

doi: 10.11720/wtyht.2019.1230

西永在,路宁,张兰,等.基于无人直升机平台的航磁系统集成与应用[J].物探与化探,2019,43(1):125-131.http://doi.org/10.11720/wtyht.2019.1230

Xi Y Z, Lu N, Zhang L, et al. Integration and application of an aeromagnetic survey system based on unmanned helicopter platform[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2019, 43(1): 125-131. http://doi.org/10.11720/wtyht.2019.1230

## 基于无人直升机平台的航磁系统集成与应用

西永在<sup>1,2,3</sup>,路宁<sup>1,2,3</sup>,张兰<sup>4</sup>,李军峰<sup>1,2,3</sup>,张富明<sup>5</sup>,  
吴珊<sup>1,2,3</sup>,廖桂香<sup>1,2,3</sup>,贵放<sup>1,2,3</sup>,黄威<sup>1,2,3</sup>

(1.自然资源部地球物理电磁法探测技术重点实验室,河北廊坊 065000; 2.中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所,河北廊坊 065000; 3.国家现代地质勘查工程技术研究中心,河北廊坊 065000; 4.北华航天工业学院,河北廊坊 065000; 5.山西省煤炭地质物探测绘院,山西晋中 030600)

**摘要:**笔者介绍了无人直升机航磁系统的研发与集成,采用无人直升机作为飞行平台,搭载高精度航空磁测系统,具有低成本、高效率、不受机场跑道限制、可夜航、按设计测线全自主导航飞行等特点。该系统分别完成了磁补偿试验飞行与实际应用工作,补偿精度达到0.046 9 nT,测量成果与测区内以往航磁成果对比,其反映的地磁场特征形态基本一致,验证了该系统的有效性,航磁异常等值线在细节上表现更细致。本系统为大比例尺、高精度、小面积的航磁测量工作提供了一种高效灵活的工作手段。

**关键词:**无人直升机;航磁系统;磁补偿试验;集成与应用

**中图分类号:** P631 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2019)01-0125-07

### 0 引言

随着无人机技术的成熟,无人机航磁测量成为航空物探技术的一个新兴分支,具有部署便捷、应用成本低、智能化、高精度等特点,因此其研发与应用日益受到世界各航空地球物理公司和单位的广泛关注。如英国 Magsurvey 公司研发的 PrionUAV 航磁系统;荷兰 Fugro 公司在 Insitu 公司的协助下,改装了扫描鹰无人机 Georanger- I 型高精度无人机航磁系统;加拿大万能翼地球物理公司利用 Venturer 型无人机,集成钽光泵磁力仪形成无人机航磁系统;德国 MGT 公司利用无人直升机 MD4-1000 型搭载小型化磁通门磁力仪,应用于 UXO 及滑坡探测;2012 年日本发展了多款基于无人直升机平台的航磁系

统,取得一定效果<sup>[1-9]</sup>。国内的中国自然资源航空物探遥感中心、中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所(简称“物化探所”)及中国科学院遥感与数字地球研究所等单位也先后开展了基于固定翼无人机航磁测量技术的研究工作,并取得了很好的效果,如物化探所在中国航天空气动力技术研究院,以及核工业航测遥感中心协助下,基于国产彩虹-3 无人机平台集成的航空物探(磁/放)综合站,在我国东北、西北地区实际测量中取得高质量的数据<sup>[10-11]</sup>;2008 年中船重工 715 所进行了相关系统研制,劳雷工业公司近两年也在进行相关研究,但均未见应用于实际测量工作<sup>[12]</sup>;桔灯勘探公司开展的基于多旋翼无人机搭载磁通门磁力仪系统,重量轻但精度较低。

从目前研究来看,固定翼无人机平台有低空高

收稿日期:2018-06-12;修回日期:2018-11-20

基金项目:中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所基本科研业务费专项资金项目(AS2017Y04);中国地质调查局地质调查项目(DD20160151-03);河北省科学技术厅自筹经费项目(16210350)

