

通过人工磁异常环对航空磁测系统的标定

范振峰 黄玲 刘敦歌 许鑫 张晓娟 方广有

(中国科学院电子学研究所电磁辐射与探测技术重点实验室 北京 100190)

摘要: 航空磁测系统具有广泛的用途,但是得到的数据通常包含多种来源的噪声,降低了系统对磁目标的探测能力。实验搭建了一个人工的大面积磁异常环电流线圈,并使用直升机机载光泵磁力仪对线圈在不同高度产生的磁场信号进行测量。通过对得到的信号进行去噪处理,能够标定航磁系统,进而用于航磁测量或者磁目标探测。实验和数据处理结果表明,这套系统能够在较远的距离探测到 nT 级的磁异常目标。

关键词: 磁异常; 航磁测量; 磁力仪; 信号去噪

中图分类号: TN911.7 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.10

Using a current-loop induced magnetic anomaly to calibrate an airborne magnetometry system

Fan Zhenfeng Huang Ling Liu Dunge Xu Xin Zhang Xiaojuan Fang Guangyou

(Key Laboratory of Electromagnetic Radiation and Sensing Technology, Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: Airborne magnetometry has a long and fruitful history in many applications. The acquired data are usually contaminated by noises originated from a variety of sources, which migrates the effectiveness of the system on detecting magnetic targets. In this paper, a large loop with DC current is designed, serving as a man-made magnetic target. Then, an experiment for helicopter-borne magnetometry is performed to measure the induced magnetic field at different elevations. The acquired data after denoising can be used to calibrate the airborne magnetometry system which will be further applied to aeromagnetic measurement or magnetic targets detection. The data processed result shows a good performance for the system because it is capable of detecting a magnetic target of a few nT at a long distance.

Keywords: magnetic anomaly; aeromagnetic measurement; magnetometer; signal denoising

1 引言

航空磁测具有广泛的用途,它常用于探测磁异常目标。它还是地球物理学科里通常与重力测量结合在一起的一种资源勘探方法^[1]。与地面磁测相比,航空磁测具有以下优点:1)不受水域、森林、沙漠和高山等复杂地形和环境的限制;2)飞行速度保证了测量的效率,并且能减少地磁场随时间变化的效应;3)飞行是在距地表一定的高度进行的,减弱了地表磁性不均匀体和相对较大的地表噪声的影响,从而能够更加清楚地反映出深部地质体的磁场特征。

航磁测量作为磁法勘探这一大类传统的勘查地球物理方法的一部分,在地质测绘、金属矿产勘探和油气田勘查等领域中,获得了日新月异的发展,并得到越来越多的应用。近年来,应用已经推广到未爆弹药侦查^[2-3]和环境监测^[4]。

航空磁测所得的数据通常包含较大的噪声,降低了整套系统对磁异常目标的探测能力。为了得到系统的性能指标,进而用于大面积探测实验之前,需要对一套系统进行标定。本文通过设计一个大面积的人工异常环电流线圈,对产生的磁场用直升机机载磁力仪进行测量,再对所得数据进行后续的信号处理,获得了较为明显的磁异常目标。通过分析,异常环产生的静态场信号幅值在目标周围主要以距离的三次方衰减。由于本次实验使用的核心部件是从加拿大引进的“pT”级光泵磁力仪,对测量的精度要求很高,因而磁场的噪声也相对较大,对所得数据通过简单的滤波不能满足消除磁场噪声的要求,因而要充分地去利用所得信号和噪声的特性。在磁目标探测以及其它领域的信号处理,涌现了多种不同的方法^[5-15]。本文在处理的一个步骤中使用互补的总体平均经验模态分解方法(CEEMD)来消

除高频噪声,得到了信号的有效值。结果表明,这套系统对于目标有着较强的探测能力,能够探测到大约 1 000 m 左右的“nT”级的磁异常目标。如果将其用于航磁测量,所得的数据会有足够理想的精度。

2 数据获取系统和实验过程

实验所采用的是吊舱式的直升机机载的航空磁测方法,其中光泵磁力仪安装在吊舱中,如图 1 所示。



图 1 直升机机载航磁测量系统

除磁力仪外,吊舱中还有其他一些辅助部件,如 GPS 模块(用于定位),雷达高度计(用于辅助定位),陀螺仪(用于稳定吊舱姿态)和数据采集模块等。数据的采集与飞行过程同步,操作员在直升飞机里监控着所采集数据的质量。

