

## 航空地球物理勘探资料微调平处理

骆遥, 王林飞, 何辉

(中国国土资源航空物探遥感中心, 北京 100083)

**摘要:**航空物探测量中测线间水平往往存在差异, 表现为沿测线方向的条带。调平处理旨在减少或消除测线间的水平差, 是航空物探资料处理中的关键, 对航空物探资料处理和解释具有重要作用。笔者以实际的航磁资料处理为例, 详细介绍了航空物探资料微调平处理的原理与实现。微调平处理中首先通过方向滤波从原始资料中提取噪声网格, 并按飞行测线提取噪声网格中的数据并分离有用的地质信息, 最终将分离后的测线水平误差从原始资料中去除得到调平后资料, 以此实现航空物探资料的微调平处理。同时, 针对资料处理中遇到的诸如滤波器选取、异常分离阈值确定、最终调平效果检验等实际问题进行讨论, 这对理解微调平并应用于实际资料处理均具有意义。

**关键词:**航空物探; 资料处理; 微调平; 测线水平

**中图分类号:** P631

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-8918(2012)05-0851-05

航空地球物理勘探(航空物探)多以飞机为载体, 通过装载多种仪器在空中探测和测量地球物理场。航空物探能够快速获取并研究地球岩石圈特别是与地壳有关的多种地球物理场信息, 具有探测效率高、工作成本低、适宜大面积作业、能进行海陆联测等突出优点<sup>[1]</sup>。航空物探按测量比例尺规定的间距平行敷设测线, 飞机沿预先布置的测线进行测量飞行, 测量仪器的采样率通常为每秒10次, 甚至更高, 测线间距(可达几千米)要远大于测点间距(有时仅几米)。航空物探固有的测量特点决定了其测线间往往存在水平差异, 需要进行水平调整(levelling), 调平处理是航空物探数据处理的关键性步骤<sup>[2]</sup>, 调平质量直接影响到航空物探资料的最终质量, 对数据处理和解释具有重要意义。

航空物探测量包括航空磁法、航空重力、航空能谱和航空电磁测量等, 测量中测线间水平不一致的原因虽不尽相同, 却均表现为一系列沿测线方向的条带干扰, 为此往往要在联络测线的方向上布置一定量的切割线(tie line), 利用测线与切割线交叉点处的测量差值调整测线间的水平, 即航空物探资料处理中普遍采用的切割线调平处理(tie line levelling)<sup>[3-5]</sup>。经切割线调平后的资料仍会残存一定的水平差, 通常需进行微调平处理(microlevelling)<sup>[6-7]</sup>。微调平采用频率域与空间域组合滤波, 在无控制线条件下通过分离地质信息与噪声实现资料调平, 在航磁编图中发挥了重要作用<sup>[8-9]</sup>。尽管

众多学者针对沿测线方向上的条带提出了一系列调平或去条带处理方法<sup>[10-16]</sup>, 但目前应用最广泛的仍是切割线调平和微调平处理。相对于切割线调平, 微调平处理更为灵活, 调平过程中经验性的处理较多, 为此, 笔者探讨了微调平处理的原理与实现, 对微调平中的关键性问题分析, 这对实际应用微调平进行航空物探资料处理以及实际使用调平后航空物探资料具有意义。

### 1 微调平处理原理

为了说明微调平处理原理, 我们以 Geosoft 公司 Oasis montaj 软件附带的航磁资料为例进行讨论。资料中共包含117条航磁测线, 测线间距250 m, 为原始的航磁总场, 由于侧重于讨论微调平, 没有对资料进行正常场校正、切割线调平等任何处理。图1给