作者简介:西永在(1985-),男,工程师,硕士,主要从事航空物探方法技术研究工作。Email:xiyongzai@igge.cn

精度、飞速快、效率高等特点,适合大面积的航磁测量工作,但是需要机场跑道的保障;而无人直升机在超低空、低速巡航、机动灵活性更具优势,并且无需机场跑道的保障,适合于大比例尺、小面积的航磁详查测量工作,国内的研究也相对较少。2017 年物化探所与山西省煤炭地质物探测绘院合作,集成了一套基于无人直升机的航磁系统,并在江苏省某滩涂区进行试验飞行,笔者就无人直升机性能、如何弱化飞机磁本底干扰、探头安装的最佳稳定位置、无人直升机的航磁补偿方式以及实际应用效果等方面进行详细探讨分析。

1 系统研发

无人直升机航磁系统主要包括无人直升机平台和航磁系统两部分,无人直升机空中飞行由地面控制站通过无线电传输和控制命令进行控制,智能自主飞行。

1.1 无人直升机平台

本系统采用的无人直升机平台为 WH-110A 型,是由北京方信科技在进口基础上自主研发的一款新型无人直升机,旋翼直径 3.2 m,机身高 1.01 mm,机身宽 0.72 m,全长 3.81 m,最大巡航速度 60 km/h,续航时间 3 h,有用载荷 35 kg,最大起飞重量 110 kg,最大飞行高度 3 000 m,该飞行平台具有以下特点:

- 1) 控制系统采用差分 GPS 自适应飞控导航系统,具备目测遥控、超视距实时监控、高精度定位悬停和预设航线智能自主飞行功能,可以根据作业要求设置飞行航线和任务指令。
- 2) 起降稳定便捷,只需要 8 m×8 m 空地,风速小于 8 m/s 时可以满足无人直升机起降及平稳飞行,最大抗风能力可达 15 m/s。
- 3) 飞控系统使用无线电传输和控制,飞行高度大于 100 m 时通讯距离大于 30 km,无人直升机在飞行过程中的方位、姿态、速度、油量、飞行轨迹等数据可实时传至地面控制站,实现对无人直升机平台的远程监控。
- 4) 该平台有用载荷可达到 35 kg,载重能力相对较大,小型航磁系统重量在 5 kg 左右,完全满足航磁系统载重要求。

1.2 机载航磁系统

机载航磁系统由 CS-VL 高精度铯光泵航磁仪、AARC51 自适应航磁补偿和数据收录仪、气压高度计、雷达高度计、GPS 导航定位系统等设备组成。该

磁测系统采集磁场数据的自动补偿、磁场强度、经纬度坐标、离地高度、海拔高度、飞行方向等数据。

AARC51 是 RMS 公司生产的运用在地球物理勘探及环境调查领域的先进航磁补偿系统,结构紧凑、轻便并且十分坚固耐用,磁场范围 15 000 ~ 105 000 nT,分辨率 0.32 pT,系统噪声小于 0.1 pT,补偿精度(包络线)约 20 pT,校准时间约 6~8 min,海拔使用高度达 6 000 m。CS-VL 磁力仪测量范围 15 000 ~ 100 000 nT,转向差小于±0.2 nT,工作温度-40℃ ~ 50℃,100%防水。整个系统总重量不超过 5 kg,是无人直升机上理想的航磁系统。

1.3 系统集成

1.3.1 飞机磁基底

由于飞机大部分组件为金属材质,其本身就是一个磁性体(如图 1),飞机发动机所在位置的磁场最强,可以达到 240 nT,向机头和机尾方向磁场强度逐渐减弱,这种强磁场会对航磁测量造成很大的干扰,因此需要对无人机进行改装,尽量减小这种飞机自身带来的磁干扰。

首先在无人直升机机起落架位置安装向机头方向延伸长度为 3.5 m 碳纤维材质的探杆,使得磁探头远离飞机机身,以减小其磁干扰;同时,除飞机关键部件外,将其余组件更换为无磁或弱磁材料,如油箱采用塑料材质、探头支撑杆均采用碳纤维材质、飞机底部仪器箱采用全铝材质、固定螺丝采用纯铜材质等(如图 2)。

