GEOPHYSICAL & GEOCHEMICAL EXPLORATION

航磁异常总梯度模反演方法的实用化改进及软件研制

郭志宏 熊盛青 唐建平

(中国国土资源航空物探遥感中心,北京 100083)

摘要:通过采用网格数据文件按列与分块随机存取技术,使得大数据量网格位场异常总梯度模的计算及数据极值 点的自动搜索和连续追踪反演成为可能,提出自动搜索出总梯度模网格数据极大值点后沿异常走向方向连续追踪 相邻极大值点串的做法,所获极值点串的连线能够更直观和有效地反映磁性或密度地质体与构造边界(或中心)的 水平位置。经实用化改进研制的反演软件,其模型及实际数据计算均获得较好的预期效果。 关键词:总梯度模,位场反演,实用化改进,随机存取,极值点串;自动搜索,连续追踪 中图分类号:P631.2 文献标识码:A 文章编号:1000-8918(2004)06-0518-05

磁异常总梯度模法(又称解析信号法)最早由 国外学者 Nabighian 博士于 1972 年提出,并用于二 维剖面磁测资料的解释中[1]。借用通讯理论中的 概念,该方法多被国外学者称为解析信号法。1984 年 Nabighian 博士又将解析信号法由二维剖面情况 推广应用到三维平面网格情况[2]。尔后十几年该 方法成了地球物理反演的一个热点,不少国内外学 者又陆续发表了许多这方面的文献^[3~9]。由于该类 方法大多利用解析信号法振幅(即总梯度模)进行 反演问题的求解 因此国内学者通常又将该方法称 为总梯度模法。对航磁平面网格异常数据而言,磁 异常总(或水平)梯度模的一个重要功能就是用来 快速勾画磁性地质体或构造边界(或中心)的水平 位置草图。航磁平面网格数据有面积性、大数据量 的特点。为了使总梯度模法的这项功能能够适应航 $\overline{\mathrm{W}} \Delta T$ 及梯度异常快速自动推断解释的需要,并使 反演结果更为实用有效 对该方法做一些实用化的 改进是非常必要的[3]。

1 梯度模计算与反演的实用化改进

1.1 梯度模数据按列计算与分块存取

 $\Delta T_{g} = \sqrt{\left(\frac{\partial \Delta T}{\partial x}\right)^{2} + \left(\frac{\partial \Delta T}{\partial y}\right)^{2} + \left(\frac{\partial \Delta T}{\partial z}\right)^{2}}$ 为航磁 $\Delta T 网格异常总梯度模 \Delta T_{h} = \sqrt{\left(\frac{\partial \Delta T}{\partial x}\right)^{2} + \left(\frac{\partial \Delta T}{\partial y}\right)^{2}}$

为水平梯度模。由于无论是总梯度模还是水平梯度

收稿日期 2004 - 02 - 06 基金项目 :中国地质调查局科研项目资助 以,为了能够计算大面积、大数据量网格异常的梯度 模数据 应该避免各梯度网格数据同时读入内存参 与计算。为此,首先需要分别按网格列读入各梯度 网格数据文件,并按网格列随机存取的方式重新写 成新格式的网格数据文件,尔后在此基础上再按网 格列逐列进行梯度模数据的计算。由于采用了按列 存取及计算技术,每次同时读入计算机内存的只是 各梯度网格数据的一列数据 而不是整个网格数据, 从而使得超大数据量网格数据梯度模的计算成为可 能。另外为了实现后面大数据量网格数据极值点的 自动搜索与连续追踪计算,还应将按列存取计算获 得的航磁 ΔT 平面网格异常总(或水平)梯度模数据 文件 采用分块随机存取技术重新写入新格式的文 件中备用(图1)。网格数据按列与分块随机存取技 术的实质就是将通常顺序存取的网格数据文件转换 成以一网格列或固定大小的小网格数据块为相等记 录长度的随机(或称直接)存取的网格数据文件,从 而使得程序不必读入整个文件的网格数据就可以随

模的计算均涉及到多个 ΔT 梯度网格数据文件 ,所



图 1 网格数据分块随机存取示意

机(或称直接)存取网格数据文件的任何一列或一 块数据,以达到在节省计算机内存前提下快速存取 大数据量网格数据文件的目的,在此基础上完成大 数据量网格异常梯度模数据的按列计算与分块存 取。

1.2 梯度模数据的阈值

航磁异常总(或水平)梯度模数据计算完成后, 如果需要可以根据测区的实际情况分析研究该区的 总(或水平)梯度模数据,初步判断该地区无源区对 应的航磁异常总(或水平)梯度模数值大小,以便选 定一个适当的数值作为总(或水平)梯度模数据的 阈值。例如,梯度模数据均值的0.5~1.5可以作为 选择阈值的参考数值。小于选定阈值的总(或水 平)梯度模数据将作为无源区的数据赋给空区假 值,不参与后面极值点的自动搜索与连续追踪计算, 从而可以排除一些不可靠和不确定的解,但同时应 该注意选取的阈值不能太大,否则有可能因此损失 一些有意义的解。

