模较大断裂带构造指数取值为 0.5。根据前人的研究和总结^[17-18, 20, 55](表 1), 对于形状规则的重磁异常场源构造指数 N 通常为—恒定的正值, 构造指数为负值的情况考虑的较少, Stavrev 等^[56]讨论了利用负值的构造指数来反演重力异常。人工选定构造指数不足之处是在不能准确地判断地质情况时, 特别是复杂地质构造情况下, 容易引入人为干扰等不确定因素, 无法快速准确地选取构造指数, 需要重复试验, 降低了反演效率, 并且在不同的研究中, 构造指数的取值也是不同的。

自动估算构造指数主要是从计算方法上进行改

表 1 常用的不同重、磁异常场源构造指数

场源类型	SI	点源 (球体)	柱体		台阶	薄板	厚板
			垂直	水平			
重力	V	$N-1$	1	0	0	0	-1.5 -1
	g	N	2	1	1	1	-0.5 0
	g_x	$N+1$	3	2	2	2	0.5 1
	g_y	$N+1$	3	2	2	2	0.5 1
	g_z	$N+1$	3	2	2	2	0.5 1
	g_{Ax}	$N+1$	3	2	2	2	0.5 1
	g_{Ay}	$N+1$	3	2	2	2	0.5 1
磁力	U	N	2	1	1	1	-0.5 0
	T	$N+1$	3	2	2	2	0.5 1
	T_x	$N+1$	3	2	2	2	0.5 1
	T_y	$N+1$	3	2	2	2	0.5 1
	T_z	$N+1$	3	2	2	2	0.5 1
	T_{Ax}	$N+2$	4	4	4	3	1.5 2
	T_{Ay}	$N+2$	4	4	4	3	1.5 2
	T_{Az}	$N+2$	4	4	4	3	1.5 2

注: V, g 代表重力位和重力异常, g_x, g_y, g_z 分别代表重力异常在 x, y, z 三个方向上的导数, g_{Ax}, g_{Ay} 代表重力水平导数和重力解析信号, U, T 代表磁位和磁异常, T_x, T_y, T_z 分别代表磁异常在 x, y, z 三个方向上的导数, T_{Ax}, T_{Ay} 代表磁异常水平导数和磁异常解析信号。

进,并借助于高性能的计算机加以实现,其最大优势是可以自动而快速准确地筛选出较合理的构造指数,提高了反演效率和反演效果。主要体现在:一是从欧拉反褶积公式自身出发,通过研究 x_0 、 y_0 、 z_0 构造指数 N 和背景场 B 之间的关系来实现;Tompson^[17] 通过估计构造指数 N 与场源深度 z_0 之间的最小标准偏差,来获取构造指数,但在实际应用中,还存在一定争议;Neil等^[57] 利用统计方法推断出构造指数;Barbosa等^[40-41] 对构造指数估计进行了改进与分析,提出了一种欧拉反褶积计算时构造指数自动估算的方法,通过研究欧拉方程中场位总场值 f 与背景场 B 之间最小线性相关,从而获取构造指数最佳解;Gerovska等^[42] 将构造指数当作未知数,避免了构造指数的选取;姚长利等^[19] 采用变构造指数对数据滑动窗口重复扫描方法使场源解更集中,更准确;郭志宏^[20] 将 Barbosa等^[40] 提出的场源构造指数自动估算的方法与其提出的异常位置及范围的自动识别与判断方法结合起来,形成一种具有一定智能化、针对网格区内不同类型和范围的异常能自动获取构造指数的实用化改进;鲁宝亮等^[58] 提出利用异常值自动估算构造指数的方法,通过建立欧拉超定方程组,计算出最佳构造指数;二是与其他方法相结合,优势互补,来达到自动估算构造指数的目的;Stavrev^[37] 利用差分相似变换(differential similarity transformations)来解决欧拉反褶积构造指数的多解性问题,Gerovska等^[60-61] 也作过相关方面的研究;Salem等^[33] 将欧拉反褶积方法与解析信号法相结合,利用解析信号幅度的极大值来自动推算构造指数;Gerovska等^[62] 提出的有限差分欧拉反褶积法,采用不同构造指数进行反演,来提高反演解的精度,减少误差;Salem等^[34-35] 又将欧拉反褶积方法与Tilt梯度相结合,直接解决了构造指数选取的难题,该方法无需已知场源的构造指数就能推断出场源边界和深度分布情况,根据方程式(12)所求出的场源参数(x_0 、 y_0 、 z_0),能快速自动估算出场源的构造指数 N ,避免了因构造指数选取导致欧拉反演解的发散和不稳定。

