

doi: 10.6053/j.issn.1001-1412.2022.02.012

航空瞬变电磁 TS150 测量数据的校正分析

田达志, 杨柳, 郭喆, 杨望, 林曼曼, 刘建霞

(中国冶金地质总局地球物理勘查院, 河北 保定 071051)

摘要: 在航空电磁测量工作中发现, 由于地面障碍物的存在以及气流的变化, 吊舱离地的高度会发生起伏变化, 同时伴随有吊舱姿态的变化, 并产生干扰航电异常; 据此航空瞬变电磁测量的原始数据需要进行高度校正和姿态校正, 但目前引进的国外航空电磁测量系统未配有姿态测量设备。本文根据航空瞬变电磁理论分析吊舱的离地高度和姿态的变化对电磁响应影响的变化情况, 通过 2 条测线数据的校正效果, 证明高度校正和姿态校正的有效性及必要性, 提出航空瞬变电磁测量系统加装吊舱姿态测量设备的建议。

关键词: 航空瞬变电磁; 姿态校正; 高度校正; 指数衰减

中图分类号: P631.325 **文献标识码:** A

0 引言

航空电磁测量技术经过了 70 多年的发展, 已经研发出固定翼航空电磁测量系统和直升机航空测量系统。20 世纪 90 年代, 直升机的发动机功率增大, 使得直升机航空电磁测量系统的大功率发射成为可能; 新的数字技术和计算机数据技术的广泛应用, 使航空电磁系统的电子设备及收录系统向小型化、轻量化发展, 航空电磁测量系统的稳定性和自动化程度得到保障, 特别是时间域直升机航空电磁测量发展迅速, 成为当前航空电磁测量的主流系统^[1-2]。在应用领域, 航空电磁测量技术不仅在地质找矿工作中发挥重要作用, 在工程地质、水文地质、环境评估等领域也得到推广和应用。

我国自 20 世纪 70 年开始研究航空电磁测量, 原地矿部物化探研究所在 80 年代中期到 90 年代初在胶东地区开展了金矿普查飞行^[3]。近年, 我国航电测量技术再次得到发展, 开始引进国外的航空电磁测量技术。2011 年, 中调局航遥中心引进了加拿大的 AeroTEM-IV 系统, 完成了多个生产飞行任务。2013 年, 中国冶金地质总局物勘院从加拿大引进了

TS150 时间域航空瞬变电磁测量系统 (HTEM) 后, 也开展了多个航空瞬变电磁测量项目。而核工业航测遥感中心则采用与加拿大 Geotech 公司合作方式, 在我国开展了航空瞬变电磁测量工作^[4]。殷长春、王绪本^[5]、陈斌、王卫平^[6]、罗延钟等^[7]对航空电磁勘探技术相关理论进行了研究。我国的航空电磁测量工作中尚有技术环节还需完善, 一些技术问题也需及时研究和解决。比如在数据处理过程中高度校正的方法及技术要求、是否开展姿态校正等问题, 仍处于探讨和研究中。本文以 TS150 航空瞬变电磁系统为例, 进行测量数据的校正。

TS150 航空瞬变电磁系统要求测量过程中吊舱离地大约 30 m 高度上保持平飞, 系统各部分的主要技术参数为: ①硬架式发射线圈, 直径 8.5 m, 线圈 7 匝; ②最大发射偶极矩为 155000 Am²; ③发射电流波形为双极性正三角波 (图 1); ④发射线圈拖缆长度为 55 m。通过野外生产测量工作发现, 测量过程中吊舱难以保持在离地约 30 m 的高度状态下平稳飞行, 飞行测量时吊舱 (或地形) 产生上下起伏或左右摆动, 其与地面的耦合关系随之发生变化, 这种由于飞行高度和姿态的改变引起的干扰异常, 与浅表环境下的低阻目标地质体异常叠加在一起难以区分, 给航空电磁测量的异常解释工作造成不便。因

收稿日期: 2021-08-15; 改回日期: 2021-12-21; 责任编辑: 余和勇

作者简介: 田达志 (1973—), 男, 高级工程师, 应用地球物理专业, 从事航空物探应用及研究工作。通信地址: 河北省保定市阳光北大街 139 号, 中国冶金地质总局地球物理勘查院; 邮政编码: 071051; E-mail: 1003796106@qq.com