1.3 极值点的自动搜索与连续追踪

理论研究及模型试验的结果表明,航磁 ΔT 平 面网格异常总(或水平)梯度模数据极值点(为简 便,下面所述极值点均指极大值点)通常与磁性地 质体的边界(或中心)水平位置大致对应,尤其当将 实际测量或位场转换计算获得的各磁场梯度数据向 下延拓一定距离 到接近磁性体顶面后再计算出的 磁场梯度模数据,这种对应关系就更为突出^[4~8]。 虽然三度体的总梯度模 ΔT。 与磁化方向有关,但是 其受斜磁化的影响要比 Δ*T* 及其梯度异常小得 多[6] :另外还可通过磁场化极等前期处理来减小斜 磁化的影响。现在反演问题的关键是通过前面分块 随机存取的梯度模数据文件由计算机自动搜索和连 续追踪出其数据极值点的位置。以往的工作通常只 注重梯度模数据极值点的自动搜索上,这样搜索出 的只是一些离散、孤立的极值点。这些离散、孤立的 极值点虽然与磁性地质体边界也有对应关系 但这 些极值点之间的相互关系则无法判断。笔者对此项 工作所做的重要和有意义的改进是在自动搜索出极 值点后进一步的极值点串的连续追踪。所谓极值点 串的连续追踪就是以自动搜索出的极值点为中心 点 沿异常走向方向连续追踪搜索出与其相邻的其 他极值点 从而自动追踪搜索出一条条连续的极值 点串,而不再是一个个离散、孤立的极值点,分别连 接这些连续极值点串获得的一条条连线能大致对应 磁性地质体和构造边界的水平位置。

1.3.1 极值点的自动搜索

为了自动搜索网格数据的极值点,Richard 等 人^[9]曾用一个3×3大小的固定窗口在网格数据上 按顺序有规律地进行滑动判断,我们建议采用如图 2 所示的5×5大小的网格窗口进行按顺序有规律



图 2 网格数据极值点判断的 8 方位 4 剖面示意 滑动 以便自动判断和搜索网格数据的极值点。在 以网格窗口中心点为中心的沿网格 x、y 轴方向和对 角斜线方向共8个方位的4条网格剖面上,该中心 点必须在至少2条或以上网格剖面上为极大值点, 才能判断为网格数据极大值点。而在每条网格剖面 上判断剖面中心点为极大值点将由 Richard 等人^[9] 的3点判断条件: (*i*-1) < (*i*) > (*i*+1) 改为 5 点判断条件 (*i*-2) < *f*(*i*-1) ≤ *f*(*i*) ≥ *f*(*i*+1) > (*i*+2),该条件包括4种可能的情况(图3):①(*i*-2) < f(i-1) < f(i) > f(i+1) > f(i+2) (2)f(i-1) < f(i-1) < f(i-2) < f(i-1) = f(i) > f(i+1) > f(i+2) (3)f(i-1) = f(i) > f(i+2)2) < f(i-1) < f(i) = f(i+1) > f(i+2) (4)f(i-1) < f(i-1) < f(i-2) < f(i-1) = f(i) = f(i+1) > f(i+2)。显而 易见 剖面极值的 5 点判断条件比简单的 3 点判断 条件所判断出的极值点更为全面和可靠,并且可以 减少由单个错误或误差点引起的错误判断。在自动 搜索出一个网格数据的极值点后,首先要判断该极 值点是否是已搜索出的极值点串中的极值点,若是 一个已搜索过的极值点 则不做任何处理而往下顺 序滑动窗口继续进行其他极值点的自动搜索步骤。



1.3.2 极值点串的连续追踪

如果一旦自动搜索出一个从未搜索和追踪过的 新极值点 则下一步的核心工作就是以该极值点为 一新极值点串的起点 进行其相邻极值点的连续追 踪 以便获得一条新的网格数据极值点串。具体做 法是以自动搜索出的新极值点为中心点,计算其8 个方位(见图2)上的数据梯度变化值,比较判断出 梯度变化的绝对值最小的方位 ,该方位通常与网格 数据异常的走向方位相对应 ;然后沿该梯度变化的 绝对值最小的方位,继续判断该极值点的相邻网格 点是否仍为新的极值点。有以下3种情况:如果该 相邻网格点也是新极值点 则将该相邻极值点作为 新极值点串中的一点,按顺序保存在该串中并继续 往下进行其他极值点的连续追踪步骤 ;如果该相邻 网格点虽是已搜索和追踪过的极值点 则将该相邻 极值点保存为新极值点串中的最后一点 ,然后结束 该极值点串的连续追踪,回到1.3.1 其他极值点的 自动搜索步骤;如果该相邻极值点不是极值点则结 束该极值点串的连续追踪,回到1.3.1 其他极值点 的自动搜索步骤。