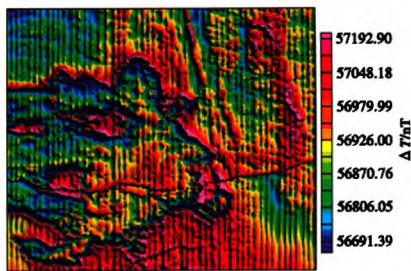


图1 航空磁测实测的地磁场强度阴影

出了地磁场强度的彩色立体阴影图(网格间距 50 m × 50 m),可以看出沿测线方向(南北向)存在较明显的条带现象。由于没有进行日变改正,没有消除地磁场随时间变化影响,图 1 中的条带主要由外源场引起。通过设立基站,监测地磁场随时间变化,并将外源场变化从空中测量数据中减去,一定程度上可以达到消除地磁场随时间变化影响水平调整的目的;但外源场引起的地磁场变化在地面和空中并不完全一致,且基站的空间控制范围有限,这种校正方法往往不能彻底消除外源场影响,加之城市化进程不断推进使得人文干扰日益严重,日变改正成为制约提高航磁资料精度的重要因素。除地磁场随时间变化外,相邻测线间飞行高度差异也是引起航磁资料测线间水平不一致的共有原因,尤其是中高山地区航空磁测。尽管其他航空物探测量中引起测线水平差异的原因不完全与航空磁测相同,但表现出的测线水平差异却与图 1 无异——无论是日变还是飞行高度差异引起,笔者均以图 1 的航磁总场为例进行讨论。

### 1.1 条带状干扰提取

调平处理实际是对航空物探资料中条带状干扰提取并分离的过程,滤波无疑能分离出图 1 中的条带状干扰。Minty<sup>[6]</sup>建议沿测线方向进行低通滤波、垂直测线方向进行高通滤波来提取条带干扰,这种处理实际上等效于方向滤波。Oasis montaj 中采取了类似的方式,Ferraccioli 等<sup>[7]</sup>介绍了 Oasis montaj 中采用的滤波器。从网格数据中分离条带采用的是余弦方向滤波加高通巴特沃斯滤波器,有

$$D(\theta) = 1 - |\cos(\alpha - \theta + \pi/2)|^n, \quad (1)$$

$$B(k) = 1 - \frac{1}{1 + (k/k_0)^n}. \quad (2)$$

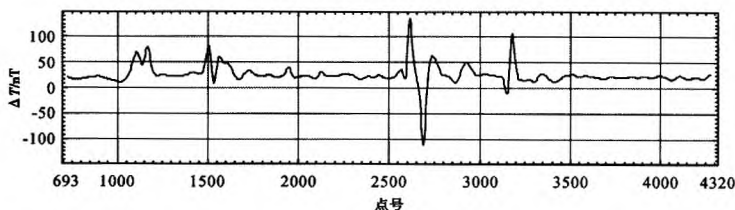


图 3 某测线条带干扰提取结果

至超过 100 nT,必须将这些地质信息进行分离。

地质信息同条带干扰所处频段并非截然不同,彻底将其分离需要考虑空间域方法。由于提取的条带干扰中含有很多窄带的异常尖峰,通常要先分离

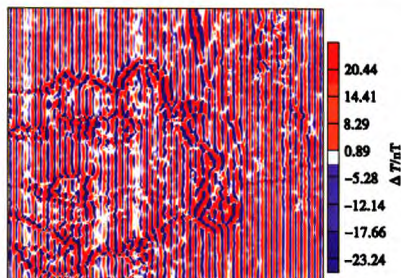


图 2 提取的条带干扰

其中:式(1)是频率域  $\alpha$  方向上  $n$  阶方向滤波器,式(2)是  $n$  阶高通巴特沃斯滤波器; $\theta$ 、 $k$  分别是圆波数和波数, $k_0$  对应高通滤波的波数。 $\alpha$  应选择沿测线方向,通常方向滤波器阶数取 2,巴特沃斯滤波器阶数取 6,波长为 4 倍测线间距。按上述滤波器组合提取图 1 中的条带,图 2 给出了滤波结果,可以看出通过频率域滤波可以将资料中条带干扰提取出来,但图 2 并非只有条带干扰,还包含大量的磁异常。对比图 1 可知,图 2 中含有的磁异常一定程度上反映了地质构造的轮廓,对后期资料解释具有重要意义。由于噪声干扰和地质信息所处的频段不可能截然分开,频率域滤波往往无法彻底分离有用信息和噪声,需要进一步提取和分离条带干扰。

### 1.2 地质信息分离

航空物探资料中的条带状干扰表现为沿测线上的低频水平差异,将图 2 提取的条带状重新按测线进行重采样,图 3 给出了 10181 线的采样结果。可以看出,提取出的条带干扰除存在近 25 nT 的水平差外,还叠加了丰富的航磁异常,某些异常的幅度甚

