

doi:10.11720/wtyht.2014.4.38
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.http://doi.org/10.11720/wtyht.2014.4.38
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.http://doi.org/10.11720/wtyht.2014.4.38

新型无人机航磁系统在多宝山矿区的应用试验

李军峰¹,李文杰¹,秦绪文²,胥值礼¹,刘俊杰¹,孟庆敏¹,李飞¹,刘莹莹¹

(1.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;2.中国地质调查局,北京 100037)

摘 要:通过气动外形、电磁兼容、数据传输、信息处理、传感器结构设计等关键技术攻关,基于彩虹三国产长航时无人平台,集成了一套新型固定翼无人机航空磁测系统,在黑龙江省嫩江县多宝山矿区开展了 1:1 万大比例尺航磁测量试验,验证了全自主飞行、高精度测控、超低空地形跟随、全天候作业等关键性能,介绍了本次试验的结果及与有人机航磁系统的应用效果对比,标志我内首次使用无人机进行面积性高精度航磁测量获得成功。

关键词:无人机;航空磁测;试生产;多宝山矿区

中图分类号: P631.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2014)04-0846-05

近年来,随着无人机技术的不断成熟,鉴于其人员伤亡少、费用低、效率高等特点,以及可预期的高数据准确性、低噪声水平、高空间分辨率的优势,无人机航空磁测系统的研发与应用日益受到世界各航空地球物理公司的广泛关注。英国 Magsurvey 公司于 2003 年研发了 PrionUAV 航空磁测系统,可以携带 1 个铯光泵磁力仪、1 个激光高度计、实时 DGPS 和 1 个 3 轴磁通门磁力仪开展航磁测量^[1]。2004 年,Fugro 公司在 Insitu 公司的协助下,改装了扫描鹰无人机,推出了高精度无人机航空磁力测量系统 Georanger,并于 2005 年在渥太华附近进行了一系列的测试,取得了较好的效果^[2-3]。2005 年,加拿大万能翼地球物理公司的无人机航磁系统在加拿大北极地区开展了油气勘探为目的的多次测量,随后,一家矿产勘探公司应用该系统在温哥华岛进行了 4 000 km 测线的调查^[4]。2009~2012 年,加拿大卡尔顿大学研发了 Geosurv 无人机航磁系统,计划 2013 年开展测量飞行试验^[5]。2012 年,日本发展了多款基于无人直升机平台的航磁系统,应用灵活,特别适用于小区域大比例尺航磁精细测量^[6-7]。

基于无人机航磁测量系统经济、高效、安全的优势,以及在小区域大比例尺航空物探应用领域的广阔前景,受中国地质调查局委托,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)于 2013 年启动了无人机航磁测量系统的研究,在中国航天空气动力技术研究院的协助下,在较短的时间内,突破了无人机改装与系统集成、超低空自主导航及飞行控制、航磁仪远程测控、无人机磁补偿等关键技术难题,成功将 CS-VL 高精度铯光泵磁力仪和 AARC510 航磁数据收录及补偿器搭载于 CH-3 国产无人平台上,集成了一套基于长航时中型无人机的航空磁测系统。

2013 年 9 月,在黑龙江省嫩江县多宝山矿区应用该系统开展了首次面积性生产试验,并取得了成功。本次试验的主要内容包括系统各项技术指标测试、面积性航磁测量和应用效果评价,目的是验证系统的实用性和生产能力,为下一步研发工作提供可靠依据。试验共完成 7 架次的测线飞行,完成测线总长度约 2 980 km。笔者将主要介绍该无人机航磁系统测试试验的情况。

1 新型无人机航磁系统研发

借鉴国外先进无人机航磁系统的功能特点和发展趋势,结合国产无人机平台的发展现状,笔者提出了具备长航时、超低空和高分辨测量能力的无人机航磁系统的研发目标。图 1 是无人机航磁系统的组

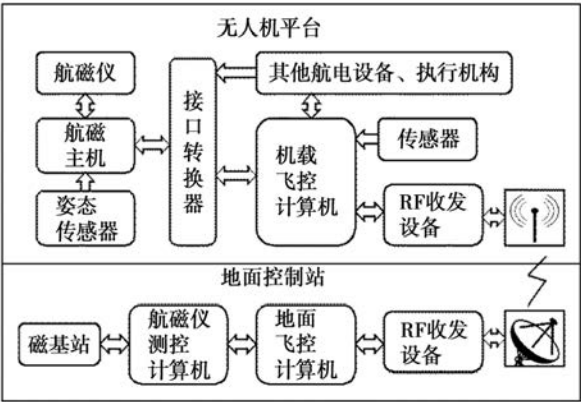


图 1 无人机航磁系统组成框图

成框图,整套系统由集成航磁仪的无人机平台与地面控制站组成,无人机平台和控制站之间使用无线电传输测量数据和控制命令。

无人机平台选用的国产固定翼 CH-3 中型无人机,其主要性能参数参见表 1,与 Geosur II 及 Georanger 无人机相比,是一款有效载荷大且兼顾灵活性的平台,翼展达 8 m,翼尖位置磁场干扰很小,非常适合搭载航磁探头。其满载航时达到 12 h,低空性能好,具备了长航时和超低空飞行的能力。