构造指数的选取由根据人工经验和地质信息来判定发展到了自动估算,提高了欧拉反演解的收敛性和稳定性及反演的效率和效果,推动了欧拉反褶积方法的实用化发展,许多地球物理学者做了大量的研究工作,取得了一定的成就,在此不一赘述。

3 欧拉解的问题

欧拉反褶积方法反演出的场源参数解具有非唯

一性、发散性等特点,这些局限性一直制约着欧拉反褶积方法的实用化发展。从欧拉反褶积基本公式中可以看出,公式中含有 x_0 、 y_0 、 z_0 、 B 四个未知变量,理论上可以解由未知量构成的四个线性方程进而得到场源参数解,但在实际计算过程中,人们通常是建立一个欧拉超定方程,利用最小二乘法来解出场源的空间位置分布情况,特别是当多个场源产生的异常相互叠加、相互影响时,容易产生虚假解(伪解),误差大,无法有效的识别和确认场源的分布情况。Neil等^[57] 针对如何获得相对稳定的最小二乘法解进行了讨论;范美宁等^[63] 改进了欧拉反褶积算法,把解欧拉方程的最小二乘问题转化成了解线性方程的问题,减少了计算量,提高了效率,同时也减少了误差传递的机会。通常消除虚假解(伪解)主要技术包括几个方面:估算深度标准偏差、保留卷积窗口之内或观测数据范围内的解、剔除异常信号的能量低于指定的阈值的解、考虑解的空间位置分布情况和利用低通滤波器进行滤波等,但这些做法很难准确地评估整体解的质量或聚散度。通过分析认为,能影响场源参数解的稳定性和收敛性,除了构造指数的选取外,还有欧拉反褶积理论自身因素、滑动窗口大小及位置等方面。当重磁场的水平梯度值太小(接近于0)时,也容易造成欧拉解的不稳定^[19]。

在欧拉反褶积运算过程中,要通过计算或测量位场异常场值在 x 、 y 、 z 三个方向的梯度数据—— $\partial f/\partial x$ 、 $\partial f/\partial y$ 、 $\partial f/\partial z$ 。而梯度数据特点是受背景场和邻近场源的干扰小,反映场源的边界特征明显。Marson等^[64] 提出利用重力数据的水平导数和垂直导数来减少计算结果的随机性;Zhang等^[65] 提出了张量欧拉反褶积,用于分析三度体地质结构的重力张量梯度数据;范美宁等^[66] 通过模型计算,证明了用导数或解析信号进行欧拉反演计算,可改善反演效果,提高反演结果的收敛性。国外关于利用梯度数据进行欧拉反褶积反演的研究比国内多,主要因为国内很难直接获得高精度的实测梯度数据,多数都是在实测的原始重磁场异常场值基础上,通过位场处理转换获取梯度数据;求导运算实质是一种高通滤波,对噪声和误差敏感是不容忽视的,无论是水平导数或是垂直导数都是如此,且高频成分的频率响应大于1的,当求导运算的次数越多,噪声也就不可避免地被放大得越多,数据越容易失真且稳定性越差,极易导致反演结果的发散和不稳定,影响了欧拉反演的场源参数解的收敛性,在一定程度上制约了欧拉反褶积在国内的实用化发展。通过不断自主研发,中国国土资源航空物探遥感中心先后于

1992年在湖南宁乡地区、1994年在内蒙古通辽地区、1998年在湖南桃源地区以及2003年底在东海某试验区等多次开展航磁水平梯度试验测量工作^[67],在国家高技术研究发展计划(863计划)资助下,最近又成功研制出具有完全自主知识产权的航磁全轴梯度勘查系统,并进行了试验飞行和试生产,这为通过实际测量的航磁数据研究应用欧拉反褶积反演方法奠定了基础。