这些明显的地质信息,通行的做法是确定判别地质异常的阈值,Oasis montaj 将大于阈值的尖峰异常归零或者将大于阈值的尖峰异常削平。图 4 给出了 10181 线去尖峰异常后的条带干扰,此处阈值取 28



nT。该处理虽然能够从条带干扰中分离出部分尖峰异常,但剩余的条带干扰中(图4)仍残存众多幅度小于设定阈值的地质信息,且条带干扰非光滑连续,需要进一步处理。航空磁测中地磁场随时间变化引起的测线间水平差异往往较为平缓,其他航空物探测量中测线水平也表现为低缓的背景差异,为了从图4中提取出最终的条带干扰,通常采用非线性滤波处理。非线性滤波由 Naudy 等<sup>[17]</sup>提出,也称

作 Naudy 滤波,20 世纪 70 年代末期被介绍到国内<sup>[18-20]</sup>,中国国土资源航空物探遥感中心研究人员曾对该方法进行过系统研究和改进<sup>[21-22]</sup>并集成至 WINDOWS 系统下航空物探软件系统——空中探针(AirProbe)中<sup>[23]</sup>。图5给出了图4经非线性滤波处理后的结果,其中滤波波长是 1 250 m。可以看出, Naudy 滤波完全去掉了条带干扰中残存的低幅度短波地质信息,图5即为经地质信息分离后剩余的微

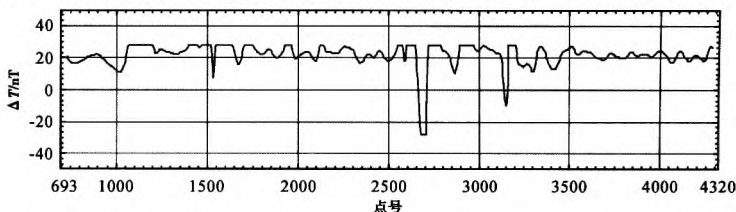


图4 去尖峰异常后的条带干扰

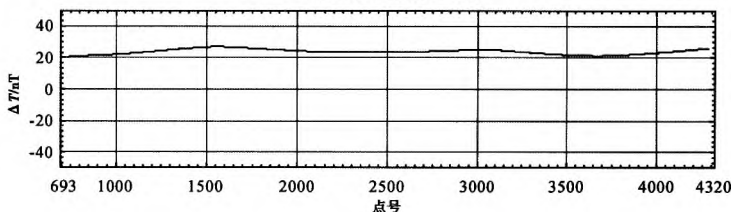


图5 Naudy 滤波后的条带干扰

调平量。

### 1.3 水平调整

将分离出的条带干扰从测线数据中去除,即可获得微调平处理后的结果。图6给出了微调平后测线数据网格化的结果,可以看出经过微调平处理后资料品质得到明显改善,但测线间还残存一定的水平差,可重复上述过程直至取得合理的效果。由于微调平处理并不针对特定航空物探资料,仅针对条带现象进行资料处理——无论条带是由飞行高度差异引起的还是其他因素引起的,方法本身可适用于任何航空物探资料。

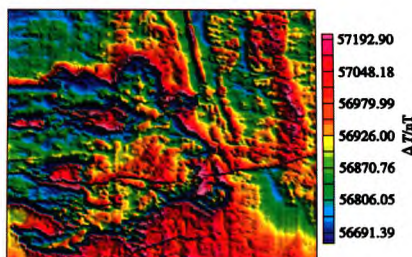


图6 经微调平处理后的航磁总场

粹的数学手段,缺乏物理依据,为不少学者所诟病。笔者认为这种倾向有失偏颇,航空物探测量往往是相对测量,特别是航空磁测。航空磁测中测量的是地磁场强度,但地球磁场是不断变化的,航空磁测中的  $\Delta T$  是相对于正常地磁场的磁异常,去掉了相对变化的外源场,而正常地磁——地核场也在长期变化;此外,航空磁测中不同的离地高度也进一步将测

