

功率谱可视化深度计算方法及在煤火区的应用

眭素文^{1,2}, 于长春², 熊盛青², 陈斌²

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

摘要: 利用对数功率谱方法可以方便地估计磁性体埋深, 国内外学者曾成功运用于许多地区磁测资料的深度计算, 取得了较好的应用效果。但由于采用计算机等间隔分块, 等步长滑动方法来计算, 使得计算结果只能反映窗口下地质体的统计平均深度, 对精度造成一定的影响。本次将计算过程在可视化环境下实现, 根据异常实际情况人工选择窗口的大小和位置, 提高了深度计算的精度。在煤火区的应用证实了方法的实用性。

关键词: 煤火着火点; 磁测; 深度计算; 功率谱; 可视化

中图分类号: P631.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2007)06-0560-04

利用对数功率谱法可以方便地估计磁性体顶深、底深, 以及中心深度, 是磁性体深度反演的常用方法之一。最早的有 1970 年 Spector 等提出的统计分析方法^[1], 1977 年 Bhattacharyya 等提出的似能谱法、矩谱法等^[2]。国内学者申宁华、侯重初等也分别提出了自己的快速算法^[3]。这些方法不需要预先知道磁性体的磁化率, 曾成功运用于下扬子航磁资料^[4]、康滇大陆古裂谷带^[5]等许多地区的磁测资料深度计算, 取得了较好的应用效果。但这些测区大都是大面积的区域性测区, 局部异常数目多达几千甚至上万个, 数据运算量非常大。因此以前大都采用计算机等间隔分块(即分窗口), 等步长滑动方法来计算。这样, 计算结果更多反映的是窗口下地质体的统计平均深度。大量的模型实验结果表明, 窗口的大小和位置对计算精度有很大的影响, 当窗口大小合适并完全套合在模型上时, 计算结果误差最小, 当只有部分窗口与模型套合时, 计算结果误差可达到 20% - 50%^[4], 因此采用等间隔窗口自动滑动进行计算, 对精度造成一定的影响。本次计算测区比较小, 异常大都由煤层燃烧形成的烧变岩或正在燃烧的热源引起, 异常形态多为单个孤立异常。对于此测区航磁异常的深度计算, 若能根据异常实际大小和位置人工选择窗口的大小和位置, 将有效提高计算的精度。但是, 人工选择窗口大小和位置若不能在可视化环境下操作, 计算过程的反复性将大大降低反演速度。为了实现可视化反演目的, 我们将源程序进行了必要的修改, 并将其移植到基于

MapObject(简称 MO)开发的 GIS 平台上。利用 GIS 对图形数据的显示、编辑、修改和对属性数据的编辑、存储、导入、导出等功能, 实现了计算过程的可视化。对窗口位置的选择完全在可视化人机交互状态下进行, 深度计算结果在屏幕上即时显示, 并以属性形式存储。计算过程简便易行, 计算精度得到提高。

1 方法原理

用功率谱法进行深度计算的基本原理及公式导出过程在文献[1-7]中有详细的阐述, 这里只对方法原理进行简单介绍。

1.1 求磁性体顶面深度的功率谱法

将窗口内地下磁性体视为有限延伸垂直棱柱体, 将磁异常化到地磁极, 在较高频区域求角度平均径向功率谱有如下表达式

$$K^2(s) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} |F(s, \psi)|^2 d\psi,$$

$$\ln K(s) = \alpha - 2\pi s z_1,$$

$$z_1 s = \left[\ln \frac{k(s)}{k(s + \Delta s)} \right] / (2\pi \Delta s),$$

式中, u, v 为沿 x 及 y 轴水平方向的圆频率; s 为径向圆频率, $s = (u^2 + v^2)^{1/2}$; ψ 为 s 的方位角; α 为常数; z_1 为顶深。这样就可以通过取数组 $z_1(s)$ 的平均值, 得到顶深 z_1 。

1.2 求磁性体质心深度的似功率谱法

在较低频区域求角度平均径向似功率谱有如下表达式, 设

收稿日期: 2007-09-01

基金项目: 国家高技术研究发展计划 863 课题(2003A4131100)、中国地质调查局项目(1212010360201、200320120002、1212010560202)资助

$$G(s, \psi) = \frac{1}{s} F(s, \psi),$$

$G(s, \psi)$ 的角度平均平方振幅

$$H^2(s) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} |G(s, \psi)|^2 d\psi,$$

