doi: 10.11720/wtyht.2019.1466

黄岩,罗丁,冯自成,等.无人直升机航磁测量系统集成及应用[J].物探与化探,2019,43(2):386-392.http://doi.org/10.11720/wtyht.2019.1466 Huang Y,Luo D,Feng Z C, et al.Unmanned helicopter aeromagnetic measurement system and its application[J].Geophysical and Geochemical Exploration,2019,43(2):386-392.http://doi.org/10.11720/wtyht.2019.1466

# 无人直升机航磁测量系统集成及应用

## 黄岩1,罗丁1,冯自成1,陈伟1,焦健2

(1.江苏省地质勘查技术院,江苏南京 210049;2.吉林大学 地球探测科学与技术学院,吉林 长春 130061)

摘要:笔者介绍了一种基于无人直升机平台的航磁测量系统的集成与应用。通过对无人直升机飞行平台的集成 改装和飞行测试试验,成功将航空磁测传感器与无人直升机平台集成为无人直升机航磁测量系统。为验证系统的 有效性,该系统先后完成了航磁补偿飞行和测区应用飞行。通过将实测飞行的数据绘制航磁异常等值线图与测区 内以往地磁异常等值线图对比,结果显示两者反映的测区地磁场特征形态基本一致。无人直升机航磁测量系统为 地形起伏、环境复杂的勘探区域开展航磁测量提供了一种高效、便捷的工作手段。

关键词:无人直升机;航磁测量系统;试验与应用

中图分类号: P631 文献标识码: A 文章编号: 1000-8918(2019)02-0386-07

### 0 引言

无人机航空磁测是无人机与航空物探仪器设备 结合形成的一种新兴的航空磁测技术。由于无人机 航磁系统具备体积小,重量轻,生产成本低,可昼夜 飞行等特点,日益受到航空地球物理从业者的关注 与青睐<sup>[1-3]</sup>。近十年来,先后有英国 Magsurvey 公 司,荷兰 Fugro 公司,美国卡尔顿大学等选用不同型 号的固定翼无人飞行平台,研发无人机航空磁测技 术<sup>[4-9]</sup>。中国地质科学院地球物理地球化学勘查研 究所成功研发的"彩虹-3"无人机航空物探系统,也 在航磁勘查中取得了良好的应用效果<sup>[10-12]</sup>。无人 直升机作为无人机里的一个重要分支,因其强大的 灵活性,复杂地形的适用性,可垂直起降等优点,正 逐渐被国内重视。

笔者采用无人直升机搭载航磁仪器集成开发出 无人直升机航磁测量系统,本系统具有高精度、稳定 高效、低空低速等特点,无跑道需求,机动性高,能够 在不同地形区域进行航磁测量。2017年本系统试 验飞行取得成功,现已在平原、丘陵和低山地区开展 过航磁测量工作,均取得了较好的勘查效果。

### 1 系统构成

无人直升机航磁测量系统由无人直升机和航空 磁测系统组成。航空磁测系统包括 GSMP-35A 型高 精度钾光泵磁力仪、OEM62 型 GPS 仪、MDL 激光高 度计以及地面磁日变观测站。GSMP-35A 型高精度 钾光泵磁力仪由钾光泵磁探头,磁通门和数据收录 系统组成,见图 1。

#### 1.1 飞行平台

飞行平台采用涡轮轴动力无人驾驶直升机,机 身尺寸:3000 mm×550 mm×800 mm,旋翼直径 2600 mm。巡航速度 50 km/h,标准续航时间 50 min。配 备移动地面指挥系统,自主起降,航点导航。技术指 标见表 1。

#### 1.2 航空磁测仪

航空磁测仪器采用 GSMP-35A 型钾光泵磁力 仪,测量范围 20000~100 000 nT,分辨率 0.0001 nT, 绝对精度±0.1 nT,探头方向差±0.05 nT,采样率 1、5、 10、20 Hz 可选。