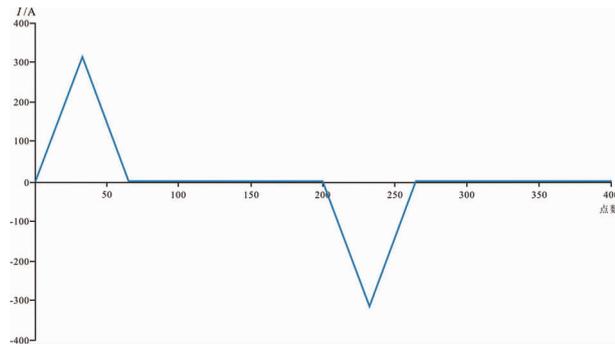


图 1 航空瞬变电磁系统发射电流波形图

Fig. 1 Waveform of emission current from airborne transient electromagnetic system

此有必要通过数据校正来消除这类干扰异常。

1 数据校正的理论基础

在实际生产飞行中,由于地形起伏或地面障碍物的存在,测线飞行过程中吊舱离地高度存在较大的变化,因此会引起电磁响应信号的强弱变化。此外,受起伏飞行、气流、飞行速度变化等因素的影响,通过吊绳与飞机之间软连接的吊舱会发生摆动、倾斜、偏航等变化,导致收发线圈的飞行方向和姿态相对正常飞行条件发生改变。吊舱中的收发线圈与地面的耦合关系发生改变,必然会改变电磁响应信号的强弱。测量系统电磁响应信号的强弱变化而产生的干扰异常在实际测量中是非常明显的,尤其是地表岩石的电阻率较低时能引起明显的干扰异常。为了排除这些干扰因素、获取地质体的真实航电信息,需要进一步完善航空电磁测量数据处理技术。

在飞行测量过程中,由于存在吊舱离地高度的变化和吊舱姿态的变化,实测数据完成背景场去除、天电场去除等环节之后,还需要进行高度校正和姿态校正,消除吊舱高度及姿态变化的影响。近年来,我国在航空电磁测量领域开展了大量的研究,为航空电磁测量工作建立了较好的理论基础,也是进行航空电磁测量数据高度校正和姿态校正的科学依据。依据有关理论中的航空电磁系统装置分类,由 TS150 航空瞬变电磁系统组成可知该系统采用水平共面(HCP)构架,因为一般离地高度在 30 m 以上,发射线圈直径 8.5 m,接收线圈直径 0.8 m,收发线圈距 < 3 m,收发线圈的尺寸相对于距地面的高度较小,可以近似看成磁偶极子源。

1.1 高度校正

依据平面电磁波的空中传播理论^[8],在无限均匀介质中传播方程为

$$\nabla^2 E = \sigma \mu \frac{\partial E}{\partial t} + \epsilon \mu \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} \quad (1)$$

把解写成沿 Z 轴正方向行进的平面波

$$E = E_0 e^{i(kz - \omega t)}$$

依据感应电磁法理论基础^[8],电流源远离场源的衰减公式为

$$A_{x, y, z} = C_{x, y, z} e^{-kz}$$

对其 E_x 分量求解

$$E_x = \omega \mu C_x e^{-bz} e^{-i(\omega t + \alpha z - \pi/2)} \quad (2)$$

其振幅和相位分别为

$$|E_x| = \omega \mu C_x e^{-bz}, \varphi(t) = \omega t + \alpha z - \pi/2$$

其中, b 为衰减系数, a 为相位系数。

在电磁场理论上,傅良魁^[8]指出,频率域电磁场在地面下随深度的衰减规律为按指数规律衰减,即: $E_x(\omega) = E_{x0}(\omega) e^{-kz}$ (其中 $E_{20}(\omega) = \omega \mu C_{20}$),这与沿空中 Z 轴方向平面波方程的衰减规律是一致的。而在分析航空瞬变电磁法的衰减规律时,傅良魁^[8]、李金铭^[9]基于原长春地质学院 M-1 瞬变航电仪测量试验的基础上,均指出“由于航电瞬变场的复杂性,瞬变衰减规律很难用一种数学式表达。但一般可近似地用指数规律描述”。王卫平等^[6]也提出均匀大地上方各种装置的频率域航空电磁响应与飞行高度之间的衰变为近似指数的关系。

