

doi: 10.11720/wtyht.2020.0196

王永兵,尹文斌,张磊.航空广域电磁法初步探索[J].物探与化探,2020,44(5):1059-1065.http://doi.org/10.11720/wtyht.2020.0196

Wang Y B, Yin W B, Zhang L. A preliminary exploration of the wide field electromagnetic method in aerogeophysical prospecting[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2020, 44(5): 1059-1065. http://doi.org/10.11720/wtyht.2020.0196

航空广域电磁法初步探索

王永兵,尹文斌,张磊

(湖南继善高科技,湖南长沙 410083)

摘要: 文章基于广域电磁法(WFEM)的基本理论,结合当前资源勘查所面临的问题及航空物探的发展现状,主要从基本理论、装备研究、应用测试 3 个主要方面对航空广域电磁法进行了初步探索。通过探索我们认识到,航空广域电磁数据采集质量易受飞机飞行姿态及飞机本体噪声的影响,但是大于 100 Hz 的高频段具有更好的数据质量和实际工程应用的可行性。

关键词: 广域电磁法;航空物探;探索

中图分类号: P631

文献标识码: A

文章编号: 1000-8918(2020)05-1059-07

0 引言

航空地球物理勘探简称航空物探,是物探方法的一种,它是通过飞机上装备的专用物探仪器在航行过程中探测各种地球物理场的变化,研究和寻找地下地质构造和矿产的一种物探方法。

航空地球物理勘探目前已经应用的航空物探方法有,航空磁测、航空放射性测量、航空电磁测量(航空电法)等。航空物探具有速度快,不受地面条件(如海、河、湖,沙漠)的限制,大面积工作精确度比较均一,可在一些地形条件比较困难的地区工作等优点。特别是自动控制 and 电子计算技术的发展,使航空物探综合化,从而提高了航空物探观测数据的计算和整理的速度及解释推断的水平,有力地促进了航空物探的发展^[1]。

广域电磁法(wide field electromagnetic method)^[2],是一种人工源频率域电磁测深方法,是在包括远区,也包括非远区的广大区域进行电磁测深的一种新的电法勘探方法。将该方法与航空物探技术有机的结合,充分发挥二者的优点,为当前物探技术的发展提供了一种新的方法和思路。

1 航空广域电磁法

1.1 航空物探的发展

航空物探的发展^[3-7]开始于 20 世纪 30 年代。1936 年,苏联用旋转线圈感应式航磁仪进行航空物探,灵敏度约达 100 nT。第二次世界大战中,美国发明了灵敏度近 1 nT 的磁通门式航空磁力仪,在海上侦察敌国的潜艇,1946 年开始用于地质勘探。1948 年,加拿大首先试验航空放射性法成功,美国和英国同年也完成了类似的试验。1950 年,第一台航空电磁仪在加拿大试用成功。1955 年,瑞典和美国相继试验成功新类型的航空电磁仪,各种航空物探方法相继迅速发展。

中国航空物探开始于 1953 年,首先应用航空磁法,以后陆续增加了航空大地电磁、航空放射性、时间域航空电磁等方法,不断有新的进展。

由于 MT 法接地电极的埋设在野外工作中占很大的工作量,常遇到困难,地球物理工作者一直在探索非接触测量,为此大家开始研究航空大地电磁 AEMT。美国 GroundMetrics 公司、QUASAR 公司研究研制的 eQube 电容性电场传感器是电荷感应方式

收稿日期: 2020-04-22; 修回日期: 2020-07-31

基金项目: 国家自然科学基金项目(41227803)

作者简介: 王永兵(1983-),男,2011年毕业于济南大学,硕士,高级工程师,从事地球物理勘探理论、方法技术研究,物探设备的研究、研发工作。Email: netwyb@yeah.net

测量电场。国内杨云见等、董爱国等、王志宇等^[8-9]均从不同方向研究了 AEMT 应用的重要组成器件——电容传感器,并取得了一定成果。

多辐射场源 TEM 在国内发展较早,近些年,随着国家对航空物探的重视,航空电磁法的理论研究和仪器开发研制等多个项目已经被列入国家重大科研项目。2003 年罗延钟等^[10]研究了时间域航空电磁法的一维正演算法,探讨了电磁响应衰变特性,吊舱高度,大地导电性和收发距对响应的影响,为我国 ATEM 的理论研究迈出了重要一步。