收稿日期: 2018-12-18; 修回日期: 2019-01-11

基金项目: 江苏省地质矿产勘查局科研技改项目(2015-KY-9)

作者简介: 贡防 数据),男,硕士,工程师,主要从事航空电磁、磁法研究工作。Email:huangyan\_jlu@ 163.com





Fig.1 Aeromagnetic measurement system of unmanned helicopter

表1 无人直升机主要技术指标

Table1 Technical indicators of unmanned helicopter

参数	指标
最大安全起飞重量	40 kg
空机重量	16 kg
飞行高度	≪4 000 m
工作温度	$-20^{\circ}\text{C} \sim 50^{\circ}\text{C}$
抗风性能	风速≤14 m/s

磁通门磁力仪采用的是 TFM100-G2 型三轴磁通门 磁力仪,测量范围±100 μT,采样率 10 Hz。

数据收录系统通过串口线连接计算机,运行 GEMLink 5.3 航磁测量系统软件,能够实时采集钾 光泵磁力仪总场数据、飞机实时坐标位置数据等。

#### 1.3 地面磁日变观测站

采用 RS-HGB10 型高精度氦光泵磁力仪。数据 收录采用 Windows XP Embedded 计算机操作系统,

运行 GMInfo 航磁测量系统软件,实时采集氦光泵磁 力仪总场数据。

## 2 无人机磁干扰试验

选择磁场平稳区域,无人机头部朝向正南方,磁 探头离地1m,实测出无人机静止状态时候的磁场 分布,测量结果去除背景场及日变的影响,结果见图 2。可见无人机静止时产生的磁异常主要位于飞机 头部及尾翼位置。机头位置磁场较大(黄点处为飞 机发动机位置),异常峰值达150nT,异常范围呈椭 圆形。图3为L1线(无人机轴线)ΔT异常图,可见 当离开无人机一段距离时,无人机产生的磁异常沿 L1线衰减较快,距飞机发动机2m处(平面坐标(3, 1)),磁场值衰减至1nT以内。



万方数据

图 2 九八机静止从恐磁场等值线 Fig.2 Magnetic field of UAV off-line





Fig.3 Magnetic graph of L1 line (yellow spot for engine position)

为进一步了解无人机发动机工作及螺旋桨旋转时产生的磁干扰情况,在无人机工作状态下进行磁场值测量,令无人机在发动机 3 000 r/min、螺旋桨 500 r/min 时进行测量。同样无人机头朝向正南方向,在距离无人机发动机分别为 1.0、1.5、2.0、2.5、3.0、3.5 m 处测量其磁场值。

无人直升机工作时不同距离下磁场值结果如图 4,无人直升机的磁干扰随测距呈指数下降,当距离 无人直升机发动机 2 m 时,无人直升机自身的磁干 扰衰减到仅为 2.5 nT。

同时,测试了无人机通讯设备对磁测量的影响 (图5),探头放置在距无人直升机发动机2m处。 当有通讯信号时,短时间内磁场变化最大值仅增加 0.14 nT,表明此处无人直升机通讯系统的磁干扰很 小。













## 3 系统集成

根据无人直升机磁干扰试验结果,结合无人直 升机自身的飞行性能,设计制作了一套磁探头距无 人直升机发动机2m的硬支架系统(图7)。采用碳 纤维材料<del>制作肌棱</del>柱结构支架,棱柱中间使用航空 铝材将4根支杆两两相连,形成两个固定平面,以保持支杆的稳定性,减少飞行过程中产生的抖动<sup>[13]</sup>。磁探头安装在支架最前端,磁通门安装在超出旋翼覆盖部位,GPS安装在靠近机体位置,数据收录系统以及高度计安装在机体下方。集成后的无人直升机航磁系统见图 6。