表 1 CH-3 无人机和国外同类型号无人机的性能对比

无人机平台	Geosurv II	Georanger	CH-3
续航能力/h	4	10	12
航速/(m/s)	30	36	50
翼展/m	4.8	3.1	8.0
机身长度/m	3.8	1.5	4.2
有效载荷/kg	5	7	160
测控范围/km	40	100	40
低空性能/m	50~100	60~80	80~150

航空磁测系统由磁力仪、补偿器、数据收录系统及远程测控系统组成。航空磁力仪选用 CS-VL 高精度铯光泵磁力仪,它是广泛用于有人机航空磁测系统的 CS3 磁力仪的小型化设备,由磁探头、电子仓及一段定制的传输电缆组成,灵敏度达到 0.000 6 nT/(√Hzrms),方向差小于±0.2 nT,绝对精度误差小于 2.5 nT。航磁主机选用 RMS 公司的 AARC510 补偿及收录仪,以实现无人机磁干扰的实时补偿及磁测数据的实时收录。

飞行平台的磁干扰是影响航磁系统高精度测量能力的主要因素。对于有人机航磁系统,可以通过将磁探头等磁敏感部件远离磁干扰源,并结合动态磁干扰补偿方法来抑制飞行平台的磁干扰。对于无人机航磁系统来说,一方面由于无人机体积较小,磁探头很难远离磁性干扰源;另一方面航磁动态磁干扰补偿方法是针对有人机系统设计的,无人机很难完成其规定的机动动作,特别是该方法对补偿操作

流程有较严格的规定,需要人工实时干预。这些问题均增加了无人机磁补偿的难度,需要在系统集成过程中加以解决。

为了实现高精度测量,在系统集成过程中采用了如下技术手段:根据无人机磁干扰分布特点选择磁梯度最小的翼尖来安装磁探头,并对机体和机翼的磁干扰部件进行了弱磁化处理;通过气动计算和仿真模拟优化,设计了探头的安装结构和气动外形,保证其气动稳定性;为了实现对该设备的远程测控,专门研发了接口转换器,同时配套研发了远程测控软件^[8],从而实现了在地面远程监测航磁系统工作状态和测量数据,并实时控制或干预航磁仪的工作模式和状态的功能;最后,为完成无人机磁补偿特别设计了特殊的飞行模式和策略。

图 2 是集成后的 CH-3 无人机航空磁测系统,磁探头安装在机翼翼尖向前伸出的红色探头罩内,电子仓位于机翼中部距翼尖约 1.5 m 处,磁通门传感器安装在机身轴线上,航磁主机(AARC510 及接口转换器)安装在无人机的载荷仓内。



图 2 CH-3 无人机航空磁测系统

2 应用试验

2.1 试验区概况

多宝山试验区距嫩江县航空护林站机场 102 km,位于黑龙江省黑河市嫩江县多宝山镇北部,大兴安岭与小兴安岭交汇部位,设计面积 200 km²。该试验区属低山丘陵浅切割区,地形最大落差约 130 m。试验区内的地球物理调查始于 20 世纪 50 年代,70 年代完成了的 1:20 万航磁测量,2011 年该区使用 Y-12 固定翼飞机开展了 1:5 万的航磁测量,本次试验在该区开展 1:1 万航磁测量。

2.2 测量工作简介

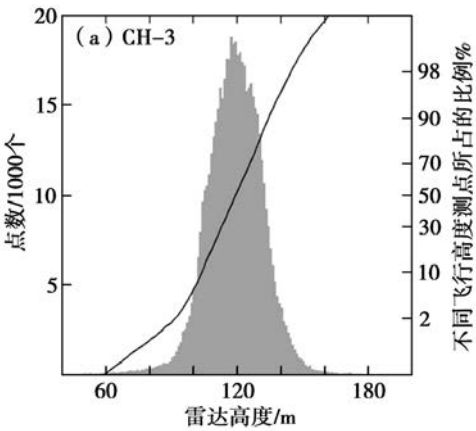
由于机场与测区距离超出无人机的通视距离,本次试验分别在机场和测区布置了地面测控站,通过接力方式实现对无人机的全程无障碍测控。测线