重复 1.3.1 极值点的自动搜索及 1.3.2 极值点 串的连续追踪步骤 ,直到完成整个网格数据文件极 值点的自动搜索和连续追踪工作。需要指出的是这 项工作是针对分块随机存取的网格数据文件进行 的 ,所以每次自动搜索和追踪极值点时读入计算机 内存的数据仅是滑动窗口所在的 1 个数据块的网格 数据以及所涉及到的其他相邻的最多 3 个数据块的 网格数据 ,而不是整个文件的网格数据 ,从而能够实 现大数据量网格文件数据极值点的自动搜索与连续 追踪计算。

1.4 极值点串的合并与筛选

模型试验及方法研究分析表明 经过极值点的 自动搜索与极值点串的连续追踪获得的一条条极值 点串(也可能存在只有单个极值点的极值点串),存 在一些本应连接成一个长串但在反演结果输出文件 中却分离成许多首尾相接的短串的情况。出现这种 情况的原因是多方面的,主要与自动搜索极值点的 滑动窗口起始位置、滑动方向等因素有关 也就是与 极值点自动搜索的先后顺序有较大关系。而不管如 何设置和调整滑动窗口起始位置、滑动方向 这种分 段极值点短串的出现都很难避免。为了补救这种反 演结果输出文件的极值点短串与绘图连接成长串的 不对应情况 在完成极值点的自动搜索与极值点串 的连续追踪步骤后,还应该进行极值点串的合并工 作。极值点串合并的具体做法:①将搜索追踪出的 各极值点串的首尾点与其他串的首尾点进行比较判 断 将首点或尾点相连或相邻的串合并成长串 并删 除已被合并的短串,依次完成所有极值点串与其他 串的判断与合并 ②再次将新合并的长串与其他所 有串进行比较判断与合并,依次完成所有新合并的 长串极值点与其他串的判断与合并 ③重复进行步 骤② 直到不再有新合并的长串极值点产生为止。 经过上面的合并工作可以最大限度地将首尾能够相 连或相邻的短极值点串合并成长极值点串。

完成极值点串的合并工作之后可根据需要进行 极值点串的进一步筛选工作。可选择 2 种限定条件



万方数据

图 4 总(水平)梯度模计算、极值点搜索与追踪程序流程

进行极值点串的筛选,一个是极值点串中的极值点 数目,另一个是极值点串的累积长度。通过设定极 值点串最小点数和极值点串最小长度,可以去除点 数小于极值点串最小点数和长度小于极值点串最小 长度的被认作不太可靠或规模太小的极值点串,剩 下的是最终用作磁性地质体及构造边界轮廓草图勾 画参考的磁异常梯度模网格数据极值点串。

按照上述实用化改进思路和做法 ,笔者用 Visual C + +6.0 编程语言和工具研制了平面网格位场 数据异常总(或水平)梯度模计算及其极值点的自动搜索与连续追踪反演方法的 WINDOWS 软件程序。图 4 为程序设计流程。

2 模型与实际数据的验算与试算

用新研制的总(水平)梯度模计算与反演处理 软件对多个斜磁化长方体叠加的模型正演数据进行 验算,并对新疆某地区实际数据进行试算。表1是 各长方体模型的参数,图5中左图是3个斜磁化长

模型 编号	$\frac{K}{km}$	<u>宽</u> km	<u>高</u> km	$\frac{x_0}{\mathrm{km}}$	$\frac{y_0}{\mathrm{km}}$	$\frac{z_0}{\mathrm{km}}$	$\frac{ \overline{\mathrm{做化强度}} }{\mathrm{A} \cdot \mathrm{m}^{-1}}$	<u>总磁化倾角</u> 。	<u>总磁化偏角</u> 。	● 地磁场倾角	<u>地磁场偏角</u> 。
1	8	3	3	5	5	2	1	50	0		
2	9	3	3	6	14	2	1	50	0	50	0
3	10	4	4	14	10	2.3	1	50	0		

表1 各长方体模型参数

注:图5坐标原点为左上角、x轴向右、y轴向左;网格大小200×200,间距:100 m×100 m



图 5 多个长方体叠加模型 ΔT 磁场图(左)及总梯度模反演勾画的模型体边界示意(右)



图 6 新疆某地区航磁 ΔT 磁场影像(左)及总梯度模反演勾画的边界示意(右)