为了压制背景场的影响,Tompson^[17]在欧拉方程中引入了一项未知的连续常数 B ,其不是一个固定值,可以通过最小二乘法求得;当 $N=0$ 时, B 视为干扰项,对欧拉反褶积的结果也是有影响的。为了避免产生发散解,Tompson还将背景场看作是零阶泰勒级数近似值,Gerovska等^[62]认为背景场取一阶泰勒近似值更为精确,Hsu^[68]、Gerovska等^[62]也将背景场作为常数来考虑。Stavrev^[39,69-70]、Gerovska等^[45,61]认为背景场是线性变化的,其中:Stavrev^[59]在差分相似变换基础上提出背景场与构造指数呈线性关系的欧拉算法;Dewangan等^[71]将背景场看做是非线性变化的;Hood^[22]就没有考虑背景场对欧拉反褶积的影响;范美宁^[55]通过改变欧拉方程的形式来消除背景场的影响。因此,地球物理学者对背景场的影响主要从将其视为固定常数、线性变化和非线性变化方面来研究,缺乏对高阶次模型的研究。

滑动窗口大小及位置的确定。窗口的大小与地质体或异常规模有关,需要依据实际地质构造情况,选取合适的窗口大小且大致上能覆盖场源产生的主体异常。原则上窗口越小,分辨率越高,尤其是多场源叠加情况。若窗口过小,对于规模较大的地质体或异常来说,反演结果与实际地质情况偏差会很大,不能真实反映地质构造情况,且对噪声也比较敏感;窗口过大,容易忽略掉部分有重要意义规模较小的异常。当滑动窗口移动到水平梯度变化很小的位置,反演的欧拉解也易于发散。史辉等^[72]分析了二维模型构造指数与欧拉反褶积结果的关系,提出了利用多个大小不同的滑动窗口进行多次覆盖的算法,采用统计学筛选法来剔除坏解,保留合理解。

关于消除欧拉解的发散性,提高稳定性,国内外学者除了有针对性在构造指数选取、引入梯度数据、背景场的压制等方面做了大量的相关研究工作外,也提出了采用其他方法或措施来实现。例如:Fairhead和Bennett^[54]提出利用拉普拉斯方程滤波方法来消除欧拉方程的发散解,Keating^[73]通过对引入误差函数的欧拉方程进行加权计算来消除由位场和低精度数据带来假频信号的干扰等,Davis和Li^[74]认

为可以利用异常数据的振幅信息来减少噪声和发散解对场源深度估算的干扰,Ugalde等^[50]提出了适应性比较强的聚类分析和内核密度估算技术来解决欧拉解的问题。

在理论证明和实际应用中,地球物理学者多数集中在建立单一场源模型的基础上开展研究的,缺乏对多个场源叠加组合模型的研究,实际地质情况复杂、场源类型多样,相互叠加、相互影响,用单一场源模型是无法真实准确的反映多场源组合模型的情况,容易产生误差和虚假的解。Hansen等^[75]提出适用于多场源的三维算法,并应用于理论数据和内华达州Gold Acres采矿区的解释,效果明显;姚长利等^[19]针对多场源欧拉反褶积存在的问题,提出了水平梯度滤波准则、距离约束评价准则以及聚集度约束评价准则等具体的技术措施和方法来解决,提高了三维欧拉反演的适用能力,推动了欧拉反褶积实用化研究。因此,今后需要加强多场源欧拉反褶积反演方法的研究。

4 结论

欧拉反褶积反演方法是重磁场数据处理和解释的重要方法,其最大优点是适应性强,不需要假设任何地质模型,能在较少先验信息的情况下借助于高性能的计算机自动化或半自动化地确定场源空间分布情况。虽然经历了几十年的研究和发展,欧拉反褶积反演方法在不断完善与提高,取得了一定的成就,越来越受到地球物理学者的关注,但实用化过程中仍然存在着局限性。

(1) Tilt-Euler方法对构造指数的选取是一大发展,其实质上是一种改进了的常规欧拉反褶积法,除具有常规欧拉反褶积的特点外,其优势在于无需场源物性的先验信息和已知场源的构造指数就能快速地估计出场源的边界和深度分布,并推算出场源的构造指数,避免了因构造指数选取不正确而产生的场源位置估计的误差。但Tilt-Euler方程仍然面临着压制和消除发散解的问题,且国内有关Tilt-Euler方法的研究较少,实际应用效果需要进一步研究验证。