实验地址选在湖南省郴州市北湖区同和乡附近,如图 2 所示。

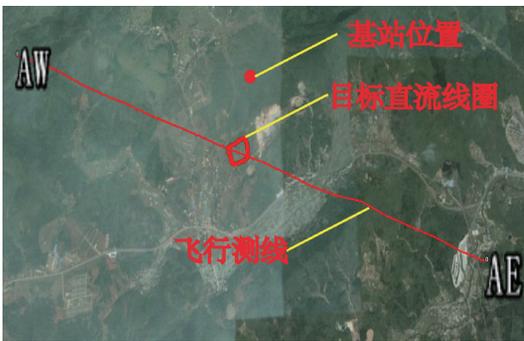


图 2 实验地理位置

地面上人工搭建了一个 200 m×200 m 的异常环线圈,其中心坐标为北纬 25°47′5.20″,东经 112°55′58.40″。通以直流电,电流大小定为 15 A。若忽略地形的影响,该线圈可视为矩形形状,在较远距离可等效为一个磁矩为 $6 \times 10^6 \text{ A} \cdot \text{m}$ 的磁偶极子。实验过程中,通过直流电源的控制开关来控制目标的存在和消失,在图 2 所示的飞行路径上来测量开关两种状态下的实验地点上空的磁场大小。

整个实验规划如下,令 AE 和 AW 点作为本次高空飞行实验的起点和终点,飞机分别在不同高度往返飞行两次,每次往返中,地面的大电流异常环线圈人为控制分别

为开关两种状态,同时航磁测量系统记录飞行过程中磁场值相对于传感器空间位置的变化关系。实验测量了不同高度下 3 组数据(分别离地面 300、500、700 m),如表 1 所示。

表 1 实验飞行规划

离地面高度	序号	航线方向	开关状态
300 m	1	AE→AW	开
	2	AW→AE	关
	3	AE→AW	开
	4	AW→AE	关
500 m	5	AE→AW	开
	6	AW→AE	关
	7	AE→AW	开
	8	AW→AE	关
700 m	9	AW→AE	开
	10	AE→AW	关
	11	AW→AE	开
	12	AE→AW	关

此外,还在异常环附近用搭建了磁场基站,位置如图 2 所示。基站的作用在地球物理航磁勘探中通常用于消除日变干扰,在本次试验中有着类似的意义,用于消除地磁背景场随时间变化的干扰。

3 噪声分析和异常环仿真结果

通过对所得数据进行比较分析,并结合已有地球物理航磁勘探的相关知识^[16],一般来说,获得的原始数据主要存在以下干扰:1)地磁场的日变;2)不同地点 IGRF(国际标准地磁参考背景场)不同;3)磁场传感器伴随着飞机的偏航和吊舱的摆动引起的数据精度降低;4)随机噪声,天线干扰和人文干扰;5)直升机上的部件工作时产生的磁场干扰。

这些干扰有确定性的,也有随机性的。通常可以通过 IGRF 校正和基站补偿可以消除大部分来源 1)和 2)的噪声。而由于此实验采用吊舱配置,磁场传感器在飞行过程中离直升机距离超过 15 m(此实验吊舱缆绳长约 30 m),在很大程度上抑制了来源 5)的干扰。于是,通过对同组(同一测量高度)数据的开关不同状态的数据部分对应相减,预期能得到可观的磁目标异常。

磁异常的理论计算公式为:

$$B(\mathbf{r}) = \frac{\mu_0}{4\pi} \oint_C \frac{I d\mathbf{l}' \times (\mathbf{r} - \mathbf{r}')}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|^3} \quad (1)$$

式中: μ_0 为真空磁导率, C 表示电流环线圈, \mathbf{r} 和 \mathbf{r}' 分别表

示磁场传感器位置和线圈微元的位置。通过按照图 3 的示意图进行仿真,得到了不同高度(300、500 和 700 m)的 3 组数据,如图 4 所示。仿真结果表明,在离异常电流环较远的距离,基本可以将这个大线圈等效为磁偶极子。