总体来说,我国航空物探的理论方法研究和装备研制跟国际上的先进水平还有一定的差距,我们应该先学习国外的先进技术方法,然后消化吸收,再根究实际应用加以完善和改进。

1.2 航空广域电磁法理论

航空广域电磁法是利用广域电磁法的基本理论,通过地面发射 a^n 伪随机信号序^[11],飞行器搭载

接收机接收磁场信号的一种新的物探方法。

航空广域电磁法勘探同地面广域电磁法一样,用电性源作发送场源的航空广域电磁法,可以采取 $E-H_x$ (测量水平电流源产生的磁场水平分量 x), $E-H_y$ (测量水平电流源产生的磁场水平分量 y), $E-H_z$ (测量水平电流源产生的磁场垂直分量 z) 等几种形式。前期我们只研究水平电流源产生的磁场垂直分量 $E-H_z$ 。

水平电流源产生的磁场垂直分量 $E-H_z$:

$$E - H_z = \frac{3IdL}{2\pi k^2 r^4} \sin \varphi \left[1 - e^{-ikr} \left(1 + ikr - \frac{1}{3}k^2 r^2 \right) \right], \quad (1)$$

通过测量 H_z , 计算机迭代方式提取视电阻率:

$$\rho_a = K_{E-H_z} \frac{|H_z| \omega \mu}{I |F_{E-H_z(ikr)}|}, \quad (2)$$

其 $E-H_z$ 方向的观测装置如图 1 所示。

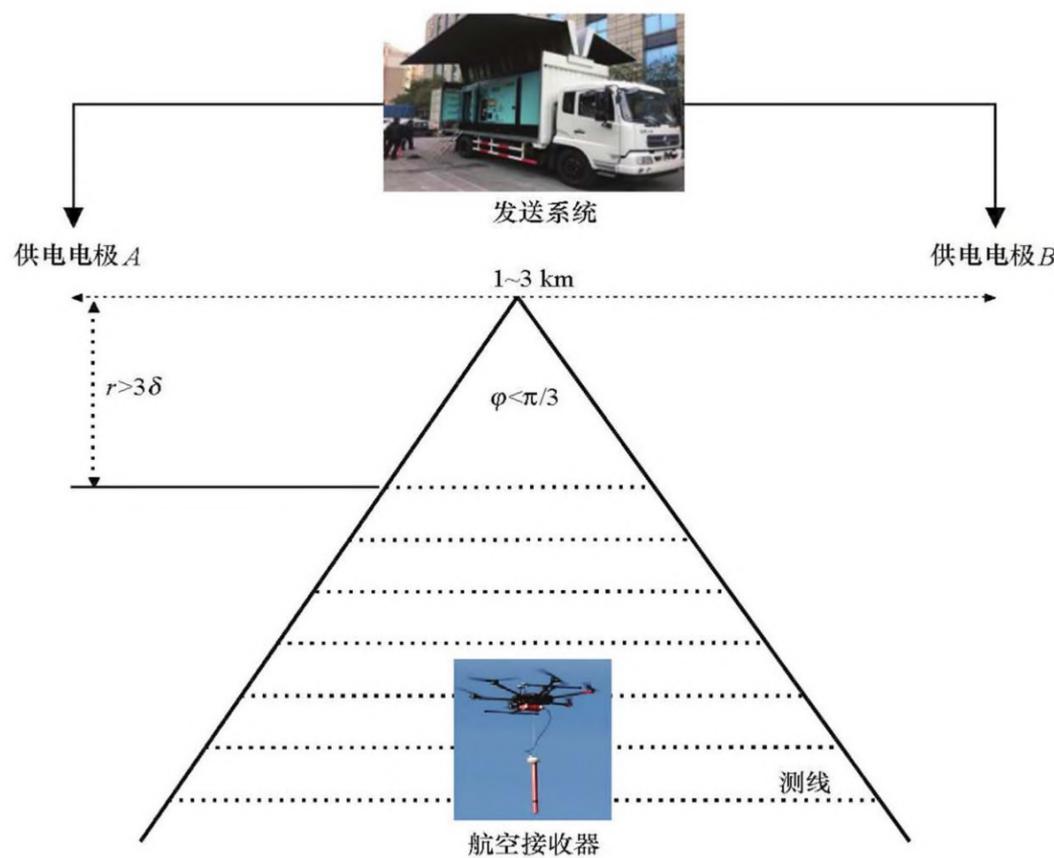


图 1 航空广域电磁法勘探示意

Fig.1 Schematic diagram of AWFEM

航空广域电磁法可以采用多台飞行器搭载多台接收机同时测量,形成三维阵列式观测。测量 $E-H_z$, 利用计算机迭代求解的方式提取视电阻率的难度在于 $E-H_z$ 与收发距的 4 次方呈反比,信号特别微弱。好处是测量方案简单,得到的信号不受接地条件影响,利用悬吊于空中的线圈或磁棒就可以测量 $E-H_z$ 。

广域电磁法测量 H_z 的方案与 CSAMT 相比的另

一个优点是,CSAMT 要通过测量一对正交的电、磁分量相比来消去场源和装置参数,而广域电磁法不需要^[12]。

2 航空广域电磁法应用

2.1 应用装备研究

任何一种电法勘探方法,不论是采用天然场源

还是人工场源,也不论是频率域方法还是时间域方法,都不外乎是测量来自地下的电(磁)响应,提取关于地下电性分布的信息,借以达到查明该处地质构造和矿产分布的目的。