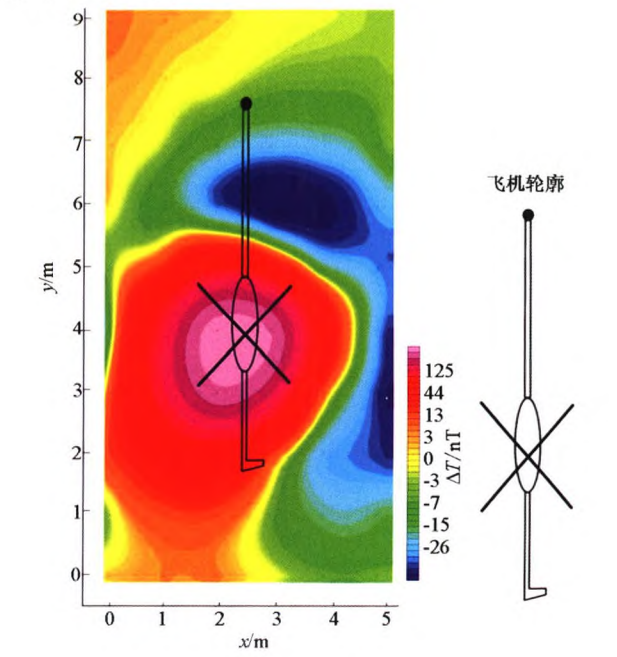


图 1 无人直升机磁本底等值线平面  
Fig.1 Magnetic back ground of the unmanned helicopter





图 2 无人直升机航磁系统

Fig.2 The unmanned helicopter aeromagnetic system

1.3.2 系统集成

针对无人直升机的结构特点,航磁系统集成需要在机腹底部设计一个开细孔的铝制仪器箱,将航磁数据收录补偿仪和供电电源固定在仪器箱中,既可以达到防潮效果又不影响仪器散热;雷达高度计安装于仪器箱底部,略高于飞机起落架,避免起落架造成的散射干扰;将磁探头安装于由 3 根碳纤维杆组成的三角支撑结构的探杆顶端,三角结构的稳定性可以减小探杆的晃动对磁探头的影响,同时支点位置水平结构处安装磁通门磁力仪,可以与飞机姿态保持同步,为航磁补偿提供准确的三分量数据;GPS 天线位于机身尾部,避开旋翼遮挡位置,并通过飞机尾椎内部线路与航磁收录仪连接(如图 2)。

为了实现航空磁力仪和无人机平台的辅助信号同步采集,使用 D/A 模块将雷达高度和气压高度数据转换为模拟量,送入航磁收录仪,航磁测量系统组成结构如图 3 所示。

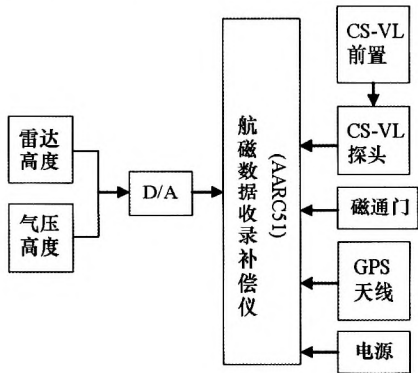


图 3 航磁系统组成结构示意图

Fig.3 The diagram of the structure of the unmanned helicopter aeromagnetic survey system

2 航磁补偿试验

2.1 常规航磁软补偿方法

在航空磁测中,由于飞机自身飞行方向和运动姿态的变化,飞机上磁性元件产生的磁干扰场会叠加在地球磁场之上,因此需要对磁干扰场进行补偿,消减其影响,提高航磁测量精度<sup>[12-17]</sup>。

补偿方法是:机载航磁自动数字补偿仪,在选定的平静磁场区(磁场变化最大不超过 200 nT),沿矩形闭合框四边(方向分别为 0°、90°、180°、270°,或测线和切割线方向)飞行大约 120 s,高度 2 000~3 000 m,每一方向分别做侧滚(±10°)、俯仰(±5°)、侧滑(±5°)3 组动作,每种动作做 5、6 个往复,获取飞机磁干扰与飞行姿态之间的关系数据,解算磁补偿模型的各项系数,以备实时或事后进行磁补偿<sup>[18-20]</sup>。