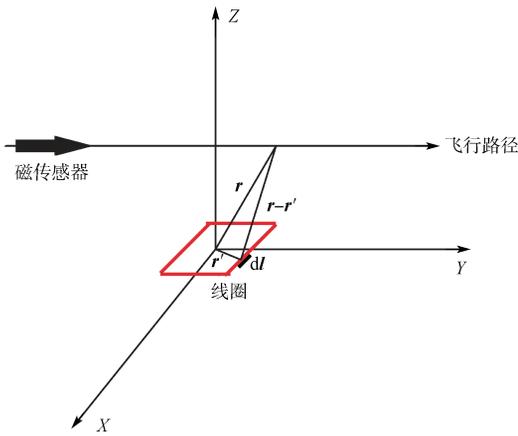


图 3 飞行路径和磁场线圈的示意图

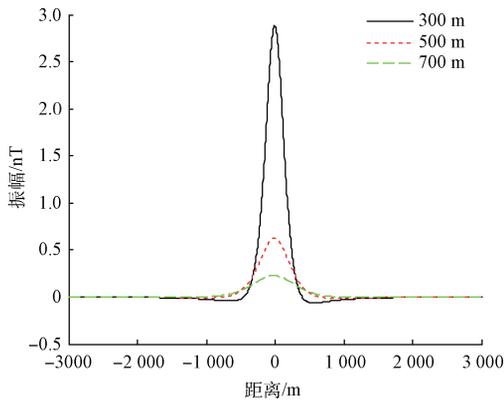


图 4 异常环电流线圈上空磁场仿真结果

4 数据数据分析和处理

将实验中位于同一高度的不同开关状态下的数据对应相减,并在同一组数据的两次往返数据取平均,如果忽略噪声的影响,得到的结果将与仿真结果相似。然而,这样得到的结果如图 5 所示,含有大量的噪声,只有在 300 m 的高度下才可以看到明显的磁异常目标,在更高的高度 500 和 700 m,目标被大量的噪声所淹没。

数据处理步骤如下。

1) 基站校正: 减去基站记录的当地地磁场随时间的波动值。

2) IGRF 校正: 减去由 IGRF 模型计算出的地磁场随空间坐标的变化值。

3) 将同一高度的不同开关状态的数据进行对应相减,得到同一高度的两组数据。

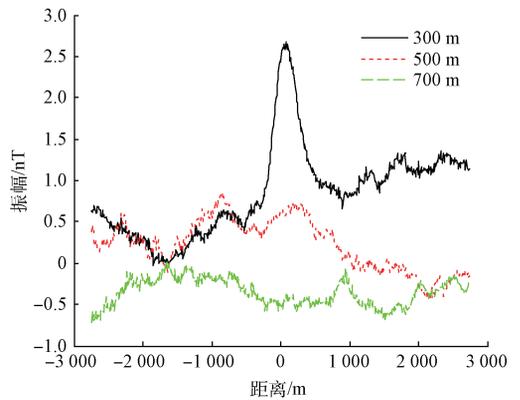


图 5 直接将数据相减平均得到的实验结果

4) 对于这两组数据,采用一个绝对值最小算法代替统计平均。即在每个数据点取两组数据的绝对值较小的一组。

5) 使用 CEEMD 提取信号的主要成分。

步骤 4) 可以看成一种非线性滤波,通过对信号观察认为校正后的残余噪声主要属于高频成分,最小绝对值比统计平均能更大程度地压低噪声。而对于图 4 所示的异常环信号,这种算法不会减弱过多有用的信号成分。

步骤 5) 采用的 CEEMD 算法是经验模态分解(EMD)算法的几年来的发展^[17-19],克服了原始 EMD 算法的模式混叠和信号重建的缺陷。本文将其当做一种低通滤波器使用,由于它是数据驱动的算法,可克服传统滤波器的非线性相位和窗函数等一些困难,其自适应的特性使得能够提取出信号的有用成分^[20]。

数据处理的结果如图 6~8 所示。虚线为经过步骤 4) 的结果,点画线为最终处理结果,实线为图 4 的用于对比的仿真结果。通过与仿真结果对比可以看到,该处理方法很大程度上提高了信噪比,能够较清楚地看到异常环的磁信号。这套系统对磁异常目标的探测能力由此得到证实,按照距离的负 3 次方推算,大概在 1 000 m 的探测距离上依旧能够探测到 nT 级别的磁异常目标,因而可应用于高精度的航磁勘探。