(2) 欧拉反褶积方法反演出场源参数解的发散性和不稳定性,有待于更深入的研究,提高解的收敛性和实用效果。背景场的影响是不容忽视的,应加强高阶次背景场模型研究,尽可能的减少背景场带来的干扰。利用实测的航磁梯度数据开展欧拉反褶积反演方法研究,进一步提高场源参数解反演的精度及欧拉反褶积反演方法的实用性。

参考文献:

- [1] Nabighian M N. The analytic signal of two-dimensional magnetic bodies with polygonal cross-section; Its properties and use for automated anomaly interpretation[J]. *Geophysics*, 1972, 37(3): 507-517.
- [2] Nabighian M N. Additional comments on the analytic signal of two-dimensional magnetic bodies with polygonal cross-section[J]. *Geophysics*, 1974, 39(1): 85-92.
- [3] Nabighian M N. Toward a three-dimensional automatic interpretation of potential field data via generalized Hilbert transforms; Fundamental relations[J]. *Geophysics*, 1984, 49(6): 780-786.
- [4] Roest W R, Verhoef J, Pilkington M. Magnetic interpretation using the 3-D analytic signal[J]. *Geophysics*, 1992, 57(1): 116-125.
- [5] Werner S. Interpretation of magnetic anomalies of sheet-like bodies [J]. *Sveriges Geologiska Undersok.*, 1953, 43(6).
- [6] Hartman R R, Teskey D J, Friedberg J L. A system for rapid digital aeromagnetic interpretation[J]. *Geophysics*, 1971, 36(5): 891-918.
- [7] Jain S. An Automatic Method of Direct Interpretation of Magnetic Profiles[J]. *Geophysics*, 1976, 41(3): 531-541.
- [8] Hansen R O, Simmonds M. Multiple-source Werner deconvolution [J]. *Geophysics*, 1993, 58(12): 1792-1800.
- [9] Hansen R O. 3D multiple-source Werner deconvolution for magnetic data[J]. *Geophysics*, 2005, 70(5): 45-51.
- [10] Moreau F, Gibert D, Holschneider M, et al. Identification of sources of potential fields with the continuous wavelet transform: Basic theory [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1999, 104(b3): 5003-5013.
- [11] Hornby P, Boschetti F, Horowitz F G. Analysis of potential field data in the wavelet domain[J]. *Geophysical Journal International*, 1999, 137(1): 175-196.
- [12] Salliac D, Galdeano A, Gibert D, et al. Identification of sources of potential fields with the continuous wavelet transform: Complex wavelets and application to aeromagnetic profile in French Guiana [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2000, 105(b8): 5003-5013.
- [13] Martelet G, Salliac P, Moreau F, et al. Characterization of geological boundaries using 1-D wavelet transform on gravity data [J]. Theory and application to the Himalayas. *Geophysics*, 2001, 66(4): 1116-1129.
- [14] 陈玉东. 利用位场连续复小波变换识别磁异常(上)[J]. *物探化探计算技术*, 2003, 25(2): 113-118.
- [15] 陈玉东. 利用位场连续复小波变换识别磁异常(下)[J]. *物探化探计算技术*, 2003, 25(3): 220-225.
- [16] 陈玉东. 复小波变换反演重力异常[J]. *物探与化探*, 2003, 27(5): 354-361.
- [17] Thompson D T. EULDPH-a new technique for making computer assisted depth estimates from magnetic data[J]. *Geophysics*, 1982, 47(1): 31-37.
- [18] Reid A B, Allsop J M, Granser H, et al. Magnetic interpretation in three dimensions using euler deconvolution [J]. *Geophysics*, 1990, 55(1): 80-91.
- [19] 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.