TS150 航空瞬变电磁系统发射电流波形为三角波,三角波的傅里叶级数为

$$f(t) = \frac{8A}{\pi^2} \left(\sin \omega t + \frac{1}{3^2} \sin 3\omega t + \frac{1}{5^2} \sin 5\omega t + \frac{1}{7^2} \sin 7\omega t + \frac{1}{9^2} \sin 9\omega t + \dots \right) \quad (3)$$

从公式(3)可以看出,三角波瞬变场源的 3 次谐波的电压幅值只有基波的 1/9, 5 次谐波的电压幅值只有基波的 1/25。电磁波的能量与其电压幅值的平方成正比,所以三角波瞬变场的能量主要是基波, 3 次谐波的能量只有基本的 1/81,其他谐波则更小,所有谐波能量占比应不到 10%。在测量吊舱的离地高度远小于基波的波长时,其衰减计算过程中用基波衰减系数计算引起的误差应 < 10%,因此,三角波电磁场源与频率域电磁场的衰减规律相近似。TS150 航空瞬变电磁测量系统的电磁响应信号也可以认为是随着吊舱离地高度的变化呈现近似指数规律衰减的,为了简便快速计算吊舱离地高度的衰减

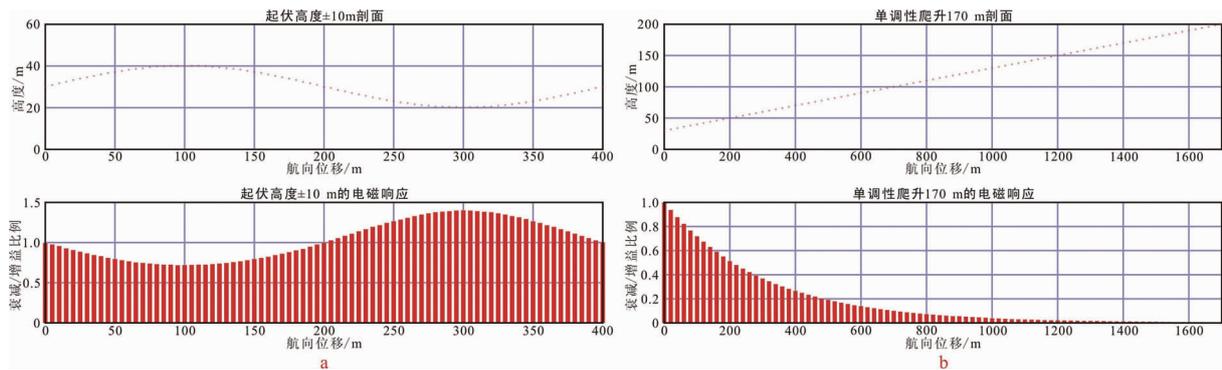


图2 不同飞行距离和飞行状态的电磁场强度衰减变化图

Fig. 2 Electromagnetic field intensity decay diagram of flying at different length and situation

a. 飞行距离 400 m 起伏 ±10 m 的电磁场强度衰减变化图；

b. 飞行距离 1700 m 单调性爬升 170 m 的电磁场强度衰减变化图

系数,高度校正系数可采用指数衰减规律

$$E_x(\omega) = E_{x0}(\omega)e^{-kz}$$

进行计算(式中, z 为离地高度)。

为了分析对比吊舱离地高度对电磁响应信号的具体影响,根据航空电磁测量项目野外飞行测量的实际情况,以均匀水平层状介质上方 30 m(离地高度)作为起伏飞行测量模型的参考基准,设计飞机沿测线路径无偏航飞行行为前提下的 2 种情况:一种是在距离为 400 m 的飞行中完成 ±10 m 的纵向起伏(图 2a),一种是在距离为 1700 m 飞行中完成 170 m 的单调性爬升(图 2b),并测量不同情况下的吊舱离地高度和电磁场强度衰减变化。从图 2 可见,远离地面时感应电动势逐渐减小且衰减速率放缓,趋近地面时感应电动势逐渐增大且增益速率较快。这种飞行测量高度的起伏将导致测量数据与水平飞行测量数据产生较大偏差,形成干扰航电异常,为消除这种测量线圈离地高度变化的影响,把每条测线的实测数据按一定衰减规律统一校正到一个高度上来,称之为高度校正。