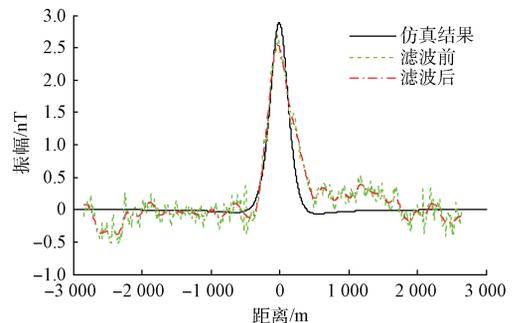


图 6 300 m 高度的数据处理结果

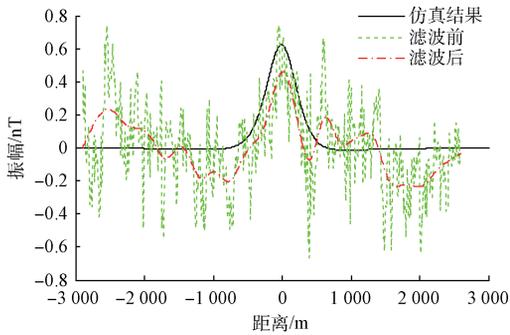


图7 500 m高度的数据处理结果

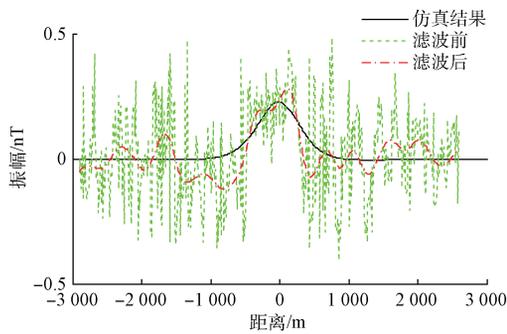


图8 700 m高度的数据处理结果

5 结 论

本文设计了一个不同高度下磁场传感器对磁异常目标的探测实验,用于对系统进行标定。通过对人工目标磁异常产生的磁场数据进行采集,并加以后续信号处理,得到了比较清晰的不同高度下的磁异常目标信号。标定结果表明,这套以“pT”级光泵磁力仪为核心的直升机机载航磁系统有着很好的目标探测能力,可用于后续较高精度的航磁测量实验。

参考文献

- [1] TELFORD W M, SHERIFF R E. Applied Geophysics [M]. 2nd Ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1990.
- [2] NELSON H H, MCDONALD J R. Multisensor towed array detection system for UXO detection[J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2001, 39(6):1139-1145.
- [3] LI Y, DEVRIESE S G R, KRAHENBUHL R A, et al. Enhancement of magnetic data by stable downward continuation for UXO application [J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2013, 51(6):3605-3614.
- [4] SHARMA P V. Environmental and Engineering Geophysics [D]. Cambridge: Cambridge University

Press, 1997.

- [5] 黄朝,许鑫,刘敦歌,等. 基于多传感器的微弱磁异常信号提取方法研究[J]. 电子测量技术, 2015, 38(10):91-95.
- [6] 姜洲,丁华平,沈庆宏. 具有瞬时较大波动的信号降噪方法研究[J]. 电子测量技术, 2015, 38(3):116-119.
- [7] 张爱民. 一种基于小波变换的夜视图像去噪和融合方法[J]. 电子测量技术, 2015, 38(1):38-40.
- [8] 俞一鸣. 自适应滤波器介绍与应用[J]. 国外电子测量技术, 2015, 34(8):11-13.
- [9] 颜思淼,万晓东. 浅谈数据采集系统的同步[J]. 国外电子测量技术, 2014, 33(8):5-6.
- [10] 张昌凡,彭钊,李祥飞,等. 基于自适应观测器的鲁棒失磁故障检测方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(4):508-518.
- [11] 李奇越,吴忠,黎洁,等. 基于改进卡尔曼滤波的NLOS误差消除算法[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(10):1513-1519.
- [13] 王新,王乾. 改进的 Hilbert-Huang 变换方法及其应用[J]. 电子测量与仪器学报, 2014, 28(12):1369-1375.
- [14] 戴猛,陈叶明. 一种频域相位差分测频算法[J]. 电子测量技术, 2015, 38(1):25-28.
- [15] 余彦霖,祖家奎,廖智麟. 基于卡尔曼滤波的 MUH 姿态信号融合算法研究[J]. 电子测量技术, 2015, 38(5):106-110.
- [16] LUYENDYK A P J. Processing of airborne magnetic data [J]. Journal of Australian Geology and Geophysics, 1997, 17(2):31-38.
- [17] WU Z H, HUANG N E. Ensemble empirical mode decomposition: A noise-assisted data analysis method[J]. Advances in Adaptive Data Analysis, 2009, 1(1):1-41.
- [18] HUANG N E, SHEN Z, LONG S R, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis[J]. Proceedings of the Royal Society of London Series A, 1998, 454(1971):903-995.
- [19] YE H J R, SHIEH J S, HUANG N E. Complementary empirical mode decomposition: A novel noise enhanced data analysis method [J]. Advances in Adaptive Data Analysis, 2010, 2(2):135-156.
- [20] BOUDRAA A O, CEXUS J C. EMD-Based signal filtering [J]. IEEE Transactions on Instrument Measurement, 2007, 56(6):2196-2202.

(下转第76页)