- [20] 郭志宏. 航磁及梯度数据正反演解方法技术实用化改进及应用[D]. 北京: 中国地质大学, 2004.
- [21] Peters L J. The direct approach to magnetic interpretation and its practical application[J]. *Geophysics*, 1949, 14(3): 290-320.
- [22] Hood P J. Gradient measurements in aeromagnetic surveying[J]. *Geophysics*, 1963, 30(5): 891-902.
- [23] Reid A B. Euler Deconvolution, Past, Present and Future: A Review[G]//SEG Expanded Abstracts, 1995: 861-863.
- [24] Mushayandevu M F, Driel P V, Reid A B, et al. Magnetic imaging using extended Euler deconvolution[G]//SEG Expanded Abstracts, 1999: 400-403.
- [25] Mushayandevu M F, Driel P V, Reid A B, et al. Magnetic source parameters of two-dimensional structures using extended Euler deconvolution[J]. *Geophysics*, 2001, 66(3): 814-823.
- [26] Mushayandevu M F, Lesur V, Reid A B, et al. Grid Euler deconvolution with constraints for 2D structures [J]. *Geophysics*, 2004, 69(2): 489-496.
- [27] Nabighian M N, Hansen R O. Unification of Euler and Werner deconvolution in three dimensions via the generalised Hilbert transform[J]. *Geophysics*, 2001, 66(6): 1805-1810.
- [28] Jeffrey D, Phillips. Two-step processing for 3D magnetic source locations and structural indices using extended Euler or analytic signal methods[G]//SEG Expanded Abstracts, 2002: 727-730.
- [29] Reid A B, FitzGerald D, Flanagan G. Hybrid Euler magnetic basement depth estimation; Bishop 3D tests[G]//SEG Expanded Abstracts, 2005: 671-673.
- [30] Jeffrey D, Phillips. Estimating structural dip from gravity and magnetic profile data[G]//SEG Expanded Abstracts, 2010: 1202-1206.
- [31] Davis K, Li Y, Nabighian M N. Automatic detection of UXO magnetic anomalies using extended Euler deconvolution[C]//SEG Expanded Abstracts, 2005: 1133-1136.
- [32] Davis K, Li Y, Nabighian M N. Automatic detection of UXO magnetic anomalies using extended Euler deconvolution [J]. *Geophysics*, 2010, 75(3): 13-20.
- [33] Salem A, Ravat D. A combined analytic signal and Euler method (AN-EUL) for automatic interpretation of magnetic data[J]. *Geophysics*, 2003, 68(6): 1952-1961.
- [34] Salem A, Smith R. Generalized magnetic tilt-Euler deconvolution [C]//SEG Expanded Abstracts, 2007: 790-794.
- [35] Salem A, Williams S. Interpretation of magnetic data using tilt-angle derivatives[J]. *Geophysics*, 2007, 73(1): 1-10.
- [36] Miller H G, Singh V. Potential field tilt: A new concept for location of potential field sources [J]. *Journal of Applied Geophysics*, 1994, 32(2): 213-217.
- [37] Hsu S, Sibuet J, Shyu C. High-resolution detection of geologic boundaries from potential field anomalies: An enhanced analytic signal technique[J]. *Geophysics*, 1996, 61(2): 373-386.
- [38] Barbosa V C F, Silva J B C, Medeiros W E. New criterion for selecting the structural index in Euler deconvolution[G]//SEG Expanded Abstracts, 1997: 539-543.
- [39] Stavrev P. Euler deconvolution using differential similarity transfor-