## 2 微调平中的相关问题

前面分析可知微调平处理分为条带提取、分离地质信息和调平量校正三个环节,通过合理选取处理参数能够达到改善资料品质的效果。但通常认为,调平处理带有很大的主观性,是一门数据处理的“艺术”,认为包括切割线调平在内的调平处理是纯

量值局限在相对的范围,每一幅航磁图件的磁场水平都是根据数据状况和解释者的需要随机确定的,不同区域航磁图磁场水平往往并不一致<sup>[9]</sup>,通常要求  $\Delta T$  正负水平大体相当。对航磁资料进行整体的直流分量改正或针对某一剖面进行整体或分段的直流分量或近似直流分量调整并不影响航磁资料的质量,不会改变异常面貌或损失地质信息,航空磁测的测量原理决定了上述资料调平的基本原则。例如,图 7 给出测线水平调整量在 20.55 ~ 27.08 nT 之间,平均值是 23.92 nT,标准差是 1.59 nT,近似为一个低频长波长直流分量,基本反映了外源场特征,类似地,可以按外源场变化规律对全部调平量进行检查,图 6 给出了对调平量进行网格化的结果。图 6 说明调平处理中没有丢失对地质解释起重要作用的磁异常信息。事实上,最简单的做法就是将调平量直接成图,以检验调平处理是否为主观的“艺术加工”。



图 7 地磁场强度最终微调平量

对最终调平量进行检查,可以根据实际航空物探资料测线水平不一致原因进行核对,以确保调平过程客观。微调平过程中需要特别注意地质信息分离这一环节,对条带中残存的尖峰异常按阈值去除并非必要过程,Naudy 滤波也可以将其直接去除,提出 Naudy 滤波的目的就在于分离或消除这种尖峰异常,但预先去除残留尖峰往往有利于 Naudy 滤波处理。去除尖峰异常时要考虑选择合理阈值,阈值必须大于测线的低频水平差,否则无法得到真实的条带干扰。提取条带的方法也并非仅有 Naudy 滤波,多项式拟合、样条拟合等方法同样适用,但笔者更倾向于使用空间域方法而非频率域方法,实际的信号和噪声往往不能从频率上简单加以区分。提取调平量时,Naudy 滤波的波长需要合理选取,波长过短或过长均不能有效提取条带,此外 Naudy 滤波同多项式拟合、样条拟合等一样存在边界效应,只不过不如多项式拟合那样明显,处理中应予以重视。微

调平处理的优势在于能够保持原始资料分辨率的同时,不移动或歪曲有意义的地质异常,但数据处理只能改变资料的信噪比,不能增加资料信息,改变信噪比过程本身受制于资料处理人员对异常和噪声的认识程度,这对理解微调平或其他的航空物探资料处理尤其重要。

### 3 结论

通过分析航空物探资料微调平原理和实现,以实际航磁资料处理为例,指出实现微调平处理的关键性步骤和手段,讨论了航空物探资料微调平处理中的关键性问题,这对深入理解微调平处理以及实际应用微调平处理航空物探资料均具有实际意义。

