

起伏地形剖面重磁异常半智能处理解释软件及应用

陆素文¹, 于长春^{1,2}, 姚长利²

(1. 中国国土资源航空物探遥感中心, 北京 100083; 2. 中国地质大学, 北京 100083)

摘 要: 简要介绍了起伏地形剖面重磁异常半智能处理解释软件的基本原理和方法技术, 及其系统实现方法和主要功能, 并对云南某地的实测航磁剖面进行了最优化正反演计算。

关键词: 起伏地形; 重磁异常; 半智能处理解释软件

中图分类号: P631

文献标识码: A

文章编号: 1000-8918(2004)01-0065-04

通常情况下, 人们所讨论的正反演计算方法大都是假设观测面为水平面。对于西部中高山区, 这些反演方法存在很大的局限性。研制适合起伏地形条件下的重磁直接解释方法显得十分重要。目前对中高山区航磁测量数据进行定量反演的途径主要有 3 种^[1]: ①建立在起伏地形上的磁场表达式和反演计算方法; ②将磁场曲化平后再解释; ③采用最优化反演方法在原起伏测量面上直接进行解释。由于前 2 种方法在原理和应用上存在许多尚未解决的问题, 只有第 3 种方法的原理比较成熟, 应用比较广泛。因此, 我们以最优化方法理论为基础, 用二维半模型模拟二度和三度重磁异常体, 在正反演程序中加入高程参量以适合各种起伏地形测量条件, 结合目前最新的计算机技术、自动反演技术及多种重磁异常转换处理技术, 研制出了适合中高山特点的实用、快速、有效的最优化反演解释软件, 实现了中高山区重磁异常半智能化的定量解释^①。

1 方法原理和方法技术

1.1 正演公式

为了提高模型正演计算速度, 很多专家简化了基于二度半多边形截面棱柱体重磁正反演公式的推导^[2,3]。作者采用了文献[4]中直接积分推导出的公式。图 1 示出一个多边形截面为 2.5D 棱柱体, 密度为 σ , 磁化强度为 M , 则在任意点 $P(x, y, z)$ 引起的重力异常为:

$$\Delta g(P) = G\sigma \sum_{i=1}^N \cos\varphi_i [I_i(Y_2) - I_i(Y_1)],$$

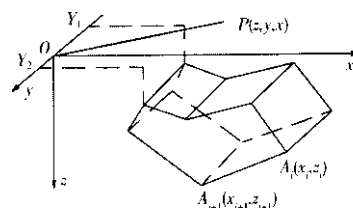


图 1 基本模型

其中:

$$I_i(y) = y \ln \frac{u_{i+1} + R_{i+1}}{u_i + R_i} + u_{i+1} \ln(R_{i+1} + y) - u_i \ln(R_i + y) - w_i \left(\arctan \frac{u_{i+1}y}{w_i R_{i+1}} - \arctan \frac{u_i y}{w_i R_i} \right);$$

磁场三分量为:

$$H_{ax}(P) = - \sum_{i=1}^N \sin\varphi_i (M_x I_{1i} + M_y I_{2i} + M_z I_{3i}),$$
$$H_{ay}(P) = - \sum_{i=1}^N [(M_x \sin\varphi_i - M_z \cos\varphi_i) I_{2i} - M_y (\sin\varphi_i I_{1i} - \cos\varphi_i I_{3i})],$$
$$Z_a(P) = - \sum_{i=1}^N \cos\varphi_i (M_x I_{1i} + M_y I_{2i} + M_z I_{3i}),$$

其中: $I_{ji} = P_{ji}(Y_2) - P_{ji}(Y_1)$, $j = 1, 3$;

$$P_{1i}(y) = \cos\varphi_i \ln \frac{R_i + y}{R_{i+1} + y} - \sin\varphi_i \left(\arctan \frac{u_{i+1}y}{w_i R_{i+1}} - \arctan \frac{u_i y}{w_i R_i} \right)$$
$$P_{2i}(y) = \ln \frac{u_i + R_i}{u_{i+1} + R_{i+1}},$$
$$P_{3i}(y) = \sin\varphi_i \ln \frac{R_i + y}{R_{i+1} + y} + \cos\varphi_i \left(\arctan \frac{u_{i+1}y}{w_i R_{i+1}} - \arctan \frac{u_i y}{w_i R_i} \right);$$

① 于长春, 陆素文, 姚长利. 高精度重磁剖面解释系统开发研制. 航空物探遥感中心科研报告, 2000.