图 6 补偿前后磁异常曲线

Fig.6 Magnetic field before and after compensation



图 7 无人直升机航磁测量系统集成 Fig.7 Integration of aeromagnetic measurement system

## 4 磁补偿试验

为消除无人直升机对磁测量的干扰,获得高质量的地磁场数据,需进行磁补偿试验。

补偿试验消除的磁干扰主要包括恒定磁场、感 应磁场和涡流磁场3个方面。恒定磁场是由无人直 升机铁磁性物质的剩磁引起的,感应磁场是由无人 直升机某些铁磁性物体受地磁场感应产生的,涡流 磁场是由构成整个无人直升机机身、机翼、起落架等 大的金属片或金属壳等切割地磁场产生的<sup>[14-16]</sup>。 此外,磁探头在测量过程中,因光泵探头光轴正向和 磁场方向的夹角发生变化,测量值会发生小幅度的 变化而产生探头转向差<sup>[17-18]</sup>。无人直升机材质以 非磁性材料为主,其中整体壳承力结构、起落架、旋 翼、螺旋桨等均采用碳纤维材料,涡流磁场干扰较 小,因此,无人直升机补偿试验中只考虑恒定磁场、 感应磁场及磁测方向差的干扰。

第一<u>步是消除</u>恒定磁场和感应磁场的干扰。试 万方数据 验采用定点补偿飞行,选择场地为磁场梯度变化不 大于1nT/m的试验场地,无人直升机在人工操控飞 行状态下,在60m高度左右的固定点位按顺时针分 别朝向0°、90°、180°、270°四个方向做俯仰(±5°)、 摇摆(±10°)和偏航(±5°)三组机动动作,每组机动 动作持续时间约30s。

完成飞行后,获得的数据通过事后补偿软件计 算磁补偿系数。软件由加拿大 Oritek Technologies 公司提供,补偿结果精度通过标准差和改善率进行 评价,标准差计算需要通过高通滤波去除补偿前后 总场数据中的背景场<sup>[19]</sup>,本次补偿试验中补偿的动 作周期为 3.5 s(仪器采样率为 10 Hz),则本次滤波 窗口为 0.286 Hz。补偿结果如下(图 7):补偿前标 准差为±0.403 nT,补偿后标准差为±0.028 nT,改善 率为 14.24。

第二是消除磁测方向差干扰。选择磁场平稳场 地进行时十字剖面飞行,计算 0°、90°、180°、270°四 个方向中心点处达到同一磁场水平时在各方向上的 差值,校正结果见图 8。



Fig.8 Magnetic field before and after heading-error correction

### 5 野外应用测试

2018 年应用本系统在安徽省某测区开展了 1: 10000 比例尺的应用飞行测量工作。测区内地形相 对较复杂,植被覆盖程度高,区内有数个采坑,在该 区域开展地面磁测工作难度大。

区内地层为第四系及白垩系下统大王山组,区 内褶皱及断裂发育,构造总体走向为 NEE 向和 NE 向,同时区内岩浆活动强烈,岩性以闪长玢岩为主, 区内矿床主要为玢岩型磁铁矿。本工作测线方向为 SN向,飞行方向角为0°和 180°,线距 100 m;切割线 飞行方向垂直于主测线,布置为 EW 向,方向角为 90°和 270°,线距为 600 m。本次试验飞行共完成 112 km,飞行时间 3.6 h,生产效率为 31 km/h,数据 采样率为10Hz。

本次测量数据处理与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。平均测 网疏密度为 100±5.4 m,偏航距在 10 m 范围内的采 样点约占 81%,最大偏航距小于 30 m,且均位于测 线转换的拐弯处。飞行采用沿地形起伏飞行,全区 平均飞行高度为 84 m,飞行高度在 60~120 m 之间 的约占 67%。各测线的动态噪声水平为一级资料 (小于±0.08 nT)的采样点为 93.89%。航磁数据经 各项改正和粗略水平调整后,全区航磁测量总精度 为±2.09 nT。测量结果满足航磁规范要求<sup>[20-21]</sup>。