### 参考文献:

- [1] 熊盛青. 发展中国航空物探技术有关问题的思考[J]. 中国地质, 2009, 36(6): 1366-1374.
- [2] Luyendyk A P J. Processing of airborne magnetic data[J]. AGSO Journal of Australian Geology and Geophysics, 1997, 17(2): 31-38.
- [3] Foster M R, Jines W R, Van Der Weg K. Statistical estimation of systematic errors at intersections of lines of aeromagnetic Survey Data[J]. Journal of Geophysical Research, 1970, 75(8): 1507-1511.
- [4] Kellogg W C, Yarger H L, Robertson R R, et al. Diurnal drift removal from aeromagnetic data using least squares[J]. Geophysics, 1978, 43(6): 1148-1156.
- [5] Green A A. A comparison of adjustment procedures for leveling aeromagnetic survey data[J]. Geophysics, 1983, 48(8): 745-753.
- [6] Minty B R S. Simple micro-leveling for aeromagnetic data[J]. Exploration Geophysics, 1991, 22(4): 591-592.
- [7] Ferraccioli F, Gambetta M, Bozzo E. Microlevelling procedures applied to regional aeromagnetic data: An example from the Transantarctic Mountains[J]. Geophysical Prospecting, 1998, 46(2): 177-196.
- [8] 中国国土资源航空物探遥感中心. 中国及毗邻海域航空磁化  $\Delta T$  异常图(1: 500 万)[M]. 北京: 地质出版社, 2004.
- [9] 王乃东. 有关 1: 25 万航磁系列图的几个问题[J]. 物探与化探, 2007, 31(5): 459-464.
- [10] Green A A. Leveling airborne gamma-radiation data using between-channel correlation information[J]. Geophysics, 1987, 52(11): 1557-1562.
- [11] Nelson J B. Leveling total-field aeromagnetic data with measured horizontal gradients[J]. Geophysics, 1994, 59(8): 1166-1170.
- [12] Pilkington M, Roest W R. Removing varying directional trends in aeromagnetic data[J]. Geophysics, 1998, 63(2): 446-453.
- [13] Fedi M, Florio G. Decorrelation and removal of directional trends of magnetic fields by the wavelet transform: Application to archaeological areas[J]. Geophysical Prospecting, 2003, 51(4): 261

- 272.
- [14] Mauring E, Kihle O. Leveling aerogeophysical data using a moving differential median filter[J]. *Geophysics*, 2006, 71(1): L5 - L11.
- [15] Huang H. Airborne geophysical data leveling based on line - to - line correlations[J]. *Geophysics*, 2008, 73(3): F83 - F89.
- [16] Beiki M, Bastani M, Pedersen L B. Leveling HEM and aeromagnetic data using differential polynomial fitting[J]. *Geophysics*, 2010, 75(1): L13 - L23.
- [17] Naudy H, Dreyer H. Essai de filtrage non - lineaire applique aux profils aeromagnetiques[J]. *Geophysical Prospecting*, 1968, 16(2): 171 - 178.
- [18] 贝庚. 用非线性滤波法处理航磁剖面[J]. *地质与勘探*, 1978, 14(1): 90 - 92.
- [19] 张维斌. 介绍法国处理航磁数据中的简单方法[J]. *物探化探计算技术*, 1980, 2(1): 48 - 55.
- [20] 梁锦文. 一种非线性滤波方法的试验效果[J]. *物探化探计算技术*, 1981, 3(2): 22 - 28.
- [21] 于长春, 熊盛青, 郭志宏, 等. 改进的非线性滤波方法在中高山地区的应用[J]. *物探与化探*, 2003, 27(1): 39 - 42.
- [22] 郭志宏, 刘浩军, 熊盛青. 平面网格位场数据的空间域非线性速率滤波方法[J]. *地球物理学进展*, 2003, 18(1): 134 - 137.
- [23] 刘浩军, 薛典军, 郭志宏, 等. 航空物探软件系统研制[J]. *物探与化探*, 2003, 27(2): 146 - 149.

## MICROLEVELLING PROCESSING OF AIRBORNE GEOPHYSICAL DATA

LUO Yao, WANG Lin-fei, HE Hui

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

**Abstract:** Airborne geophysical data often suffer from corrugations or line level errors, which can be adjusted or removed by using levelling procedure. Levelling is a critical step in airborne geophysical data processing and interpretation. Microlevelling routine can be applied to removing the remaining line level after tie line leveling. Based on practical aeromagnetic data levelling, the authors deal in detail with the principle of microlevelling and key steps in microlevelling procedure. For the purpose of microlevelling data, a directional high pass filter perpendicular to the flight line direction is first employed to produce a decorrugation noise grid. The noise grid is then extracted as new channel flight data. Amplitude limiting and low pass filtering can be applied to the noise channel so as to remove the residual geological signal and leave only the component of line level drift, which is then subtracted from the original data to produce the final microlevelled data. This paper has also discussed some key technical problems in airborne geophysical data leveling, especially in microlevelling. The discussion in this paper may be useful in practical data processing.

**Key words:** airborne geophysics; data processing; microlevelling; line level errors

**作者简介:** 骆遥(1982-), 男, 2008年毕业于中国科学院地质与地球物理研究所, 从事航空地球物理勘探工作。