收稿日期: 2002-08-14

基金项目: “九五”国家重点科技攻关项目(96-914-01-02)资助

总场异常为:

$$\Delta T(P) = H_{ax}(P) \cos I_0 \cos D_0 + H_{ay}(P) \cos I_0 \sin D_0 + Z_a(P) \sin I_0,$$

其中:

$$u_i = x_i \cos \varphi_i + z_i \sin \varphi_i, u_{i+1} = x_{i+1} \cos \varphi_i + z_{i+1} \sin \varphi_i,$$

$$R_i = (x_i^2 + y_i^2 + z_i^2)^{1/2}, R_{i+1} = (x_{i+1}^2 + y_{i+1}^2 + z_{i+1}^2)^{1/2},$$

$$\varphi_i = \arctan \frac{z_{i+1} - z_i}{x_{i+1} - x_i}, w_i = -x_i \sin \varphi_i + z_{i+1} \cos \varphi_i,$$

$$M_x = M \cos I \cos D, M_y = M \cos I \sin D, M_z = M \sin I.$$

以上各式中: G 为引力常数, i 为棱柱体角点序号, N 为棱柱体的边数, I_0 、 D_0 为地磁场的倾角、偏角, I 、 D 为磁化强度方向的倾角、偏角。

由于上述公式是针对任意点 $P(x, y, z)$ 的计算结果, 自然适用于任意起伏地形条件。但在编程计算时应注意: ①点高程和模型角点高程起算点应统一; ②因为上述公式中测点与角点距离是相对的, 因此计算每一测点异常时, 模型角点坐标应重新计算。

1.2 最优化反演

为加快收敛速度, 我们使用的最优化反演方法是阻尼最小二乘法, 但这种方法不如直接法或拟牛顿法收敛稳定。尤其当参量增多, 初值选择又不好时, 这种不稳定性变得特别突出, 常常收敛于我们不希望的解。因此采用奇异值分解与阻尼最小二乘法相结合的方法, 得到收敛速度快又稳定的结果^[5]。

2 软件功能设计

本软件的目标是: 要开发研制出一套能够在起伏地形条件下, 快速有效、可视化、半智能化的重磁剖面定量反演解释软件系统, 尤其强调实用化, 最终要投入实际生产。因此, 本软件系统主要由五大功能模块组成(图2): ①数据和图形的输入输出功能;

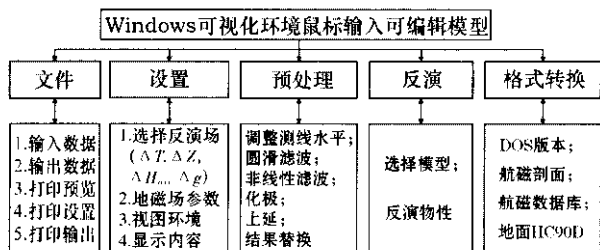


图2 软件主要功能结构

②数据格式转换功能; ③原始数据预处理功能; ④模型编辑功能; ⑤重磁剖面正反演功能。此外还有显示样式和反演场类型设置等功能。只有这些功能的完美结合, 才能达到上述目标。