本系统获得的航磁图与 19 世纪 50 年代安徽省 地质局在测区开展的 1:1万地磁成果进行了对比, 如图 9 所示。



本次航磁图所获得主体异常的位置、分布范围 与以往磁测图基本一致,但本次测量航磁异常更加 完整、清晰和精细,成图质量更好。需要说明的是, 由于近年来测区内磁铁矿的开采,致使本次测量的 磁异常在部分细节上表现与以往磁测图有所区别。

## 6 结论

根据无人直升机磁干扰试验结果,并结合无人 直升机性能特点,开展了无人直升机航磁测量系统 的集成研究,完成了无人直升机航磁系统的集成。 开展了磁补偿试验,补偿后标准差为±0.02 nT,改善 率为18.06。随后在野外开展了应用飞行测量工作, 效果较好,测量结果满足了航磁规范的要求。

相对于地面磁测技术方法,本系统可以在地形 条件复杂和环境恶劣区域,如茂密森林、沙漠、戈壁 滩、大面积水域等开展航磁测量工作,可以大大减小 勘探人员的工作强度,测量效率高,安全快捷,使用 简单,绿色经济。

无人直升机航磁测量系统作为有人机航磁的有 益补充,提供了一种更加灵活、安全、高效,且成本更 低的航空物探设备。随着勘探仪器数字集成化程度 的不断提高和无人直升机技术的日益成熟,该系统 将有可能在固体矿产勘探、基础地质调查、环境地质 调查等领域发挥更大的作用。

#### 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 aerogeophysical 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 aerogeophysical survey in China since the tenth five year plan and its development trend [J].Geophysical and Geochemical Exploration,2007,31(6):479-484.

- [3] 崔志强,胥值礼,李军峰,等.无人机航空物探技术研究应用现 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 development trend [J].Computer Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration,2016,38 (6):740-745.
- [4] Partner R. GeoRangeraeromagnetic UAV: development to commercial survey [R].Fugro Explore,2006.
- [5] Christopher W L.Autonomous airborne geomagnetic surveying and target identification [EB /OL]. Infotech@ Aerospace, 26 - 29. September 2005, Arlington, Virginia. https://www.aa.washington.

 $edu \ / research / afsl / research / strategic / probabilistic.$ 

- [6] Barnard J.Use of unmanned air vehicles in oil, gas and mineral exploration activities [C]//AUVSI Unmanned Systems North America 2010 Conference, 2010.
- [7] Austin Development Corp.Austin' subsidiary, Universal Wing Geophysics Corp. Completes arctic furvey, accepts mineral exploration contract, plans offshore oil survey test[R].Corporate SEDAR Release, 2005.
- [8] Koyama T, Kaneko T, Ohminato T, et al. An aeromagnetic survey of Shinmoe-dake volcano, Kirishima, Japan, after the 2011 eruption using an unmanned autonomous helicopter [J]. Earth Planets & Space, 2013, 65(6):657-666.
- [9] Hashimoto T, Koyama T, Kaneko T, et al. Aeromagnetic survey using an unmanned autonomous helicopter over Tarumae Volcano, northern Japan[J].Exploration Geophysics,2014,45(1): 37-42.
- [10] 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 development of the integrated UAV magnetic & radiation survey system[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2014,35(4):399-403.
- [11] 李军峰,李文杰,秦绪文,等.新型无人机航磁系统在多宝山矿区的应用试验[J].物探与化探,2014,38(4):846-850.
  Li J F,LI W J,Qin X W,et al.Trial survey of a novel UAV-borne magnetic system in the Duobaoshan ore district [J].Geophysical and Geochemical Exploration,2014,38(4):846-850.
- [12] 崔志强,胥值礼,孟庆敏,等.国内主要航空物探飞行平台特点及发展[J].物探与化探,2014,38(6):1107-1113.
  Cui Z Q,Xu Z L, Meng Q M, et al. The features of the main airborne geophysical flying-platforms in China and the development trend [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2014, 38 (6):1107-1113.
- [13] 卢俊丰,纪福山,杨望,等. AS350B3 飞机航磁测量前支杆方式 仪器安装位置的探讨[J].物探化探计算技术,2014,36(4): 426-430.