航空广域电磁法是一种频率域航空电磁法勘探方法^[13]。主要从发射系统、接收器、传感器、飞机四个方面去考虑。

在发射端,常规的金属矿、天然气、页岩气、干热岩等资源的勘查,为了提高数据的稳定性和野外施工的工作效率,通常采用大功率电流源。发射信号要想通过大地传播得很深、很远,需要相当大的功率,而电流源相对于垂直磁场源具有更好的功率利用率,也就是具有更好的发射效率。因此,将广域电磁法应用于航空物探,信号发射端以大功率电流源为宜。

图 2 是集发电系统、AC-DC 电源系统、 a^n 伪随机信号^[11,14] 逆变系统、保护系统、控制系统为一体的 180 kW 大功率广域发射系统。该系统能够在 0~1 000 V 之间实现无极调压、稳压,在 0~180 A 之间实现稳流,完全满足广域电磁法在航空物探应用上的信号发射需求。



图 2 180 kW 广域发射系

Fig.2 WFEM transmission system of 180 kW

图 3 是基于该设计思想设计的单分量伪随机信号航空广域接收器^[15]。该接收器主要实现 H_z 方向电磁信号的调理、采集,伪随机信号频率分量的提取,基于移动网络的数据通信及控制等功能。

在接收端,基于现在无人机的快速发展,接收器一般采用无人机作为载体。受制于无人机载重、续航、噪声等因素的限制,我们在设计接收器时必须在满足接收器性能参数的情况下,尽可能的轻量化。

航空广域电磁系统发射、接收基于 $2^n + 1.5 \times 2^n$ 混合编码的 19 频波伪随机信号序列^[11,14],频率范围为 8 192~16 Hz。



图 3 单分量广域接收器

Fig.3 Single component receiver based on aviation-WFEM

目前比较常用的航空广域最主要的载体飞行器是小型无人机。图 4 所示的是大疆公司的经纬 M600Pro 系列无人机。M600Pro 系列无人机具有高负载和优秀的飞行性能,采用模块化设计,可靠性高,使用便捷。M600Pro 载重高达 6.0 kg,最大起飞全重 15.5 kg,最大水平飞行速度 65 km/h,可以无负载飞行 32 min,挂载 6 kg 飞行 16 min,满足航空物探的需求。



图 4 大疆经纬 M600Pro 无人机

Fig.4 DJI M600Pro drone

地面广域电磁勘探常用的信号传感器为铜棒、铜板、磁棒等。而在航空广域的应用上,由于飞机在空中飞行,只能采用磁接收的方式来感应由发射所产生的磁场变化信号,比较常用的磁传感器为线圈、磁棒、磁通门等。图 5 分别是磁棒、线圈、磁通门产品示例。