1.2 姿态校正

由于飞行状态的调整及短时气流的影响,吊舱在飞行中会发生摆动、倾斜、偏航等变化(图 3),导致吊舱的飞行方向和姿态相对正常飞行条件发生改变,收发线圈与地面之间不再是平行关系,其耦合关系也随之发生变化,由于吊舱姿态的改变造成了测量数据一定程度上的失真。殷长春^[1]分析了直升机航空电磁测量装置的姿态对测量的影响,认为 r/δ 和 r/h 的比值很小时,感应效应部分的变化很小,总姿态效应逼近几何效应。其中, r 为收发距(TS150 约为 3 m), h 为离地高度(一般为 30 m), δ 为电磁场

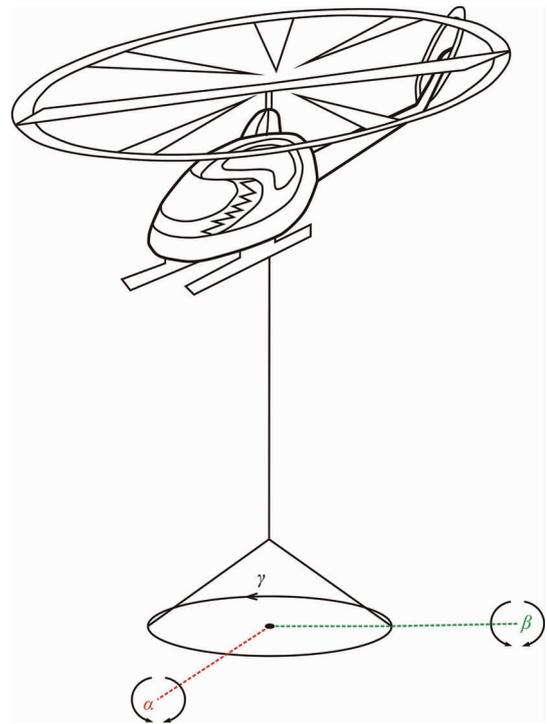


图3 航空瞬变电磁系统吊舱姿态变化示意图

Fig. 3 Sketch showing attitude variation of airborne transient electromagnetic system

的趋肤深度函数。水平共面装置(HCP)双旋转有无姿态效应时的接收机响应之比公式为

$$V(\alpha, \beta)/V(0, 0) = 0.5(1 + \cos^2\alpha \cos^2\beta) \quad (4)$$

式中, α 为摆动角, β 为倾斜角。

航空电磁测量项目一般要求飞行速度为 90 km/h 匀速平飞,保持吊舱与地面为平行状态。因为飞机和吊舱之间是通过吊绳进行软连接的,由于飞行的起伏、气流的变化,吊舱姿态也会随之发生改变。为了分析对比吊舱姿态的具体影响,根据航空

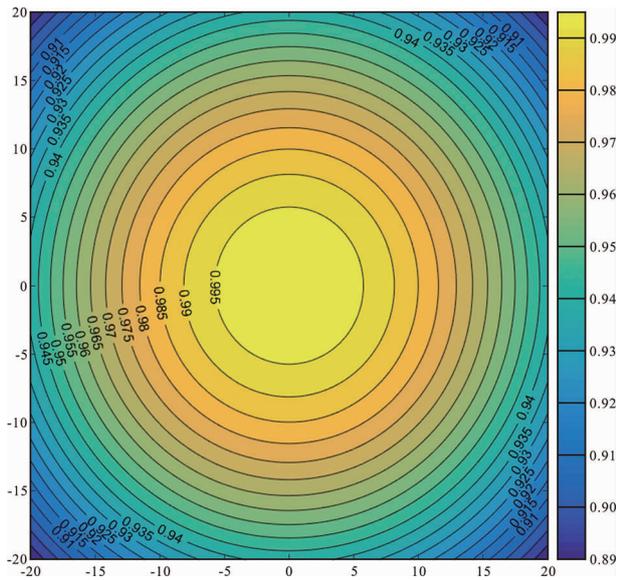


图 4 姿态效应的几何效应等值色阶 2 维拟合图

Fig. 4 2D fitting diagram of geometric effect of attitude effect equivalent color scale