2.2 无人直升机航磁系统磁补偿试验

由于小型无人直升机操控方式与有人驾驶飞机或中大型固定翼无人机的操控方式不同,自动驾驶模式下,飞行高度可以满足要求,但是测控系统无法完成要求的规范动作。在经过多次讨论分析和试验后,选择磁场平稳区,采用无人直升机空中悬停状态下,以飞机机头方向(探头所在方位)为基准,飞行高度在视距范围内(300~500 m),手动遥控控制飞机沿 4 个方向完成要求的动作,同一方向每个动作反复做 3~5 个,所有动作完成时间控制在 6~8 min 内(以所用仪器特性为准),从而达到航磁补偿的目的(如图 4,x 方向为机头方向)。

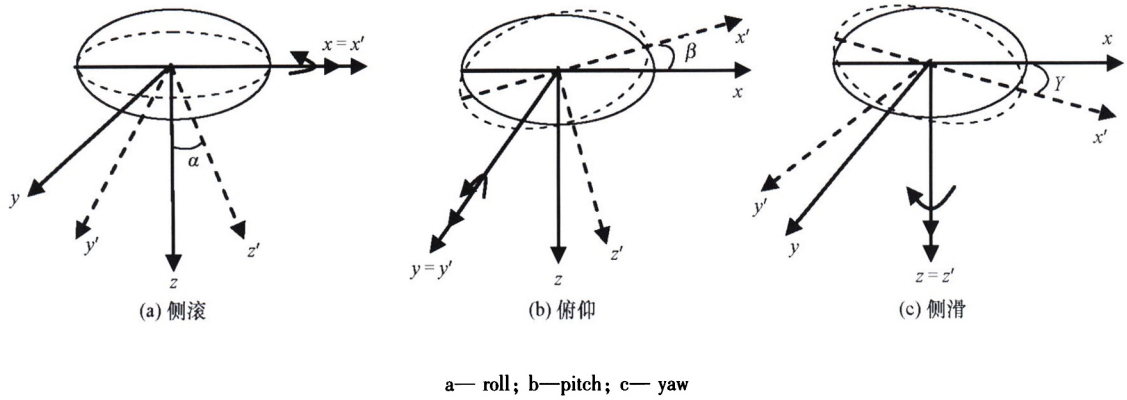


图 4 无人直升机悬停补偿动作示意

Fig.4 The diagram of hovering maneuver for the unmanned helicopter aeromagnetic compensation

如图 5 所示为该系磁补偿试验磁通门磁力仪获得的  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  三分量磁场数据剖面图,可以很好的反映出无人直升机在 4 个方向分别做出的侧滚、侧滑和俯仰动作,该次试验过程每个方向每个动作完

成 3 次往复。补偿完成后,以测量模式再完成一次相同的动作,来验证补偿效果,如图 6 所示,蓝线代表测量的原始数据,红线为补偿后数据,可以看出该方法取得了较好的补偿效果。