规划充分考虑了小区域地质构造的走向对航磁测量的影响,主测线方向选为 130°。

本次试验总计飞行 5 d,7 架次,40 h,开展了 180 m 航高 1:1 万航磁测量和 120 m 航高 1:5 万航磁测量,总计完成 2 980 km 有效测线里程,考虑到机场距试验区有 100 km,此次试验充分验证了该系统的高效性。单架次最长航时达 7.5 h,单日最大航时 13 h,验证了长航时能力。系统经受了四五级风、阵雨等天气的考验,4 架次在夜间起飞、测量或降落,表明该系统初步具备了全天候测量的能力。

2.3 飞行质量统计

CH-3 无人机采用高精度差分 GPS 导航,风速 5 m/s 时测控精度达到±5 m。本次测量的偏航距均方差为 10.8 m。在所有测点中,偏航距小于 10 m 的测点数占 82.98%,小于 20 m 的占 94.31%,优于航磁技术规范^[9] 33 m 的指标。



飞行高度控制方面,CH-3 无人机首次采用了最新研发的地形跟随技术,取得了较好的应用效果。以 1:5 万比例尺测量为例,高度控制参数为 120 m,实测数据的平均飞行高度为 120.2 m。图 3 比较了 CH-3 无人机和 Y-12 固定翼飞机的雷达高度统计数据,与 Y-12 飞机依地形起伏飞行测量的结果类似,无人机的高度数据以控制高度为中心呈正态分布,正负偏差基本对称,高度控制效果优于飞行员控制的有人机。

2.4 磁测数据质量

航磁数据的质量主要基于磁补偿标定结果的优劣,由补偿后标准差、水平方向差、动态噪声水平及磁测总精度等指标来评定。CH-3 无人机航磁系统补偿后标准差为 0.054 nT,优于航磁技术规范要求的 0.08 nT;最大方向差 0.9 nT,满足高精度磁测的要求;1:1 万测量各架次的动态噪声分别为:53.07、

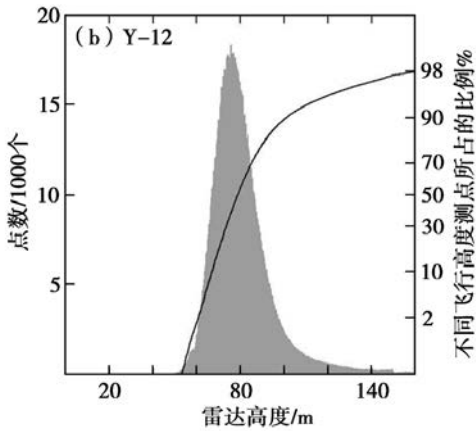
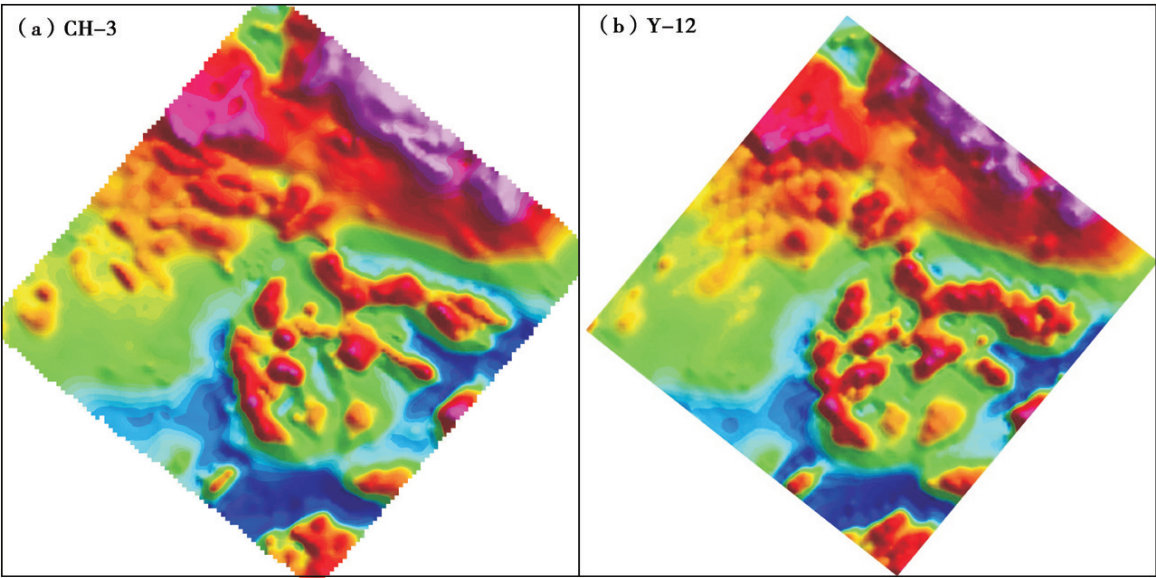