电磁测量项目野外飞行测量中的实际情况,以均匀水平层状介质上方飞行为基准,假设飞行状态改变,吊舱发生了摆动(α)和俯仰(β)2 种情况,其角度变化一般 $<20^\circ$ 。采用有姿态效应时接收机响应公式进行模拟计算,根据公式(4)计算结果绘制拟合图(图 4)吊舱摆动角与倾角的几何效应进行等值色阶 2 维拟合,可以看出吊舱的摆角和倾角变化影响电磁响应信号的幅值和变化速率。吊舱(即收发线圈俯仰或摆动)姿态角度为 20° 时响应系数为 0.94,即非平稳飞行时的电磁响应比平稳飞行时电磁响应减少 6%,当二者同时发生时能使响应信号衰减 10% 左右,引入的误差将对测量结果产生一定的影响,需要对飞行测量中的吊舱姿态变化进行测量并校正处理。

2 实测数据的校正效果分析

为检验这 2 种数据校正处理后的实际效果,本文以实测的江淮地区某项目航电数据为基础,进行数据校正比较分析。该地区水系发育,浅表以第四系或新近系的洪坡积泥沙地层为主,地层的电阻率值一般为 $50\sim 100 \Omega \cdot m$,地势平坦,但人文建筑物较多,测量过程中存在随时因避让地物的起伏飞行,形成了干扰异常,需进行高度校正,高度校正变化系数为 $k=h/30$ (h 为吊舱离地高度)。需要指出的是,

吊舱高度变化与姿态变化不是孤立的,二者往往是同时发生的,因此需要对航空电磁测量数据同时进行 2 种校正。

目前我国引进的航空电磁测量系统只装备了高度测量设备,没有姿态测量设备,吊舱的离地飞行高度可以通过雷达高度计测量获得,航空电磁测量系统并不能直接测得姿态参数数据。为了对比分析校正处理对测量数据的改善效果,可考虑通过数学计算方式来获得吊舱姿态的近似参数值,模拟姿态校正效果。考虑到飞机以 90 km/h 的速度平飞,吊舱平台为相对水平静止状态,当发生飞行高度起伏时,由于吊舱上导流板的影响,吊舱的飞行姿态与其飞行起伏坡度相近,可以用飞行起伏的坡度近似替代吊舱的倾角 β ,忽略摆动角 α 的变化值,姿态校正公式变为

$$V(\alpha, \beta)/V(0, 0)=0.5(1+\cos^2\beta) \quad (5)$$

下面以 350 线和 1000 线 2 条实测曲线为例,对飞行高度起伏不大和起伏较大的 2 种情况进行分析,比较只开展高度校正的效果和 2 种数据校正都开展的效果。

2.1 350 线数据校正

350 线飞行时的吊舱平均飞行高度为 47 m,最低高度为 27 m,最大高度为 82 m。虽然地形平整,但由于地面障碍物的存在,直升机在飞行过程中吊舱出现明显的起伏变化,吊舱离地高度采用直升机底部的雷达高度计测量数据减 48 m(缆绳长 55 m,缆绳正常飞行时倾角约 20°)。

从吊舱离地高度剖面(图 5a)与断电时间垂直分量 $Z_{off} - \text{dB}/\text{dt}$ 电磁道堆积剖面(图 5b)对比可以看出,二者存在明显的镜像对应关系,有 3 处异常,基本可以判断为飞行起伏引起的电磁响应强度差异,形成了干扰异常,因此需要对测量数据进行高度校正。吊舱高度变化采用指数衰减规律公式、姿态变化采用倾角 β 变化公式进行校正处理。以离地高度 30 m 为基准进行高度校正,从校正结果(图 5c)可见,3 处异常均已不明显,低缓部位抬高,Z6 道 18000 点处值与平均值比由 689/490 变为 641/532,18500 点处值与平均值比由 241/490 变为 489/532。数据完成高度校正和姿态校正的结果(图 5d)显示,不同测线段的异常差进一步缩小,Z6 道 18000 点处值与平均值比变为 618/521,18500 点处值与平均值比变为 493/521(表 1)。从校正结果看,进行高度校正能消除掉该测线吊舱飞行参数变化引起的大部分影响,增加姿态校正后基本上消除了飞行参数变化

的影响,干扰异常基本消失。

2.2 1000 线数据校正

在 1000 线飞行时,吊舱平均飞行高度为 118 m,最低高度为 43 m,最大高度为 175 m。该测线地形与 350 线一样平坦,但地面障碍物更为高大,引起了更大的电磁响应强度差异。与 350 线一样,从吊舱离地高度剖面(图 6a)与断电时间垂直分量 Zoff-dB/dt 电磁道堆积剖面(图 6b)对比可以看出,两者之间也存在明显的镜像对应关系,在 41200 点附近存在 1 处强异常。以离地高度 30 m 为基准进行高度校正,校正结果(图 6c)中原有的异常基本消失,而在 41200 点左侧形成相对较高的场,Z6 道 40800 点处值与平均值比由 142/183 变为 889/753,41200 点处值与平均值比由 746/183 变为