- mations of gravity or magnetic anomalies[J]. *Geophysics Prospect*, 1997, 45(2): 207-246.
- [40] 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(1): 48-60.
- [41] Barbosa V C F, Silva J B C, Medeiros W E. Making Euler deconvolution applicable to small ground magnetic surveys[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2000, 43(1): 55-68.
- [42] 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(4): 1149-1156.
- [43] Keating P, Pilkington M. Euler deconvolution of the analytic signal and its application to magnetic interpretation [J]. *Geophysical Prospecting*, 2004, 52(3): 165-182.
- [44] Smith R S, Salem A. Imaging depth, structure, and susceptibility from magnetic data; The advanced source-parameter imaging method[J]. *Geophysics*, 2005, 70(4): 31-38.
- [45] Gerovska D, Araúz-Bravo M J. Automatic interpretation of magnetic data based on Euler deconvolution with unprescribed structural index[J]. *Computers & Geosciences* 2003, 29(8): 949-960.
- [46] Florio G, Fedi M, Pasteka R. On the application of Euler deconvolution to the analytic signal[J]. *Geophysics*, 2006, 71(6): 87-93.
- [47] Fedi M, Florio G. SCALFUN: 3D analysis of potential field scaling function to determine independently or simultaneously Structural Index and depth to source[G]//SEG Expanded Abstracts, 2006: 963-967.
- [48] Fedi M. DEXP: A fast method to determine the depth and the structural index of potential fields sources[J]. *Geophysics*, 2007, 72(1): 1-11.
- [49] Mikhailov V, Galdeano A, Diamant M, et al. Application of artificial intelligence for Euler solutions clustering [J]. *Geophysics*, 2003, 68(1): 168-180.
- [50] Ugalde H, Morris B. Cluster analysis of Euler deconvolution solutions: New filtering techniques and actual link to geological structure[G]//SEG Expanded Abstracts, 2008: 794-798.
- [51] Ugalde H, Morris B. Cluster analysis of Euler deconvolution solutions: New filtering techniques and actual link to geological structure[J]. *Geophysics*, 2010: 61-70.
- [52] Cooper G R J. Obtaining dip and susceptibility information from Euler deconvolution using the Hough transform[J]. *Computers & Geosciences*, 2006, 32(10): 1592-1599.
- [53] Thurston J. Euler deconvolution in the presence of sheets with finite widths[J]. *Geophysics*, 2010, 75(3): 71-78.
- [54] Fairhead J D, Bennett K J, Gordon D R H et al. Euler; beyond the "Black Box" [C]//SEG Expanded Abstracts, 1994: 422-424.
- [55] 范美宁. 欧拉反褶积方法的研究与应用[D]. 长春: 吉林大学, 2006.
- [56] Stavrev P, Reid A B. Euler deconvolution of gravity anomalies from thick contact/fault structures with extended negative structural index[J]. *Geophysics*, 2010, 75(6): 51-58.
- [57] Neil C, Whaler K A, Reid A B. Extensions to Euler's method for three-dimensional potential field interpretation [C]//53rd EAEG meeting, Florence, Italy, Expanded Abstracts, 1991: 416-417.
- [58] 鲁宝亮, 范美宁, 张原庆. 欧拉反褶积中构造指数的计算与优化选取[J]. *地球物理学进展*, 2009, 24(3): 1027-1031.
- [59] Silva J B C, Barbosa V C F. 3D Euler deconvolution: Theoretical basis for automatically selecting good solutions[J]. *Geophysics*, 2003, 68(6): 1962-1963.
- [60] Gerovska D, Araúz-Bravo M J, Whaler K. Three-dimensional interpretation of magnetic and gravity anomalies using the finite-difference similarity transform[J]. *Geophysics*, 2010, 75(4): 79-90.
- [61] Gerovska D, Araúz-Bravo M J, Stavrev P, et al. MaCSoundDST-3D automatic inversion of magnetic and gravity data based on the differential similarity transform[J]. *Geophysics*, 2010, 75(1): 25-38.
- [62] Gerovska D, Stavrev P. Finite-difference Euler Deconvolution Algorithm Applied to the Interpretation of Magnetic Data from Northern Bulgaria[J]. *Pure and applied geophysics*, 2005, 162(3): 591-608.
- [63] 范美宁, 孙运生, 田庆君. 关于欧拉反褶积方法计算中的一点改进[J]. *物探化探计算技术*, 2005, 27(2): 171-174.
- [64] Marson I, Klingele E E. Advantages of using the vertical gradient of gravity for 3-D interpretation [J]. *Geophysics*, 1993, 58(11): 1588-1595.
- [65] Zhang C, Mushayandebu M F, Reid A B, et al. Euler deconvolution of gravity tensor gradient data[J]. *Geophysics*, 2000, 65(2): 512-520.
- [66] 范美宁, 江裕标, 张景仙. 不同数据用于欧拉方程的模型计算[J]. *地球物理学进展*, 2008, 23(4): 1250-1253.
- [67] 郭志宏, 晋志宁, 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, 46(6): 1131-1138.
- [68] Hsu S K. Imaging magnetic sources using Euler's equation[J]. *Geophysical Prospecting*, 2002, 50(1): 15-25.
- [69] Stavrev P, Gerovska D, Araúz-Bravo M J. Automatic inversion of magnetic anomalies from two height levels using finite-difference similarity transforms [J]. *Geophysics*, 2006, 71(6): 75-86.
- [70] Stavrev P, Gerovska D, Araúz-Bravo M J. Depth and shape estimates from simultaneous inversion of magnetic fields and their gradient components using differential similarity transforms[J]. *Geophysical Prospecting*, 2009, 57(4): 707-717.
- [71] Dewangan P, Ramprasad T, Ramana M V, et al. Automatic interpretation of magnetic data using Euler deconvolution with nonlinear background[J]. *Pure and Applied Geophysics*, 2007, 164(11): 2359-2372.
- [72] 史辉, 刘天佑, Ghaboush D W. 利用欧拉反褶积法估计二度磁性体深度与位置[J]. *物探与化探*, 2005, 29(3): 230-233.
- [73] Keating P B. Weighted Euler deconvolution of gravity data[J]. *Geophysics*, 1998, 63(5): 1595-1603.
- [74] Davis K, Li Y. Enhancement of depth estimation techniques with amplitude analysis [G]//SEG Expanded Abstracts, 2009: 908-912.
- [75] Hansen R O, Suciú L. Multiple-source Euler deconvolution[J]. *Geophysics*, 2002, 67(2): 525-535.