则有

$$\ln H(s) = \beta - 2\pi s z_0,$$

$$z_0(s) = \left[\ln \frac{H(s)}{H(s + \Delta s)} \right] / (2\pi \Delta s),$$

式中, β 为常数。同样可以通过取数组 $z_0(s)$ 的平均值, 得到磁性体质心深度 z_0 。

1.3 求磁性体底面深度

假设磁性体顶部和质心间的距离与质心和底界面的距离相等, 则磁性体底界面深度 z_b 为

$$z_b = 2z_0 - z_c.$$

应当指出的是, 上述公式都是从单一均匀磁化的直立棱柱体导出的, 在大范围区域中的应用是以 Spector 和 Graft 提出的统计分析理论为前提的, 即多个随机分布磁性体其频谱的总体平均和某一个形体的频谱相等。这一结论拓宽了功率谱深度计算方法的应用领域, 使得前述方法照样适用于实际叠加异常区域, 但是给出的深度值是窗口内等效源体的深度值。

2 功率谱深度计算可视化方法

2.1 软件研制过程

(1) 通过调用 MO 提供的有关文件管理、图形编辑修改、属性管理等一系列功能, 采用 VC++ 语言开发基于地图应用组件 MapObject 的 GIS 软件, 形成可视化的计算平台。

(2) 修改原深度计算 FORTRAN 程序^[4], 分别形成顶深计算、质心计算和底深计算 3 个功能模块 (DLL 动态连接库)^[8]。通过 VC++ 接口, 将这些模块连接到基于 MO 开发的可视化计算平台上, 形成基于 GIS 的可视化深度计算程序。

2.2 关键技术和难点

(1) 网格数据的图形显示和窗口数据提取。用于计算深度的原始网格数据可能为各种不同的数据格式, 因此要在 MO 环境下显示其图形, 首先要研制几种常用数据格式的转换接口^[9], 并生成 shapefile 等值线文件; 根据异常等值线位置, 用计算窗口 (矩形框) 在屏幕上提取窗口内的网格数据, 关键是坐标要一致。因此, 要将等值线图形坐标、矩形窗口坐标和网格数据坐标统一投影到高斯坐标系下, 记录鼠标点击的坐标, 然后根据此坐标和窗口宽度计算

出数据范围, 再从网格数据中提取出指定范围的数据, 最后进行深度计算。

(2) 人机交互控制功率谱拟合切线的移动。由磁异常数据计算得到的对数功率谱显示到屏幕上后, 必须拟合一条最佳的直线, 才能根据其斜率得到较好的深度计算结果。而以往自动计算采用固定切线位置方法往往造成切线与谱线拟合存在较大的误差, 影响计算精度。为了解决这一问题, 采用人工可视化移动切线的方法, 确保切线与谱线拟合最优。通过多次尝试, 最后采取由鼠标左右键控制拟合直线移动的方法, 即通过鼠标左键使拟合直线向高频方向移动, 一次移动一个点, 每移动一点进行一次新的拟合计算, 计算方法采用一元线性回归算法, 拟合结果、深度计算结果及拟合误差即时显示在屏幕上, 所见即所得, 直至获得最佳深度结果, 方可结束计算。同理, 通过鼠标右键可以向较低频方向移动, 进行上述系列计算。

上述关键技术实现以后, 还需要将一系列的可视化过程在统一的 GIS 平台上有机地联系起来, 只有在各部分功能之间建立正确的连接关系, 才能实现整个深度计算过程的人机交互可视化。

2.3 软件功能介绍

图 1 为软件界面。软件主要包括如下功能:

(1) “文件”菜单可以对 ARCGIS 的 shapefile 格式文件进行新建、打开、保存、另存为、退出等操作。

(2) “查看”菜单可以选择打开和关闭工具栏和菜单栏。

(3) “视图”菜单可以对屏幕进行放大、缩小、移动、全屏显示。

(4) “图层”菜单可以添加 gif 格式的图像文件和 shape 格式的矢量文件到主窗口, 以便叠合深度计算结果进行对比分析。

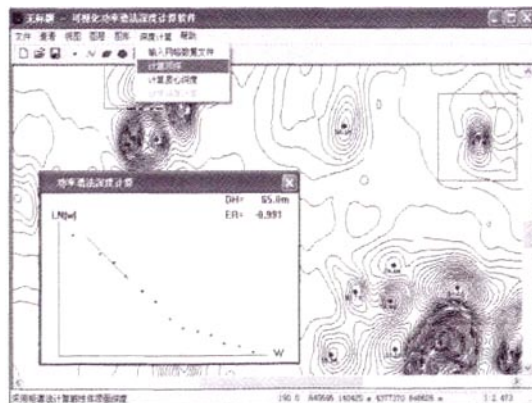


图 1 可视化功率谱法深度计算软件界面

(5)“图形”菜单可以在主窗口画点、画线、画椭圆、画矩形以及任意多边形,还可以对这些图元进行修改、删除等操作。

以上功能为深度计算搭建了可视化平台。

(6)“深度计算”菜单包括网格数据文件的输入、顶面深度的计算、质心深度的计算以及通过顶面深度和质心深度的计算底面深度。这部分是深度计算的核心。包括以下一系列功能:①以矢量图形形式显示磁异常等值线;②根据异常位置及形态,人机交互选择计算窗口位置,尽量保证异常主体位于窗口内,减少深度计算误差;③鼠标点击窗口自动提取窗口内网格数据,用于功率谱计算;④屏幕显示功率谱计算结果;⑤根据窗口显示的深度和误差数据,人机交互移动功率谱拟合切线,以获得最佳深度计算结果;⑥将深度计算结果位置以点的形式显示在屏幕上,并将计算值作为该点的属性,便于后期保存和处理。

3 乌达火区深度计算及其结果分析

乌达煤田处于鄂尔多斯盆地西缘,由于煤层露头自然形成的煤火及因小煤窑开采形成的煤火等原因,自1961年开始燃烧,到2004年底,火区总面积达到349.6万 m^2 ,吞噬乌达煤炭资源储量1 826.71万t,冻结煤炭资源5 087.19万t,而且极大地污染了周围的环境。2005年航遥中心在中德政府间科技合作项目、国家863计划和中国地质调查局支持下,在乌达矿区开展了1:5 000航磁、航电测量,获取了高精度航磁资料^[10]。

本次计算区范围是利用遥感高精度Quikbird影像资料,西、南、北以乌达17号层煤露头为界,东以乌达城区边界为界,圈出煤矿区边界。该区域内煤层露头出露广泛,是引起煤层火灾的危险区域。另外根据航磁异常野外检查结果,除地表民用设施干扰引起的异常外,测区内的航磁异常大都由煤层燃烧形成的烧变岩或正在燃烧的热源体引起,而主要煤火异常均位于此区域内。

根据物性特征分析结果,我们认为磁性体顶部深度就是煤火产生的高于500℃热异常体的顶部深度^[10]。该热异常体或者是现在已经冷却,即为烧变岩体,或者是正在燃烧,即为热源体,其内部存在着火点。假设着火点位于热源体内部,则根据热传导理论,若火点周围岩石热导率相等,等温的热异常体就会围绕高温点呈辐射状分布,温度由里向外逐渐降低,着火点只能位于热源体中心附近。因此,只要计算出热源体中心即磁性体中心,就可以计算出着

火点深度。这也是我们采用能谱法计算磁性体质心方法计算着火点的依据。

测区异常形态多为单个孤立异常,范围大都在400 m×400 m左右,磁测数据网格间距为30 m。因此我们选择计算窗口为20点×20点。首先用水平梯度极大值法计算出磁性体边界^[11],根据煤矿边界,参考遥感红外线火区范围,对全区的煤火异常进行了顶面深度和中心深度的计算,计算结果见图2。图中,虚线是计算区范围,实线是由水平梯度极大值法计算出的航磁圈出的火区边界。该边界区域是由于煤火燃烧产生的磁性体分布范围,磁性体可能是烧变岩,也可能是正在燃烧火区。具体判断应结合地面物探资料及地质调查资料来进行。图中不同图案的小圆点为可视化功率谱法计算得到的磁性体顶深结果,着火点深度(即磁性体中心深度)也有类似的结果。

从图2可以看出,乌达矿区热源体顶深在0~70 m之间,其中20~40 m深度点居多,占有所有计算

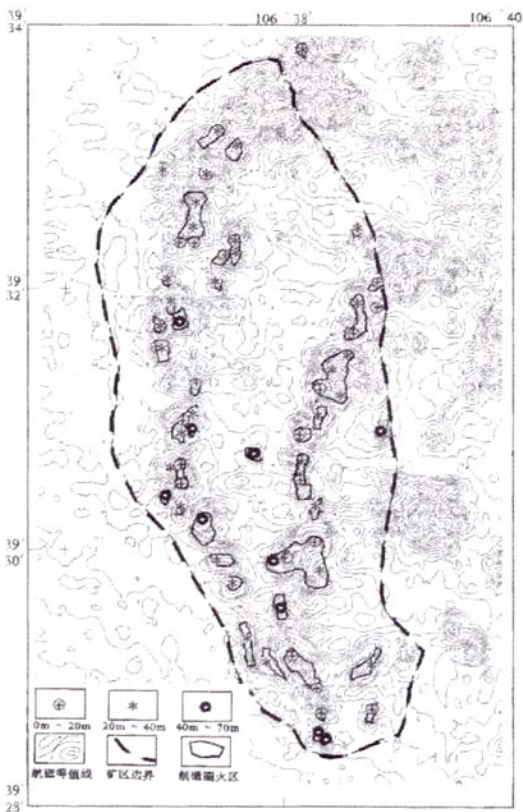


图2 可视化功率谱法计算磁性体顶深结果

① 于长春,陈斌,王卫平,等.物探技术在新领域的应用研究报告.中国国土资源航空物探遥感中心,2007.