2.1 输入输出功能

在这一功能中系统规定了输入原始数据的格

式, 输出计算结果数据的格式; 输入模型数据的格式, 以及输出模型数据格式。输入输出的数据均为文件形式。软件系统对于计算结果曲线和所建模型图形的输出打印可以方便地加以控制, 按一定要求的比例尺输出图件, 并可在屏幕上直观地模拟显示要打印图件的效果, 交互修改, 直至满意为止。对于长剖面, 即打印长度超过 WINDOWS 打印长度的剖面, 系统输出 GOLDEN PLOT 文件, 可用 GOLDEN 软件在 DOS 下显示或输出图形。

2.2 格式转换功能

对于数据量较小的原始数据, 可以按照软件规定的格式建立数据文件。对于数据量较大的原始数据文件再改写本系统内部格式将是一件费时费力的事情。因此, 系统设计了格式转换功能, 可以将生产中常用的几种数据格式(主要指航空磁测的结果数据以及数据库数据等)转换为本软件规定的格式。

2.3 原始数据预处理功能

实测的重磁数据中往往包含很多信息, 其中有些成分与我们反演的目标物是无关的。为了突出有意义信息, 必须对原始数据进行必要的转换和预处理。因此, 系统设计了预处理功能, 将实际工作中常用的区域场斜改正, 三点、五点圆滑滤波, 非线性滤波, 上延, 化极等常用数据预处理程序集成进来。这样在剖面拟合工作之前, 可采用一定数据处理手段, 定性研究地下磁性体分布特征, 为下一步模型建立提供参考, 同时可有效地减少主观因素。

2.4 模型编辑功能

在重磁异常正反演过程中, 模型的编辑修改需要反复多次, 这项操作的繁简程度直接影响正反演工作效率。因此, 系统采用可视化模型编辑, 即在计算机屏幕上, 模型始终以图形实体出现, 并以交互形式对其进行编辑、修改、正反演、缩放等操作, 使模型编辑修改工作完全由用户控制。

2.5 重磁剖面正反演功能

重磁剖面正反演功能是软件的核心部分。在前述公式简化、算法优化和模型可视化编辑、动态修改等关键技术实现的前提下, 利用 WINDOWS 多任务环境和统一管理资源等机制, 使正反演过程“实时”进行。即在修改模型角的同时, 正演曲线能及时反映计算过程中发生的变化, 反演结果也能及时反映模型变化。

2.6 其它功能

在开始正反演之前, 进行系统设置非常重要, 不仅要设定计算过程中工作区的外观(如颜色、线型

等),而且还要设定参数,只有参数的正确设定才能保证计算结果的正确性。因此系统设计开发了选择反演场、地磁场参数、视图环境、显示内容等设置功能。另外,系统还提供了帮助功能,可以很方便地获得有关系统功能和操作方面的帮助信息。

3 软件的几个关键问题的实现方法

3.1 可视化模型编辑方法和实时计算技术

可视化主要指重磁地质模型在计算机屏幕上始终以图形和图像实体出现,对模型体角点可直接通过鼠标完成角点的增加、删除、移动;对模型体也同样通过鼠标点击选择,实现增加、删除、移动等编辑操作。实现上述技术必须解决一些技术细节问题,详细过程见文献[4]。

实时是指模型、模型角点或参数变化与其引起的异常曲线的变化是同步的。为了达到“实时”效果,即使正处在正反演计算过程中,也必须立即对使用者的操作(如选择模型、移动模型)做出响应,不允许长时间地陷入正反演计算中。系统利用 Windows 管理机制,在长时间的正反演计算函数中设立了内嵌消息检查及中断,始终保持与 Windows 的联系。即使计算还没有完成,也可根据消息决定是否返回,并保持运行现场状态,再进入时可不重复计算已算出的部分。