图 5 磁棒、线圈、磁通门产品示例

Fig.5 The product example of magnetic rod, coil and fluxgate

线圈、磁棒、磁通门这 3 种磁传感器的主要特点为:

1) 线圈在一定的截面积和体积、质量的情况下,能够实现较大的磁通量,获得较强的信号大小,有利于提高数据测量质量,且由于线圈一般均为圆形,直径较大,频率响应范围较宽,一般在 1 Hz~100 kHz 范围。但是,正是由于线圈的直径较大、重量较大(一般在 2~5 kg),在应用到航空广域上时,与飞机的接驳、固定以及 X、Y、Z 三分量上倾角的修正是个难点。

2) 磁棒由于是棒状的,在与飞机的接驳、固定上,无论是软连接还是硬连接均较线圈有优势,且在频率响应范围上较宽,一般在 1 Hz~100 kHz 范围。但是,与线圈一样,应用到航空广域上,在进行 X、Y、Z 三分量倾角修正时,磁棒的重量(一般在 2~5 kg)也不能忽视。

3) 磁通门体积较小,质量轻(一般在 200~500 g),在用小型无人机挂载时有较大的优势。磁通门较大的缺点是频率响应范围偏低,一般在 0~1 000 Hz 范围,无法适用于大多数的工程施工应用,同时,也不利于航空物探连续飞行测量的需求;而且,磁通门感应的磁场信号包含了地磁信号,会给后期的数据处理带来较大误差。

2.2 工程应用初步探索

具备了理论方法、仪器装备,航空广域电磁法在地质勘探领域发展的另一个重要难题是实际工程应用,只有满足了实际的工程应用需求,解决了工程应用的实际问题,航空广域电磁法才具备广阔的市场前景。

工程应用首先要解决的问题就是接收器与飞机、传感器与飞机的接驳、固定问题^[16]。图 6、图 7、图 8 分别展示了接收器与飞机、线圈与飞机、磁棒与飞机的接驳实验。



图 6 接收器、线圈与飞机的接驳

Fig.6 Connection of receiver, coil and drone



图 7 接收器、磁棒与飞机的接驳(软连接)

Fig.7 Connection of receiver, magnetic rod and drone (soft connection)



图 8 接收器、磁棒与飞机的接驳(硬连接)

Fig.8 Connection of receiver, magnetic rod and drone (hard connection)

图 9、图 10 分别是飞机悬停情况下,磁棒与飞机软连接和硬连接 3 个主频分量的信号曲线对比。

对于磁传感器与飞机的连接方式,通过图 9、图 10 发现:无论是软连接还是硬连接,飞机本身飞行的稳定性、飞行的速度以及环境风速等的影响均会造成数据不同程度的跳动^[13-14]。但是,在高频段数据跳动的规律保持一致,从而间接验证了这种规律的正确性。在下一步的研究中,需要通过同步采集传感器随飞机飞行的姿态及轨迹参数,对这种跳动进行时域或频域补偿。

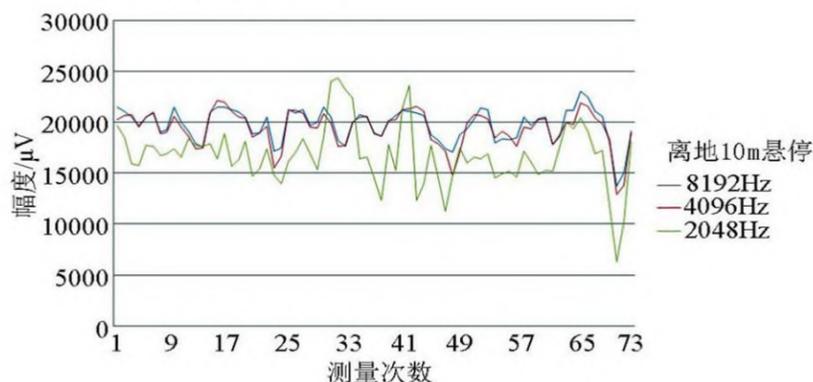


图 9 磁棒与飞机硬连接 3 个主频分量的信号曲线对比

Fig.9 Comparison of the signal curve of the three main frequency components of the hard connection between the magnetic rod and the drone