点的 51%, 主要分布在乌达矿区北部。0 ~ 20 m 深度较浅的深度点主要位于测区东部偏南。40 ~ 70 m 深度点主要位于矿区西南部。

从计算结果知, 乌达矿区着火点(中心深度)在 30 ~ 90 m 之间, 其中 50 ~ 70 m 深度点居多, 占有计算点的 57%, 主要分布在乌达矿区北部。70 ~ 90 m 深度点主要位于矿区西南部。

4 结论

测区内异常的形状和大小毕竟存在差异, 根据异常实际大小和位置选择适当的窗口进行反演提高了计算的精度。在人机交互可视化环境下进行计算提高了计算过程的可操作性和计算速度。通过本次对地下煤火自燃区的顶面埋深和着火点深度计算证明了本方法的方便实用性, 同时通过野外实地检查证明了计算结果的正确性。可见, 功率谱可视化深度计算方法为中小测区的全区深度计算, 以及较大测区的深度精细计算提供了一个有效实用的手段。

参考文献:

- [1] Spector A, Grant F S. Statistical models for interpreting aeromagnetic data[J]. *Geophysics*, 1970, 35: 293.
- [2] Bhattacharyya B K, Leu Lei Kuang. Spectral analysis of gravity

and magnetic anomalies due to rectangular prismatic bodies[J]. *Geophysics*, 1977, 42: 41.

- [3] 侯重初, 杨全成. 用谱分析法建立一个位场反演系统[J]. *物探化探计算技术*, 1990, 12(4): 21.
- [4] 申宁华. 用航磁数据计算居里点深度的原理及方法[J]. *物探化探计算技术*, 1985, 7(2): 89.
- [5] 申宁华, 李春华, 张贵宾, 等. 用康滇大陆古裂谷带地区航磁异常计算居里深度[J]. *地球物理学报*, 1986, 29(5): 76.
- [6] 郭志宏. 中国东部航磁数据处理计算及成果分析[D]. 长春: 吉林大学, 1988.
- [7] 李成立, 谢春临, 吕庆田. 利用位场功率谱计算地质体顶底深度效果[J]. *大庆石油地质与开发*, 1998, 17(5): 45.
- [8] 眭素文, 于长春, 姚长利. 起伏地形剖面重磁异常半智能处理解释软件及应用[J]. *物探与化探*, 2004, 28(1): 65.
- [9] 于长春, 郭志宏, 眭素文. 航空物探领域的 GIS 开发与应用[J]. *物探化探计算技术*, 2003, 25(1): 39.
- [10] 熊盛青, 陈斌, 于长春, 等. 地下煤火自燃遥感与地球物理探测技术[M]. 北京: 地质出版社, 2006.
- [11] 郭志宏, 熊盛青, 曹建平. 航磁异常总梯度模反演方法的实用化改进及软件研制[J]. *物探与化探*, 2004, 28(6): 51.
- [12] 眭素文, 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): 62.
- [13] 薛伟. Map Objects 地理信息系统程序设计[M]. 北京: 国防工业出版社, 2004.

A VISUALIZED DEPTH ESTIMATING METHOD BY POWER SPECTRUM AND ITS APPLICATION TO A COAL FIRE AREA

SUI Su-wen^{1,2}, YU Chang-chun², XIONG Sheng-qing², CHEN Bin²

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

Abstract: The power spectrum method has been extensively and successfully used by geophysicists both in China and abroad to estimate the buried depth of magnetic bodies. However, the estimated results only statistically reflect the average buried depth of the magnetic bodies under the calculation window, and the estimating precision is thus affected as a result of equal window size and equal sliding step in calculation. In this paper, the authors have developed a visualized and high precision program that can select window size and site and sliding step voluntarily. Its application to a coal fire area demonstrates the practicability of the program.

Key words: power spectrum; visualization; depth calculation; coal fire; coal fire dot

作者简介: 眭素文(1967-), 女, 物探高级工程师, 硕士, 现为中国地质大学(北京)在读博士。就职于中国国土资源航空物探遥感中心, 主要从事航空物探方法研究和 GIS 开发与应用工作, 发表文章 10 余篇。Email: bjssw1@agrs.cn