3.2 起伏地形、起伏飞行条件下剖面正反演计算

由于前述公式推导结果是针对任意点 $P(x, y, z)$ 引起的重力异常和磁异常,因此自然适应任意起伏地形条件,但在编程实现时有几个问题必须注意:①本软件采用 GPS 测量高程为计算点的高程,由于 GPS 高程坐标轴规定向上为正,而磁法勘探公式规定深度坐标轴向下为正,这样就会产生深度符号不统一的问题。经反复测试,将测点高程(即 P 点的 z 坐标)和模型角点高程起算点统一,再计算两者相对距离,才可实现起伏测量面上的正反演计算。②前述公式中计算点与模型角点的距离是相对的,因此在对每一点进行正演计算时,模型角点坐标必须重新计算。③由于是在起伏飞行面上进行正反演计算,复杂的地形条件也应该考虑。在建立模型时应考虑不要将模型置于地形之外(在空中)。因此,系统将地形高程曲线在界面模型区显示出来,来约束模型位置,同时设计了模型合理性检查功能,当模型与地形线有交叉时,系统会报告模型建立不合理。

3.3 位场转换模块的系统集成

经典的位场转换程序大都是由 DOS 系统下的

FORTRAN 语言实现的,为了方便地使用这些久经考验的实用程序,将其集成到 WINDOWS 环境下是非常必要的。但将每一个 FORTRAN 程序改写为 WINDOWS 程序,工作量非常大,因此,为减少工作量,系统采用混合语言编程技术,用 C++ 语言调用 FORTRAN 动态库的方法,将区域场斜改正、三点、五点圆滑滤波、非线性滤波、上延、化极等常用数据预处理程序集成到 WINDOWS 环境下。实现 C++ 语言调用 FORTRAN 动态库的关键是接口设计。在 C++ 和 FORTRAN 程序中都要有函数接口申明,由 POWERSTATION 4.0 开发软件形成 FORTRAN 动态库,将后缀为 lib 的文件加入到 C++ 开发系统的工程文件模块库中,再由 C++ 编译连接执行即可。系统共调用化极、上延、非线性滤波、PLT 绘图共 4 个 FORTRAN 函数,下面以化极函数调用过程说明调用方法。

①C++ 调用接口

```
extern "C" { void __stdcall HUAJIW ( float *,
float *, float *, float *, float *, int *, int *, int * ); }
```

②FORTRAN 函数接口

```
SUBROUTINE HUAJIW ( TA, FI1, D1, A, F9,
NI, KK1, IER)
```

```
! ms $ if . not. defined(LINEDIRECT)
```

```
! ms $ attributes dllexport :: HUAJIW
```

```
! ms $ endif
```

```
implicit none
```

```
real * 4 ta ( * )
```

```
real * 4 fi1, d1, a, f9
```

```
integer * 4 ni, kk1, ier
```

4 实际资料处理

图 3 是软件工作界面及计算结果。图中上半部

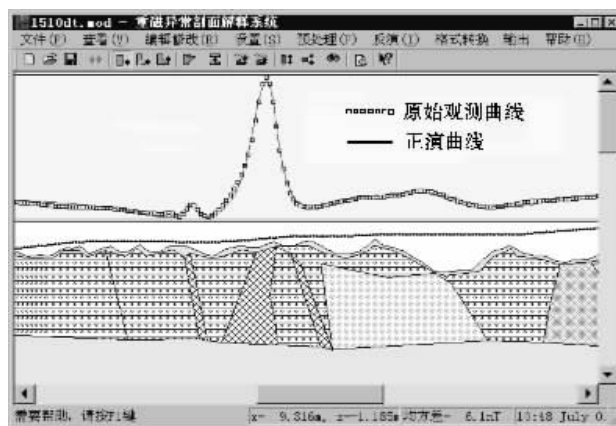


图 3 起伏地形条件下最优化拟合界面效果

分是异常曲线区,下半部分为模型编辑区,主要显示起伏飞行曲线(异常计算面),地形曲线和地质体模型。测量(飞行)曲线用于观察飞行效果及对异常的影响,同时也是实现起伏地形条件下正演拟合的计算面;地形高程曲线用作约束模型建立,防止模型建立在“空中”。