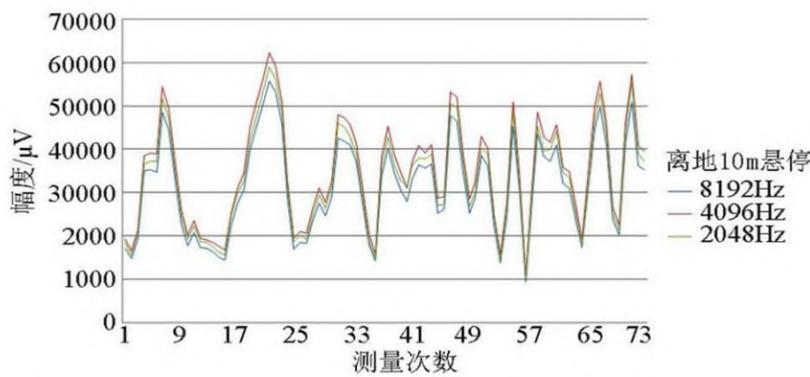


图 10 磁棒与飞机软连接 3 个主频分量的信号曲线对比
 Fig.10 Comparison of the signal curve of the three main frequency components of the soft connection between the magnetic rod and the drone

图 11、图 12 分别是环境背景场噪声测试,磁棒离飞机不同距离各个主频分量的信号曲线对比。

图 11 表明了,在飞行测试过程中,飞机及环境噪声干扰相对较大,且频率的越低干扰越大。这种干扰主要来源于飞机旋翼电机磁场及飞机本身电子电路辐射噪声,以及飞机姿态变化产生的数据跳动。图 12 则表明,磁棒与飞机的相对距离以大约 100 Hz 为分界,在大于 100 Hz 的高频段,所测得的曲线基本吻合,在小于 100 Hz 的低频段,吻合度较差。因此,在现阶段,大于 100Hz 的高频段是需要重点研究的频率范围。

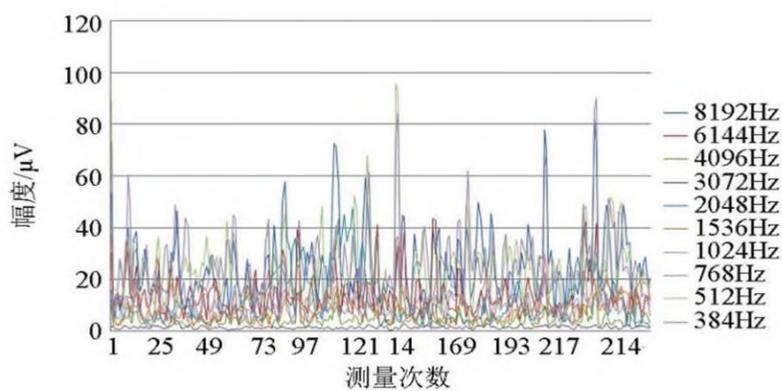


图 11 环境背景场噪声

Fig.11 Environmental background field noise

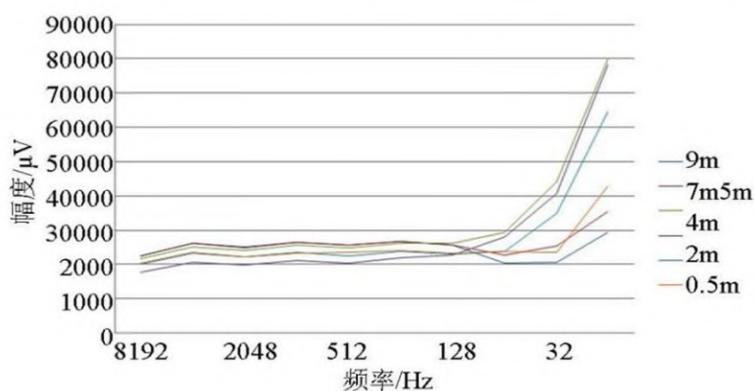


图 12 磁棒离飞机不同距离各个主频分量的信号曲线对比
 Fig.12 Comparison of signal curves of various main frequency components of magnetic rods at different distances from the drone