方体叠加的模型 ΔT 场等值线平面,右图是根据 3 个斜磁化长方体叠加的模型 ΔT 梯度场计算获得的 总梯度模数据通过极值点的搜索与追踪反演得到的 长方体模型边界图。从图 5 中可以看到,虽然长方 体模型均为倾斜磁化,但反演得到的长方体模型边 界位置与实际位置几乎一致,受斜磁化影响较小。 图 6 中左图为新疆某地区实际航磁 ΔT 磁场影像 图,右图为实测 ΔT 磁场经位场转换计算出的 ΔT 总 梯度模数据通过极值点的搜索与追踪反演勾画的磁 性体及构造边界参考草图。从图中看到 ,改进后的 总梯度模计算与反演处理程序的模型数据验算与实 际数据试算均获得较好的预期效果。

3 结论

针对实用化改进后的航磁异常总(水平)梯度 模计算与反演方法软件,可以总结出以下几点结论。

(1)通过网格数据的按列随机(或称直接)存取 技术,可以实现大数据量网格航磁异常总(或水平) 梯度模数据的按列计算与存储。

(2)通过网格数据的分块随机(或称直接)存取 技术,可以实现大数据量网格数据极值点的自动搜 索与连续追踪计算。

(3)由极值点的自动搜索与连续追踪反演获得的梯度模网格数据极值点串连线,能够更直观和有效地反映磁性地质体及构造边界(或中心)的水平位置。

(4)改进的网格异常梯度模数据计算与反演方 法软件可以用于磁场梯度数据和重力梯度数据的处 理,从而为位场梯度数据提供了一种实用有效的快 速自动反演解释手段——快速勾画网格区磁性或密 度地质体及构造边界轮廓草图。

(5)计算网格位场异常总(或水平)梯度模所需 要的位场梯度场数据既可由实际测量获得,也可由 磁场 ΔT 或重力 Δg 通过位场转换计算获得;因此改 进的网格异常梯度模计算与反演方法软件既可直接 用于位场梯度数据的反演解释处理,又可间接用于 位场异常数据本身的反演解释处理。

本项研究工作得到中国地质大学(北京)管志 宁教授等的热心指导和帮助,在此深表感谢。 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(2) 507 - 512.
- [2] Nabighian M N. Toward a three dimensional automatic interpretation of potential field data via generalized Hilbert transforms : Fundamental relations[J]. Geophysics, 1984 A9(6) 780 - 786.
- [3] 郭志宏, 管志宁,熊盛青. 航磁异常总梯度模的实用化改进方 法[A]. 中国地球物理学会. 中国地球物理 2003[C]. 南京:南京师范大学出版社 2003.174-174.
- [4] 管志宁,姚长利.磁异常梯度解释理论与方法[R].北京:中国 地质大学(北京),1993.
- [5] 郭志宏 蔡振京. 航磁 ΔT 平面归一化总梯度方法及其在内蒙 陆西凹陷的应用[J].物探与化探,1993,17(5)341-346.
- [6] 管志宁,姚长利. 倾斜板状体磁异常总梯度模反演方法[J]. 地 球科学,1997,22(1)81-85.
- [7] 黄临平, 管志宁. 利用磁异常总梯度模确定磁源边界位置[J]. 华东地质学院学报, 1998, 21(2):143-150.
- [8] 余钦范 楼海.水平梯度法提取重磁源边界位置[J].物探化探 计算技术,1994,95(6)23-28.
- [9] Blakely R J ,Simpson R W. Approximating edges of source bodies from magnetic or gravity anomalies [J]. Geophysics , 1986 ,51 (7):1494-1498.

THE PRACTICAL IMPROVEMENT AND SOFTWARE DEVELOPMENT OF TOTAL GRADIENT AMPLITUDE INVERSION OF AEROMAGNETIC PLANE GRID DATA

GUO Zhi-hong ,XIONG Sheng-qing ,CAO Jian-ping

(China Aero Geophysical Survey and Remote Sensing Center for Land and Resources Beijing 100083 , China)

Abstract : With the direct access technique of a column or a block of grid data , it is possible for us to calculate the total gradient amplitude and to search automatically and trace continuously the maximum points of grid data in large quantities. In this paper , the authors put forward for the first time the idea of continuous tracing of a string of adjoining maximum points along the anomaly trend after automatic searching of a maximum point. The linking lines of the string of maximum points can show the horizontal sites of edges (or centers) of magnetic or gravity bodies and structures more directly and effectively. The practically improved software was used in inversion of model and surveying data , with fairly good results obtained.

Key words : total gradient amplitude ; filed inversion ; practical improvement , direct access , a string of maximum points , automatic search , continuous tracing

作者简介:郭志宏(1965 –),男,博士。1988 年毕业于长春地质学院应用地球物理系。中国国土资源航空物探遥感中心教授 级高工,主要从事物探重磁方法技术研究。