图中剖面是云南中甸 1510 测线,经过红山中型铜矿区。为研究已知矿区和斑岩体航磁测量效果,我们对空中测线位置,做了地磁 ΔT 、磁化率、地质和化探采样工作。在此工作基础上,对 1510 测线进行了区域场斜改正、化极和滤波等处理后对全剖面进行拟合。根据计算结果并参考已知信息,推测在 12 ~ 16 km 处存在一个隐伏中酸性岩体。

实际应用表明,本软件具有功能强、速度快、操作简便等优势。在建立模型过程中,可用不同图案表示不同磁性的地质体,标志明显,输出时,可根据需要打印成图。

5 结论

这套软件系统具有下列明显的技术优势:用一系列有限长的组合多边形棱柱体逼近三度体进行正反演,较以往用多边形二度体拟合剖面磁异常更接近实际;用起伏面作为异常起算面,较以往用水平面更适合中高山地区;集成了模型可视化编辑、剖面数据处理、磁化强度和模型实时反演等功能,使用户不需要记忆复杂计算机命令和繁复操作过程,提高了计算速度和工作效率。该软件已用在航空物探遥感

中心藏西和新一轮国土资源大调查项目的异常定量解释中。将来随着仪器测量精度的提高和高精度 GPS 定位技术的普遍应用,它将在西部大开发项目中发挥更大的作用。若能结合“复杂条件下局部重磁场源全方位成像系统^[6~9]”,将其“成像”结果作为最优化反演的初始输入模型,则可以避免很多人为因素,使初始模型的选择更客观合理,并与剖面深度计算方法如切线法、沃纳反褶积方法等结合起来,作为初始模型输入的参考,使软件系统更加完善。

参考文献:

- [1] 谭承泽. 磁法勘探教程[M]. 北京:地质出版社,1983.
- [2] Chao C K, Sharp J A. Werner deconvolution for automated magnetic interpretation and its refinement using Marquardt's inverse modeling[J]. Geophysics, 1983, 48(6): 754 - 774.
- [3] 陈善. 重力勘探[M]. 北京:地质出版社,1986.
- [4] 姚长利,黎益仕,管志宁. 重磁异常正反演可视化实时方法技术改进[J]. 现代地质,1998, 12(1).
- [5] 王懋基,宋正范. 奇异值分解在二维半多边形体 ΔT 异常最优化反演中的应用[J]. 物探与化探,1991, 15(1).
- [6] 睦素文,安玉林,黄金明. 复杂条件下局部重磁场源全方位成像系统在云南某地的应用效果[J]. 物探与化探,2002, 26(5).
- [7] 安玉林. 局部重磁场源全方位成像理论概要[J]. 物探与化探, 2000, 24(6).
- [8] 安玉林. 局部重磁场源全方位成像理论概要(续)[J]. 物探与化探,2001, 25(6).
- [9] 安玉林. 起伏地形上规则二度体复重磁场正演和直接反演[J]. 物探与化探,2003, 27(1-4).

THE SEMI-INTELLIGENT PROCESSING AND INTERPRETATION SOFTWARE FOR GRAVITY AND MAGNETIC ANOMALIES ALONG THE PROFILE OF ROLLING TOPOGRAPHY AND ITS APPLICATION

SUI Su-wen¹, YU Chang-chun^{1,2}, YAO Chang-li²

(1. China Aero Geophysical Survey and Remote Sensing Center for Land and Resources, Beijing 100083, China; 2. China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: This paper describes in brief the semi-intelligent processing and interpretation software for gravity and magnetic anomalies along the profile of rolling topography, dealing with its basic principle and technique, the method for the realization of its system and its major functions. The optimized direct and inverse calculations were carried out for the aeromagnetic profile measured in a certain area of Yunnan Province.

Key words: rolling topography; gravity and magnetic anomaly; semi-intelligent processing and interpretation software

作者简介: 睦素文(1967 -),女,1996年毕业于中国地质大学(北京)物探系获硕士学位,一直从事物探方法研究和物探数据的数字成图工作。