表 1 是在另一组测试条件下,飞机相对磁棒不同距离情况下测得数据的相对偏差。

表 1 飞机相对磁棒不同距离情况下测得数据的相对偏差
 Table 1 The relative deviation of the measured data of the aircraft relative to the magnetic rod at different distances

频率/Hz	不同距离下相对偏差/%			
	4m	6m	8m	10m
8192	-3.44	0.21	0.19	0.13
4096	-2.95	0.43	0.39	0.33
2048	-2.57	0.78	0.73	0.67
1024	-2.04	1.26	1.23	1.17
512	-1.91	1.75	1.67	1.60
256	-1.53	1.93	1.88	1.82
128	-1.27	1.56	1.69	1.71
64	-7.88	2.17	2.14	2.23
32	-12.8	1.96	1.99	2.10
16	-8.91	2.02	2.19	2.22

从表 1 可以看到,磁棒离飞机距离越大,数据的相对偏差越小。

图 13 是飞机离地不同高度各个主频分量的信号曲线对比。通过曲线我们看到,在高频段,飞机离地不同高度的信号曲线基本平行,且随高度增加,信号呈衰减趋势。分析原因,主要可能是飞机旋翼电机磁场及飞机本身电子电路辐射噪声造成了磁棒距离飞机太近数据质量变差,以及地面的电磁辐射导致了飞机离地高度太低数据不稳定;同时,飞机飞行姿态的变化以及传感器的晃动均属于低频扰动,导致了低频段(100 Hz 以下)数据明显差于高频段数据,这一实验结果与实际环境条件相吻合。

实际工程应用中,飞机一般的飞行高度为 50~100 m,磁传感器距离飞机本体距离可以适当加大,从而可以有效减少或规避这些问题。

通过实验测试、分析,得出以下结论:

- 1) 磁传感器软、硬连接都受到飞机调整、振动和空气气流扰动的影响。
- 2) 硬连接后对飞机的姿态稳定性影响较大。
- 3) 软连接时,如果环境风速较大,磁棒晃动幅度较大,对高频也产生较大干扰。
- 4) 线圈、磁棒、磁通门在实际测试中各有特点,要根据实际的工程需求和各自特点合理的选择信号传感器。
- 5) 不同的飞行高度对信号接收的大小、稳定度有较大影响,需要通过同步记录飞机飞行姿态参数进行数据校正。
- 6) 磁通门的全频段以及线圈、磁棒的低频段受飞机的姿态变化扰动、空气气流扰动等因素影响比

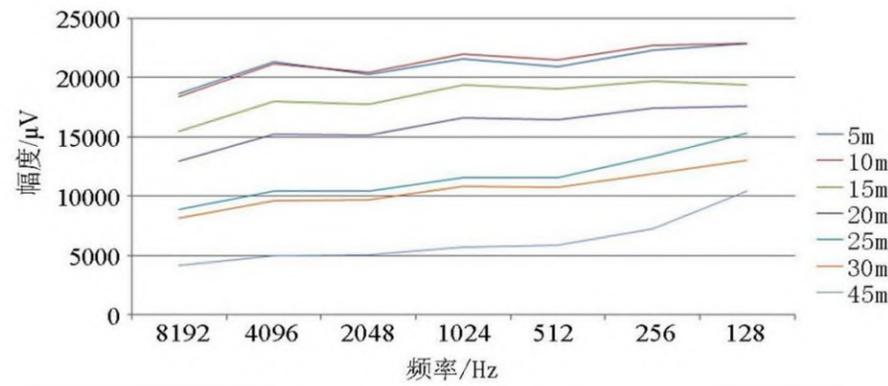


图 13 飞机离地不同高度各个主频分量的信号曲线对比

Fig.13 Comparison of signal curves of various main frequency components at different altitudes of the drone

高频段大。

3 结论

文章介绍了航空广域电磁法的基本理论,阐述了广域电磁法在航空物探的应用思考及初步探索成果,为航空物探的发展提供了一种新的方法和思路。

通过前期的初步研究探索,可以得出以下成果:

1) 线圈、磁棒、磁通门各有特点,适合于不同的工程需求,而线圈、磁棒无论是从信号强度,还是从连接方式上看,更适合于航空广域的应用需求。

2) 综合考虑分级姿态、环境因素等各种噪声影响,以及工程应用的实际情况,100 Hz 以上高频段伪随机信号序列是当前更能够快速工程化实现的频率范围。

3) 为了有效较少或规避飞机旋翼和本身电子噪声的影响,磁棒离飞机距离尽可能的大,一般要求 6 m 以上。

需要强调的是,要完全实现航空广域电磁法物探的工程化、市场化应用还有很多问题需要不断的去探索 and 解决。譬如如何结合工程应用的实际情况,进一步研究方便、快速的记录飞机飞行姿态参数,在频域或时域进行数据校正;如何完美地解决传感器和飞机的接驳问题;如何修正飞机姿态和气流对测量结果的影响^[19];如何进行航空电磁测量资料处理解释^[20]等,都需要更加深入的进行试验摸索,找到解决问题的办法。

致谢: 特别感谢何继善院士在理论方法研究过程中的指导,感谢研发部刘卫红、胡果、魏四海、谭文等在整个测试实验及论文撰写过程中提供的大力支持和帮助。

参考文献 (References):

[1] <https://baike.so.com/doc/5720898-5933627.html>
 [2] 何继善.广域电磁法和伪随机信号电法[M].北京:高等教育出版社,2010:169-189.

He J S. Wan electromagnetic method and P-seudo-random signal method [M]. Beijing: Higher Education Press; 2010:169-189.
 [3] 郭良德.西方国家航空物探技术的若干进展[J].物探与化探, 2000, 24(5): 340-345.
 Guo L D. Some advances in aerogeophysical techniques in western countries [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2000, 24(5): 340-345.
 [4] 韩登峰.我国的航空电法[J].物探与化探, 1994, 18(3): 179-185.
 Han D F. Airborne electrical method of China [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 1994, 18(3): 179-185.
 [5] 雷栋,胡祥云,张素芳.航空电磁法的发展现状[J].地质找矿论丛, 2006, 21(1): 40-44.
 Lei D, Hu X Y, Zhang S F. Development status of airborne electromagnetic [J]. Contributions to Geology and Mineral Resources Research, 2006, 21(1): 40-44.
 [6] 熊盛青.航空物探“九五”进展综述[J].物探与化探, 2002, 26(1): 1-5, 16.
 Xiong S Q. The advances in airborne geophysical survey in the period of the ninth five-year plan [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2002, 26(1): 1-5, 16.
 [7] 高维,舒晴,屈进红,等.国外航空物探测量系统近年来若干进展[J].物探与化探, 2016, 40(6): 1116-1124.
 Gao W, Shu Q, Qu J H, et al. New progress of aerogeophysical techniques abroad [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2016, 40(6): 1116-1124.
 [8] 杨云见,米晓利,宋喜林,等.应用电容耦合电阻率法检测道路隐患[J].物探与化探, 2009, 33(3): 350-353.
 Yang Y J, Mi X L, Song X L, et al. The capacitance coupled resistivity (CCR) method and its application to the detection of sub-surface hidden dangers in roads or railways [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2009, 33(3): 350-353.
 [9] 王志宇,王顺,张群英,等.一种新型地球物理电容性电场传感器研究[J].仪器仪表学报, 2016, 37(12): 2678-2683.
 Wang Z Y, Wang S, Zhang Q Y, et al. Research on novel capacitive field sensor for geophysical prospecting [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(12): 2678-2683.
 [10] 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.
 Luo Y Z, Zhang S Y, Wang W P. A research on one-dimension for-