887/753;在 42000 点附近各道数据值均很小,形成 1 处低谷,Z6 道 42000 点处值与平均值比由 0.9/183 变为 26/753。在数据完成高度校正和姿态校正的结果(图 6d)中,Z6 道 41200 点处值与平均值比变为 853/827,变化不明显;在 40800 点附近出现 1 处较弱异常,Z6 道 40800 点处值与平均值比变为 1196/827;42000 点附近的低谷处基本上校正到正常背景值,Z6 道 42000 点处值与平均值比为 746/827。从校正结果看,进行高度校正后该测线吊舱飞行参数变化引起的异常基本消失,但在 42000 点附近仍然存在剖面曲线的畸变,高度校正后 42000 点的值仍仅为背景值的 3.5%,增加姿态校正后 42000 点的值为平均值的 90.2%,该点附近的畸变基本上消除了。

表 1 垂直分量 Zoff-dB/dt 电磁道剖面第 6 道数据校正前后对比

Table 1 Comparison of data of channel 6 (at vertical component Zoff-dB/dt electromagnetic section) before and after the correction

线号-点位	未校正数据比	高度校正后数据比	高度及姿态校正后数据比	异常变化
350-18000	689/490	641/532	618/521	异常基本消失
350-18500	241/490	489/532	493/521	负值消失
1000-40800	142/183	889/753	1196/827	出现弱异常
1000-41200	746/183	887/753	853/827	强异常消失
1000-42000	0.9/183	26/753	746/827	负值消失

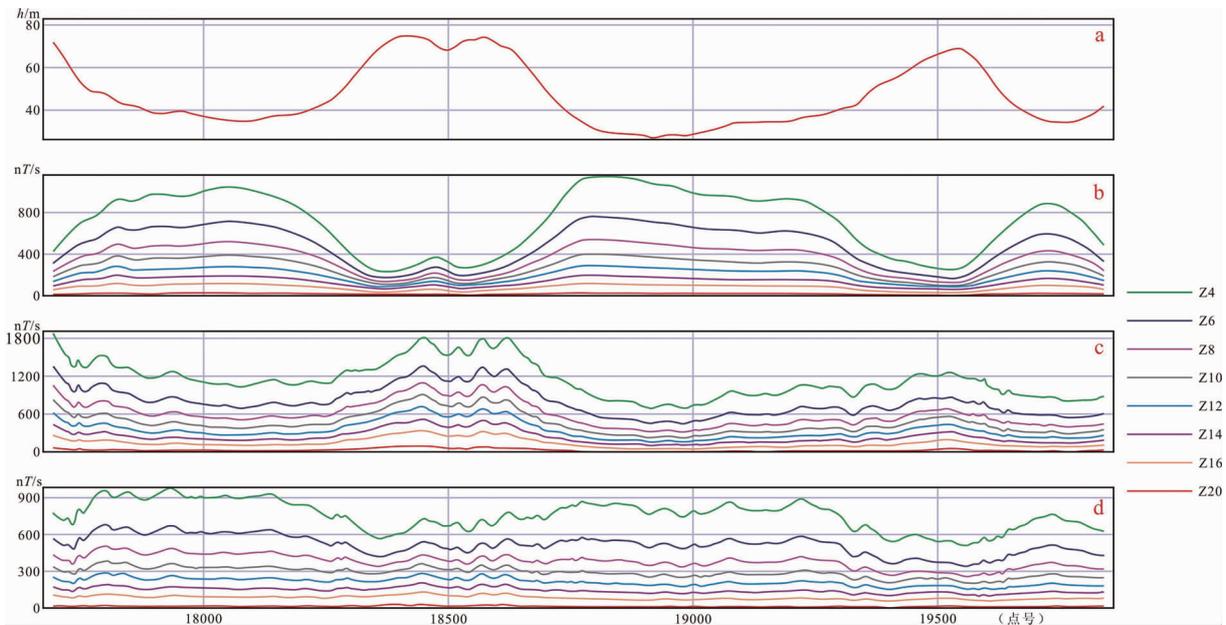


图 5 350 线断电时间垂直分量 Zoff-dB/dt 电磁道堆积剖面数据校正对比图

Fig. 5 Diagram showing correction of data of vertical component power-off time Zoff-dB/dt electromagnetic channel stacking profile along line 350