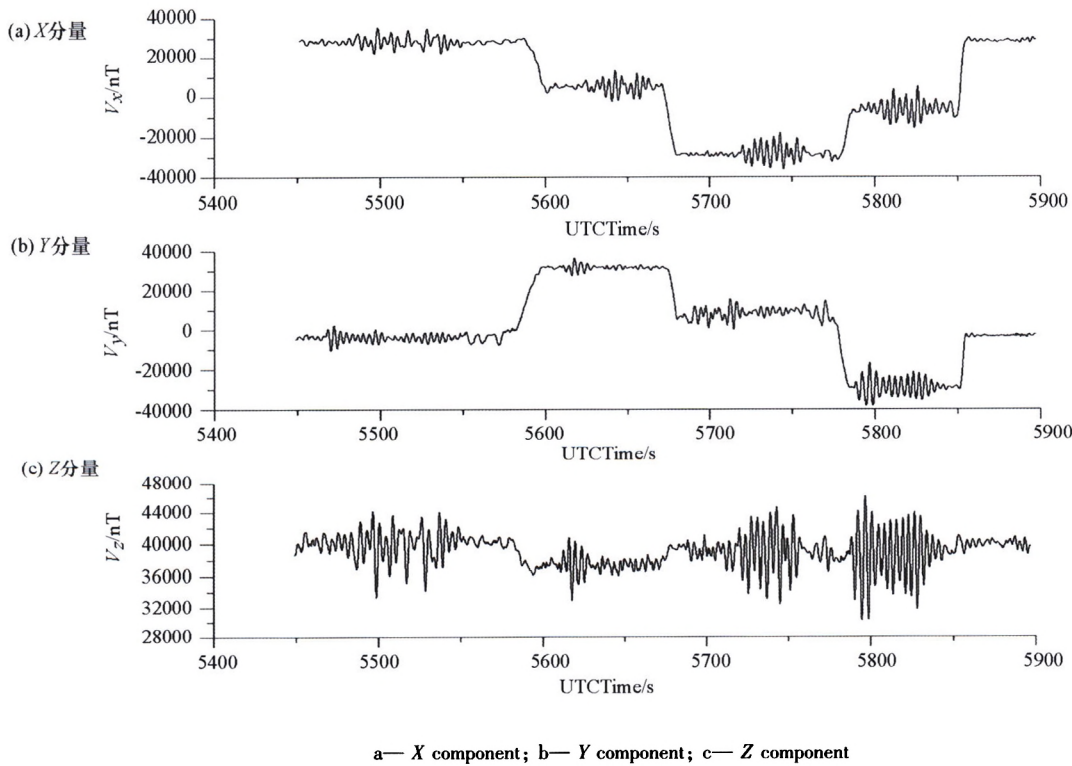


图 5 磁通门磁力仪三分量剖面

Fig.5 The profile of three components of fluxgate magnetometer

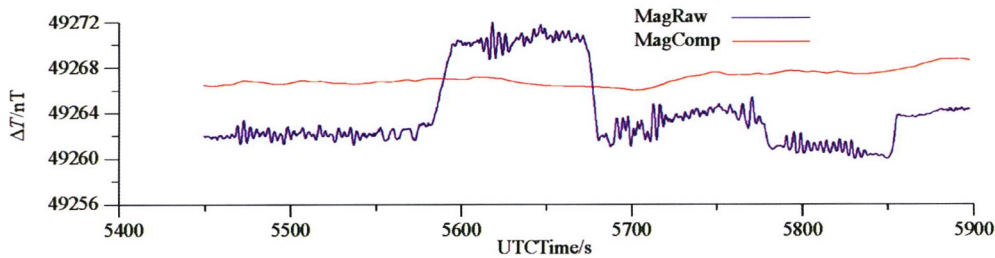


图 6 原始数据与补偿后数据对比

Fig.6 Comparison between raw data and compensated data



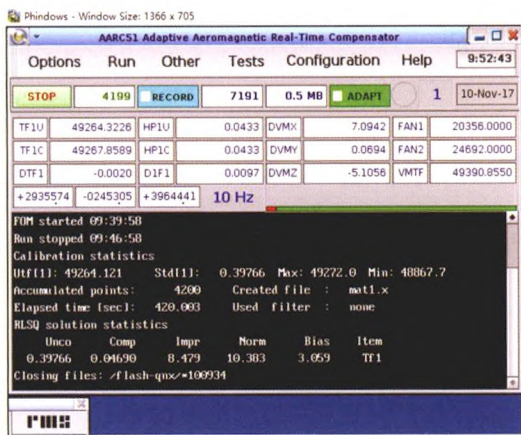


图 7 无人直升机航磁系统磁补偿试验结果

Fig.7 Result of the unmanned helicopter aeromagnetic compensation test flight

该次补偿试验,补偿前标准差(Unco)为0.397 66 nT,补偿后标准差(Comp)为0.046 9 nT,改善比(Impr)为8.479,满足规范补偿后标准差小于0.08 nT的要求(如图7)。