THE APPLICATION AND DEVELOPMENT OF EULER DECONVOLUTION IN GRAVITY AND MAGNETIC FIELD

WANG Ming^{1,2}, LUO Yao^{1,2}, LUO Feng^{1,2}, TIAN Song^{1,2}

(1. China Aero Geophysical Survey and Remote Sensing Center for Land and Resources, Beijing 100083, China; 2. Laboratory of Earth Observation Technology, China Aero Geophysical Survey and Remote Sensing Center for Land and Resources, Beijing 100083, China)

Abstract: As an important method in potential field data processing and interpretation, Euler deconvolution has aroused widespread attention among researchers because it can provide automatic or semi-automatic estimates of source locations and depths under the condition of less priori information. This paper described the principles of Euler deconvolution, summarized its improvement as well as related problems that geophysical experts both in China and abroad have been working on in recent decades, analyzed the choice of structural index and the stability of Euler solution and the others. The future research emphasis and developing direction of Euler deconvolution are pointed out in this paper, which are of important significance for practical use of Euler deconvolution in potential fields.

Key words: Euler deconvolution; structural index; Euler solutions; moving windows; background field

作者简介: 王明(1981-),男,山东人,助理工程师,硕士研究生,主要从事航空物探方法技术研究。

上接 805 页

参考文献:

- [1] 林依华,张中杰,尹成,等.复杂地形条件下静校正的综合寻优[J].地球物理学报,2003,46(1):101-106.
- [2] 熊震.地震数据数字处理应用技术[M].北京:石油工业出版社,1993.
- [3] 赵妍.层析成像静校正方法研究[D].中国石油大学,2009.
- [4] Marsden Dave. Static corrections-a review (part I, part II)[J]. The Leading Edge,1993.12(1,2).43-49,115-120.
- [5] Nole G.地震层析成像及应用[M].王椿镛,吴宁远,刘启元等,译.北京:学术期刊出版社,1989.
- [6] 陆基孟.地震勘探原理及资料解释[M].北京:石油工业出版社,1991.
- [7] 李鸣社.地震勘探资料数字处理[M].徐州:中国矿业大学出版社,1989.
- [8] 苑益军.复杂地区静校正技术剖析[C]//中国地球物理学学会年刊,1998.
- [9] GX II User Guide by the GX Technology Corporation (Version 4.0). Manual Handbook.
- [10] 潘海娣.复杂地表条件下静校正方法的应用研究[D].北京:中国地质大学,2009.

RESEARCH AND APPLICATION OF THE TOMOGRAPHIC STATIC CORRECTION METHOD

ZHOU Guo-ting, PAN Dong-ming, NIU Huan, LING Dan-dan, XIA Nuan

(The School of Resource and Earth Science. CUMT, Xuzhou 221116, China)

Abstract: In the exploration of coal resources, the static caused by the shallow target depth and the rolling ground influences the coalfield seriously, and coal exploration is mainly focused on faults, collapse columns, and other small structures, which sets higher demands on static correction. Therefore, the static problems which aim at tackling complicated surface in coalfield exploration are especially important. The authors calculated the tomographic static of the forward modeling data records and the actual data and, as a result, the influence of complex surface was eliminated effectively, resulting in the obtaining of high-quality stack profiles.

Key words: complex surface; forward modeling; first-break picking; tomo-inversion-based static correction

作者简介: 周国婷(1986-),女,湖北荆州人,硕士研究生,从事煤田地震勘探资料处理及解释研究,公开发表学术论文数篇。