a. 吊舱离地高度剖面;b. 实测电磁道堆积剖面;
c. 高度校正后电磁道堆积剖面;d. 高度校正及姿态校正后电磁道堆积剖面

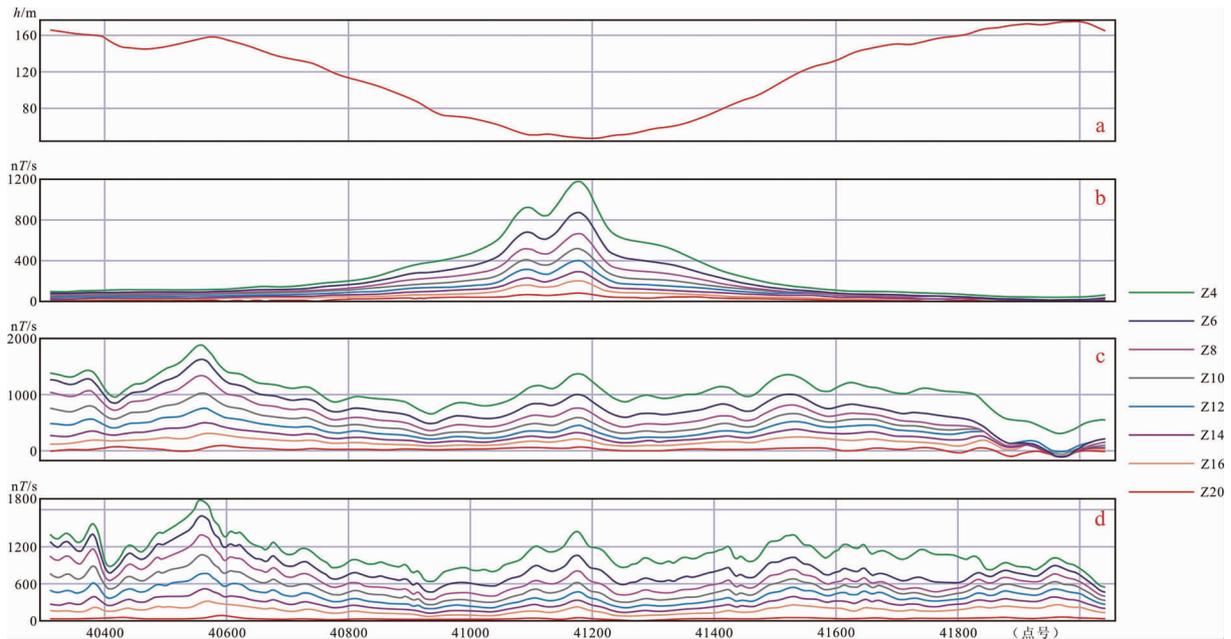


图 6 1000 线断电时间垂直分量 Zoff-dB/dt 电磁道堆积剖面数据校正对比图

Fig. 6 Diagram showing data correction of vertical component time-off Zoff-dB/dt electromagnetic channel stacking profile along line 1000

a. 吊舱离地高度剖面; b. 实测电磁道堆积剖面;
c. 高度校正后电磁道堆积剖面; d. 高度及姿态校正后电磁道堆积剖面

通过 350 线和 1000 线的断电时间垂直分量 Zoff-dB/dt 电磁道堆积剖面校正对比分析可知,在地表盖层电阻率低的地区因为飞行参数的变化可形成干扰异常,进行高度校正后能明显减小干扰异常强度。目前我国引进的航空电磁测量系统具备测量高度的设备,可以获得高度数据开展高度校正,然而仅仅进行高度校正并不能完全校正飞行测量过程中姿态参数变化对电磁响应的影响。从 1000 线电磁道堆积剖面图看,即使进行了高度校正,42000 点附近各道的值与背景值仍然只恢复到平均值的 3.5%,存在很大的偏差,但该处与周围的高度相差并不大,可见姿态对电磁响应产生了很大的影响。350 线在进行高度校正后,18500 点附近各道的值与背景值仍存在一些偏差,因此仅进行高度校正是不够的。通过高度校正及姿态校正,1000 线的值可以达到背景值的 90%,因此,进行上述 2 项校正后,可以使测量数据基本消除飞行参数变化的影响,校正前后效果对比见表 1。虽然缺乏吊舱姿态测量的数据,但通过飞行坡度计算的倾角数据可以比较准确地校正沿测线方向的姿态变化影响,因此开展测线数据的姿态测量及校正是非常有必要的。