- ward for aerial electromagnetic method in time domain[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2003, 46(5): 719-724.
- [11] 何继善.三元素集合中的自封闭加法与 2^n 系列伪随机信号编码[J].中南大学学报:自然科学版, 2010, 41(2): 632-637.
He J S. A collection of three elements of selfenclosed addition with 2^n series of pseudo-random signal coding [J]. Central South University: Natural Science Edition, 2010, 41(2): 632-637.
- [12] 李帝铨, 胡艳芳.强干扰矿区中广域电磁法与 CSAMT 探测效果对比[J].物探与化探, 2015, 39(5): 967-972.
Li D Q, Hu Y F. A comparison of wide field electromagnetic method with CSAMT method in strong interferential mininsg area [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2015, 39(5): 967-972.
- [13] 孟庆敏, 满延龙.频率域航空电磁法的应用领域及应用机制[J].物探与化探, 2013, 37(2): 260-263.
Meng Q M, Man Y L. The application fields and application mechanism of the frequency field Airborne electromagnetic method [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2013, 37(2): 260-263.
- [14] 王永兵, 何继善.一种伪随机信号混合编码及其在油气压裂智能实时监测系统中的应用[J].物探与化探, 2020, 44(1): 74-80.
Wang Y B, He J S. A hybrid coding and its application to the oil and gas fracturing intelligent real time monitoring system based on pseudorandom signals [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2020, 44(1): 74-80.
- [15] 王永兵, 何继善.WSJ-4 多功能高精度数字化伪随机信号接收系统及应用[J].物探与化探, 2014, 38(5): 1012-1017.
Wang Y B, He J S. Development and application of the WSJ-4 multifunction digital IP instrument receiving system based on pseudo-random signal [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2014, 38(5): 1012-1017.
- [16] 王卫平, 王守坦.吊舱式直升机频率域电磁系统在北京密云红光铁矿的勘查效果[J].物探与化探, 2006, 30(5): 420-426.
Wang W P, Wang S T. The exploration efficiency of the helicopter frequency domain electromagnetic system with towed bird in the Hongguang Iron Deposit, Miyun County, Beijing [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2006, 30(5): 420-426.
- [17] 李冰, 王志博, 乔扬, 等.航空重力起伏飞行中飞机姿态对测量数据影响分析[J].物探与化探, 2014, 38(5): 1024-1028.
Li B, Wang Z B, Qiao Y, et al. The impact of aircraft attitude on the measurement of airborne gravity survey under drupe flying [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2014, 38(5): 1024-1028.
- [18] 高维, 舒晴, 屈进红, 等.航空物探飞机典型飞行状态下振动特性研究[J].物探与化探, 2016, 40(1): 93-99.
Gao W, Shu Q, Qu J H, et al. A study of vibrational characteristics of the airborne geophysics aircraft under typical flight conditions [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2016, 40(1): 93-99.
- [19] 王林飞, 薛典军, 刘国锋, 等.航空物探测量数据快速检测与修复技术研究[J].物探与化探, 2015, 39(S1): 133-136.
Wang L F, Xue D J, Liu G F, et al. A study of the rapid testing and restoring technology for data of aero geophysical survey [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2015, 39(S1): 133-136.
- [20] 周道卿, 谭林, 谭捍东.直升机航空电磁资料处理解释方法及时间域航空电磁系统方案研究成果报告[R].中国国土资源航空物探遥感中心, 2009.
Zhou D Q, Tan L, Tan H D. Helicopter aviation electromagnetic data processing and interpretation method and time domain aviation electromagnetic system scheme research report [R]. China Aero Geophysical Survey and Remote Sensing Center for Land and Resources, 2009.

A preliminary exploration of the wide field electromagnetic method in aerogeophysical prospecting

WANG Yong-Bing, YIN Wen-Bin, ZHANG Lei
(Hunan Geosun High-tech Co., Ltd., Changsha 410083, China)

Abstract: Based on the basic theory of wide-field electromagnetic method (WFEM) and combined with the current problems of resource exploration and the development status of aviation geophysical prospecting, the authors mainly deal with the aviation wide-area electromagnetic method in three main aspects as a preliminary exploration; basic theory, equipment research and application testing. It is held that the quality of aviation wide-area electromagnetic data collection is susceptible to aircraft flight attitude and aircraft body noise, and high frequency bands greater than 100 Hz have better data quality and practical engineering application feasibility.

Key words: WFEM; aerogeophysical prospecting; exploration

(本文编辑:王萌)