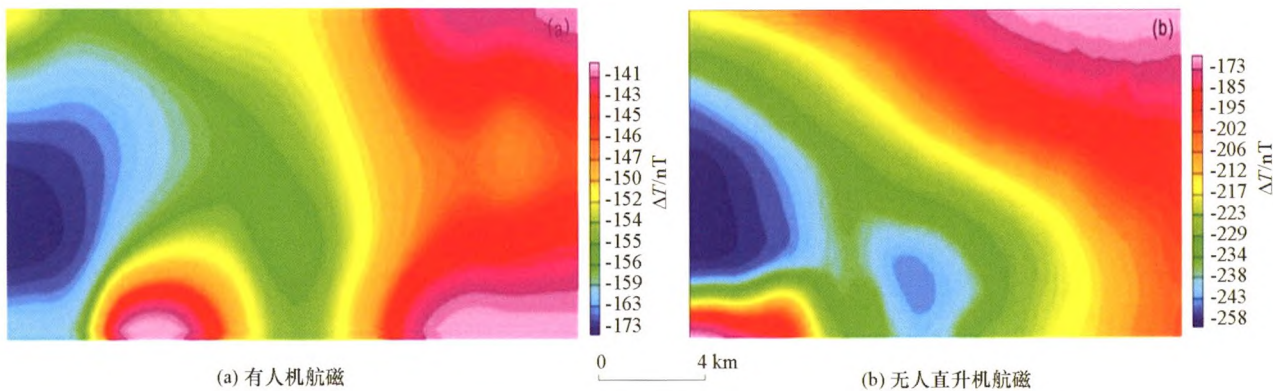
### 3 应用实例

2017 年应用本系统在江苏省某海域开展了飞行测量工作,测线方向为 EW 向,测量比例尺为 1:10 万,起降坪选取测区内较宽阔的海岸大堤公路的一处空地。测区位于海岸带滩涂区,测区内第四纪地层结构为除东部为海域外,其余地区均为第四系和新近系厚覆盖层,从收集的钻孔资料可知第四系底界面埋深约为 280~300 m,300 m 以深最上部地层

为新近系盐城组灰绿色、棕黄色亚黏土夹粉细砂、中粗砂,该地层顶部为棕黄、灰黄色夹绿色亚黏土(硬土层),约 10~15 m 厚,是长江三角洲地区第四纪与新近系地层分界标志层。在基岩方面,测区内新近系地层与中生界地层直接接触,基岩地层主要由白垩系浦口组( $K_2p$ )和上古生界( $Pz_2$ )地层组成,基岩深度在 600~800 m 之间。

该测量工作完成有效测量飞行近 200 测线千米,测网疏密度  $1\,000\pm0.8$  m,偏航距在 10 m 范围内的采样点占 100%,最大偏航距 5.09 m;实际测量平均飞行高度为 119 m(设计飞行高度 120 m),全部采样点保持在 118~121 m 范围内;本次测量各测线的动态噪声水平在 0.010~0.015 nT 范围内,平均动态噪声 0.012 nT,根据规范中的分级标准,全部为一级动态噪声水平。本次航磁数据处理采用物化探所基于 Geosoft 二次开发的航磁处理软件,质量统计采用了中国自然资源航空物探遥感中心的 GeoProbe 软件,统计结果全部满足航磁规范要求。

本次获取的航空磁测成果与收集的以往(20 世纪 80 年代)1:20 万有人机航磁成果进行对比(如图 8),从图中可以看出主体异常所在位置、分布形态基本是一致的,验证了该系统的有效性。由于两次航磁工作的比例尺、采样率、航磁仪精度以及飞行高度等参数的不同,在对磁异常分布细节方面的表现存在一些差异,但很明显无人直升机航磁获取的磁场数据更精确更细致。



a— manned aerial vehicle aeromagnetic survey; b— unmanned helicopter aeromagnetic survey

图 8 江苏省某滩涂区航磁测量成果对比

Fig.8 Comparison of aeromagnetic anomalies of a shoal area in Jiangsu province

### 4 结论

该无人直升机航磁系统是将航空磁测设备安装

到可靠的无人直升机平台,从而应用到航空物探测量,为地质调查、矿产勘探等提供了一种高效灵活的工作手段。

#### 4.1 优势

1) 具有更精确的飞行控制。无人直升机配备

的飞控导航系统能够按照事先规划好的航线全自主飞行测量,偏航及飞行高度保持能力等远远高于传统有人人工驾驶飞机。

2) 工作效率提高。该无人直升机巡航速度可达 60 km/h,加载副油箱每架次续航可达到 3 h,飞机的加油方式简便耗时短,仅需十几分钟就可完成加油工作,每天可进行多个架次的飞行任务,并且可在夜间飞行实现全天候测量,提高了工作效率。