3 结语

利用航空电磁测量系统开展地质找矿、工程地质测量、环境调查等工作,速度快、成本低、受地面工作条件影响小,适合开展面积性的电法勘查工作,因此进一步完善我国航空电磁法的勘探技术具有积极意义。但是我国航空物探队伍开展的生产测量工作还有限,实际运用中存在的问题仍需工程技术人员结合相关理论进一步改进测量系统,完善测量技术方法及手段。通过对江淮某地区实测航空电磁剖面数据的校正计算效果分析,对航空电磁测量数据处理有如下几点认识:

(1)在地表盖层电阻率较低地区,航空瞬变电磁测量吊舱的离地高度、姿态变化能引起明显的干扰航电异常,通过吊舱的离地高度剖面与实测断电时间垂直分量 Zoff-dB/dt 电磁道堆积剖面对比可以得到一些直观的判断,排除部分干扰异常。然而当这些吊舱参数变化较大时,简单直观的分析可能会错漏一部分有效地质体异常,需要对测量的原始数据进行校正处理,排除干扰异常。

(2)从傅里叶级数理论分析,三角波场源的航空

瞬变电磁测量系统高度衰减校正可以采用近似指数衰减规律来计算衰减系数。

(3)测线飞行过程中存在吊舱离地高度及姿态变化,而且这两种参数变化往往是同时发生的,仅仅开展高度测量及数据校正仍然存在不足,建议在开展航空瞬变电磁测量时,同时开展吊舱的姿态测量与数据校正处理。

参考文献:

- [1] 殷长春. 航空电磁理论与勘探技术[M]. 北京: 科技出版社, 2018.
- [2] 殷长春, 张博, 刘云鹤, 等. 航空电磁勘查技术发展现状及展望[J]. 地球物理学报, 2015, 58(8):2637-2653.
- [3] 贺颖, 孟庆敏, 满延龙, 等. 航空物探(电、磁)综合测量与胶东金矿普查[J]. 物探与化探, 2005, 29(5):397-400.
- [4] 李怀渊, 张景训, 江民忠, 等. 航空瞬变电磁法系统 VTEM-plus 的应用效果[J]. 物探与化探, 2016, 40(2): 360-364.
- [5] 闵刚, 王绪本, 毛立峰, 等. 磁偶极子源航空瞬变电磁对飞行高度的响特征[J]. 物探与化探, 2012, 36(4): 591-594.
- [6] 王卫平, 王守坦. 直升机频率域航空电磁系统在均匀半空间上方的电磁响应特征与探测深度[J]. 地球学报, 2003, 24(3):285-288.
- [7] 罗延钟, 张胜业, 王卫平. 时间域航空电磁法一维正演研究[J]. 地球物理学报, 2003, 46(5): 719-724.
- [8] 傅良魁. 应用地球物理教程[M]. 北京: 地质出版社, 1991.
- [9] 李金铭. 地电场与电法勘探[M]. 北京: 地质出版社, 2005.

Analysis of correction of the measured HTEM TS150 data

TIAN Dazhi, YANG Liu, GUO Zhe, YANG Wang, LIN Manman, LIU Jianxia

(Geophysical Exploration Academy of China Metallurgical Geology Bureau, Baoding 071051, Hebei, China)

Abstract: During air electric and magnetic survey height between the pod and the ground is often changed due to variation of the ground obstacles, the pod altitude resulted from the air flow and the accompanying pod attitude. The variation leads to false avionic anomaly and the measured data must be corrected. This paper analyzes influence of variation of altitude and attitude of the pot on electric and magnetic response based on the theoretic model. Together with the correction result of two survey lines we prove effectiveness and necessities of both correction of the altitude and attitude. However the HTEM measurement system in China is not equipped with attitude system thus is put forward a suggestion that the attitude correction should be installed in the HTEM system available in China.

Key Words: HTEM measurement; attitude correction; height correction; exponential decay