Lu J F, JI F S, Yang W, et al. AS350 B3 aircraft in aeromagnetic survey in front support rod installation mode research and practice [J]. Computer Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2014, 36(4):426-430.

[14] 吴文福.16项自动磁补偿系统[J].声学与电子工程,1993(4): 14-30.

Wu W F.16 items of automatic magnetic compensation system [J]. Acoustics and Electrical Engineering, 1993(4):14-30.

- [15] 王婕,郭子祺,刘建英.固定翼无人机航磁探测系统的磁补偿模型分析[J].航空学报,2016,37(11):3435-3443.
  Wang J, Guo Z Q, Liu J Y. Analysis on magnetic compensation model of fixed-wing UAV aeromagnetic detection system [J].Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2016,37(11):3435-3443.
- [16] 刘诗斌.无人机磁航向测量的自动罗差补偿研究[J].航空学报,2007,28(2):411-414.

Liu S B. Study on automatic magnetic deviation compensation of magnetic heading measurement for UAV [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2007, 28(2):411-414.

[17] 李晓禄,蔡文良.运5飞机上航磁梯度测量系统的安装与补偿

[J].物探与化探,2006,30(3):224-228.

Li X L, Cai W L.The assembly and compensation of the aeromagnetic gradient system on the y-5 aircraft [J].Geophysical & Geochemical Exploration, 2006, 30(3); 224 – 228.

[18] 李季,张琦,潘孟春,等.载体干扰磁场补偿办法[J].国防科技 大学学报,2013,35(3):7-11.

Li J, Zhang Q, Pan M C, et al. The vehicle interferential magnetic field compensation method [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2013, 35(3):7–11.

 [19] 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 assess-

ment for digital magnetic compensation and software realization

[J].Geophysical and Geochemical Exploration, 2013, 37(6):1027 – 1030.

[20] 熊盛青,于长春,眭素文,等. 中高山区高精度航磁方法技术
[M]. 北京:地质出版社,2009.
Xiong S Q,Yu C C,Sui S W, et al. High-precision areo-magnetic survey in medium-height mountainous areas [M]. Beijing: Geo-

logical Publishing House, 2009.

[21] AGRS GeoProbe 地球物理数据处理解释系统用户操作手册
 [R].中国地质调查局自然资源航空物探遥感中心,2012.
 AGRS GeoProbe geophysical data processing interpretation system user manual [R]. China Aero Geophysical Survey and Remote Sensing Center, 2012.

#### Unmanned helicopter aeromagnetic measurement system and its application

HUANG Yan<sup>1</sup>, LUO Ding<sup>1</sup>, FENG Zi-Cheng<sup>1</sup>, CHEN Wei<sup>1</sup>, JIAO Jian<sup>2</sup>

(1. Geological Exploration Technology Institute of Jiangsu Province, Nanjing 210049, China; 2. College of Geo-Exploration Science and Technology, Jilin University, Changchun 130061, China)

Abstract: This paper introduces the development and integration of the aeromagnetic measurement system for unmanned helicopters. Through integrated assembly testing for unmanned helicopter flight platform and aeromagnetic survey instrument and its magnetic interference testing and magnetic compensation testing, successfully integrate the aeromagnetic instrument with the unmanned helicopter flight platform to develop an aeromagnetic measurement system for unmanned helicopters. The system has completed flight test and flight application work. Compared with the contour map of previous geomagnetic anomalies in measuring area, the reflected geomagnetic field characteristics in aeromagnetic anomaly contour map obtained in flight application are basically the same which proves the effectiveness of the system. The unmanned helicopter aeromagnetic measurement system provides an efficient, convenient and scientific means of work for small exploration blocks with complex topography and harsh environment which need to be carried out aeromagnetic measurements survey.

Key words: Unmanned helicopter; aeromagnetic measurement system; test and application

(本文编辑:王萌)