3) 生产成本降低。该无人直升机只需要 2 名飞控人员即可开展工作,降低了人员成本,并且燃油使用普通汽油即可,百公里油耗在 20 L 以内,具有很高的燃油经济性。

4) 起降场地的选取更为灵活。无人直升机的起降相对于中大型固定翼无人机而言,不受机场跑道的制约,在较为平坦开阔的硬质空地即可完成,因此在实际航磁测量工作中,可在工区内或最近位置选择起降点,减少路途航程,提高效率。

#### 4.2 展望

1) 无人直升机具有超低空、低速巡航的飞行特点,因此在大比例、高精度、小面积详查工作具有广阔的应用前景。

2) 该无人直升机航磁系统进一步的研究方向是实现地面人员实时监测并干预机载航空磁力仪的机制,研发一套航磁仪远程测控软件,提供人机交互界面,对空中实时测得的航磁数据进行监控。

#### 参考文献 (References):

- [1] 张洪瑞,范正国. 2000 年来西方国家航空物探技术的若干进展[J]. 物探与化探, 2007,31(1):451-457.  
Zhang H R, Fan Z G. Recent advances in aero geophysical techniques used abroad[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2007,31(1):451-457.
- [2] 熊盛青. “十五”以来我国航空物探进展与展望[J]. 物探与化探, 2007,31(6):479-484.  
Xiong S Q. The advances of aero geophysical survey in China since the tenth five yare plan and its development trend[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2007,31(6):479-484.
- [3] Barnard J. Use of unmanned air vehicles in oil, gas and mineral exploration activities[C]//AUUSI Un-manned Systems North America 2010 Conference, 2010.
- [4] Lalibertee J. Carleton university fixed wing uavproject[D]. Canada: Carleton university, 2013.
- [5] Partner R. Georanger aeromagnetic UAV-from development to commercial survey[J]. Preveiw of Australian Society of Exploration Geophysicists, 2016, 125:28-29.
- [6] Kurvinen K, Smolander P, Pollanen R, et al. Design of a radiation surveillance unit for an unmanned aerial vehicle[J]. Journal of Environmental Radioactivity, 2005, 81:1-10.
- [7] Stoll J B. Unmanned aircraft system for rapid near surface geophysical measurements[J]. International archives of the photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2013, XL-1/W 2:391-394.
- [8] Hitoshi M, Satoshi T, Yumiko O, et al. A development of airborne survey of gravity and magnetics on an unmanned helicopter and its data processing[C]//Japan Geoscience Union meeting, 2013.
- [9] 李文杰, 李军峰, 刘世凯, 等. 自主技术无人机航空物探(磁/放)综合站研发进展[J]. 地球学报, 2014, 35(4):399-403.  
Li W J, Li J F, Liu S K, et al. The progress in the decelopment of the integrated UAV magnetic & radiation survey system[J]. Acta-GeoscienticaSinica, 2014, 35(4):399-403.
- [10] 中国地质科学院. 中国地质科学院 2013 年度十大科技进展揭晓[J]. 地球学报, 2014, 35(1):1-5.  
Chinese Academy of Geological Sciences. Top ten scientific and technological progress of Chinese academy of geological sciences in the year 2013 nuveiled [J]. ActaGeoscienticaSinica, 2014, 35(1):1-5.
- [11] 崔志强, 胥值礼, 李军峰, 等. 无人机航空物探技术研发应用现状与展望[J]. 物探化探计算技术, 2016, 38(6):740-745.  
Cui Z Q, Xu Z L, Li J F, et al. The R & D application of UAV airborne geophysical survey and its developmenttrend[J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2016, 38(6):740-745.
- [12] DZ/T 0142-2010 航空磁测技术规范[S]. 北京:中国标准出版社, 2010.  
DZ/T 0142-2010 Criterion of aeromagnetic survey [S]. Beijing: Standards Press of China, 2010.
- [13] 刘晓杰. 航磁补偿技术研究[D]. 长春:吉林大学, 2009.  
Liu X J. Study on aeromagnetic compensation technique [D]. Changchun: Jilin University, 2009.
- [14] 吴文福. 16 项自动磁补偿系统[J]. 声学及电子工程, 1993(4):14-30.  
Wu W F. 16 automatic magnetic compensation systems[J]. Acoustics and Electronics Engineering, 1993(4):14-30.
- [15] 何敬礼. 飞机磁补偿、磁补偿器的历史、现状及发展趋势[J]. 地学仪器, 1991(3):1-7.  
He J L. History, current situation and development trend of magnetic compensation and magnetic compensator for aircraft[J]. Equipment for Geotechnical Engineering, 1991(3):1-7.
- [16] 何敬礼. 飞机磁场的自动补偿方法[J]. 物探与化探, 1985, 9(6):464-469.  
He J L. Automatic compensation technique for the aeromagnetic field[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 1985, 9(6):464-469.
- [17] 李标芳, 王振东. 飞机的磁干扰及电子补偿方法[J]. 物探与化探, 1979, 3(1):35-43.  
Li B F, Wang Z D. Magnetic interference and electronic compensation method for aircraft[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 1979, 3(1):35-43.
- [18] Noriega G. Performance measures in aeromagnetic compensation [J]. The Leading Edge, 2011, 30(10):1122-1127.
- [19] 骆遥, 段树岭, 王金龙, 等. AGS-863 航磁全轴梯度勘查系统

关键性指标测试[J]. 物探与化探,2011,35(5): 620-625.

Luo Y, Duan S L, Wang J L, et al. Key indicators testing for AGS-863 three axis airborne magnetic gradiometer[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2011,35(5):620-625.

[20] 王林飞, 薛典军, 熊盛青,等. 航磁软补偿质量评价方法及软件实现[J]. 物探与化探, 2013, 37(6): 1027-1030.

Wang L F, Xue D J, Xiong S Q, et al.The method of quality assessment for digital magnetic compensation and software realization [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2013, 37(6): 1027-1030.

Integration and application of an aeromagnetic survey system  
based on unmanned helicopter platform

XI Yong-Zai<sup>1,2,3</sup>, LU Ning<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Lan<sup>4</sup>, LI Jun-Feng<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Fu-Ming<sup>5</sup>,  
WU Shan<sup>1,2,3</sup>, LIAO Gui-Xiang<sup>1,2,3</sup>, BEN Fang<sup>1,2,3</sup>, HUANG Wei<sup>1,2,3</sup>

(1.Laboratory of Geophysical Electromagnetic Probing Technologies,Langfang 065000,China; 2.Ministry of Natural Resources, Institute of Geophysical and Geochemical Exploration,CAGS,Langfang 065000,China; 3.Laboratory of Geophysical EM Probing Technologies, MLR, Langfang 065000,China;4.North China Institute of Aerospace Engineering, Langfang 065000,China; 5.Shanxi Provincial Coal Geological,Geophysical Prospecting,Surveying and Mapping Institute,Jinzhong 030600,China)

**Abstract:** This paper introduces the research, development and integration of an unmanned helicopter aeromagnetic survey system. The system uses an unmanned helicopter as flying platform to carry out the high-precision aeromagnetic equipment. As all know, the unmanned helicopter doesn't need a runway to take off and land, and has the ability to self-navigate according to designed lines and to work at night. Thus, it can get a higher efficiency at a lower costing. An aeromagnetic compensation flight whose accuracy was 0.046 9 nT and several survey flights have been accomplished. Compared with the previous aeromagnetic survey in the same area, the characteristics of the geomagnetic field are basically alike, which validates the effectiveness of the unmanned helicopter aeromagnetic system. The unmanned helicopter aeromagnetic anomaly map is more detailed because of the different parameters such as scale and instrumental accuracy and sampling rate between the two systems. This unmanned helicopter aeromagnetic survey system provides an effective and flexible means for large scale, high-precision and small area aeromagnetic survey.

**Key words:** unmanned helicopter; aeromagnetic system; aeromagnetic compensation test; integration and application

( 本文编辑:王萌)