图 3 CH-3 无人机(a)和 Y-12 固定翼飞机(b)的飞行高度统计



航磁 ΔT 异常值由紫红色—红色—黄色—绿色—蓝色依次降低

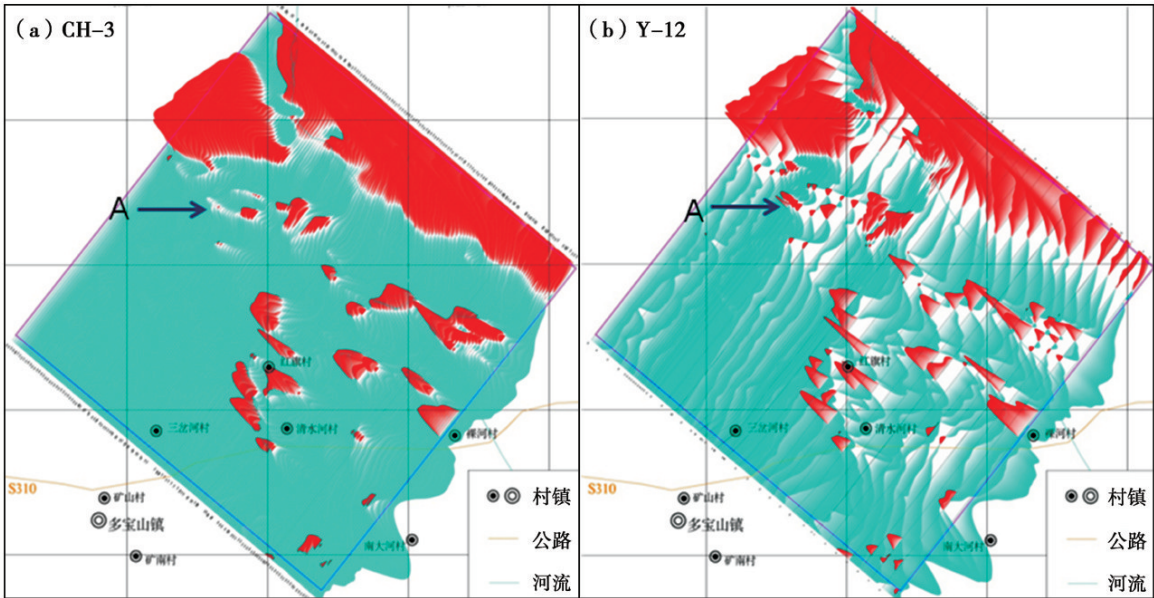
图 4 航磁 ΔT 等值线阴影

59.28、62.33、39.23、30.45 pT,全部达到一级水平,后两架次为夜航,数据质量提高明显,未经任何处理的原始磁测数据的总精度就达到了 2.5 nT 的水平。图 4 对比了 CH-3 无人机航磁系统和 Y-12 固定翼飞机磁测系统在该实验区获得的航磁 ΔT 等值线阴影图。可以看出图 4a 不存在图 4b 中明显的条带状分

布,表明 CH-3 无人机航磁系统具有较高的测量精度和系统稳定性。

2.5 不同比例尺应用效果对比

对两种比例尺的航磁数据进行了室内常规处理,包括磁日变校正、正常场校正、调平等处理,得到了试验区的航磁 ΔT 平面等值线图。图 5 对比了不



红色为正磁场,蓝色为负磁场
图 5 不同比例尺航磁 ΔT 剖面平面

同比率尺测量获得的航磁 ΔT 平面等值线图,二者的异常分布大致相同,但大比例尺测量获得的异常形态和结构更加完成、细致。两图中 A 箭头指示的部分采用同样的比例尺进行测量(测线间距相同),可见低飞行高度对应的异常更加清晰。因此,进行大比例尺高精度磁测,不仅要求测线间距小,还要求

飞行高度低。通常,高分辨磁测的飞行高度和测线间距相等。

2.6 无人机与有人机的航磁 ΔT 对比

图 6 对比了同一区域无人机和有人机航磁测量的数据,它们的 ΔT 分布大致相同,具有较好的可比性,在局部磁异常上存在一些细微的差别。例如:

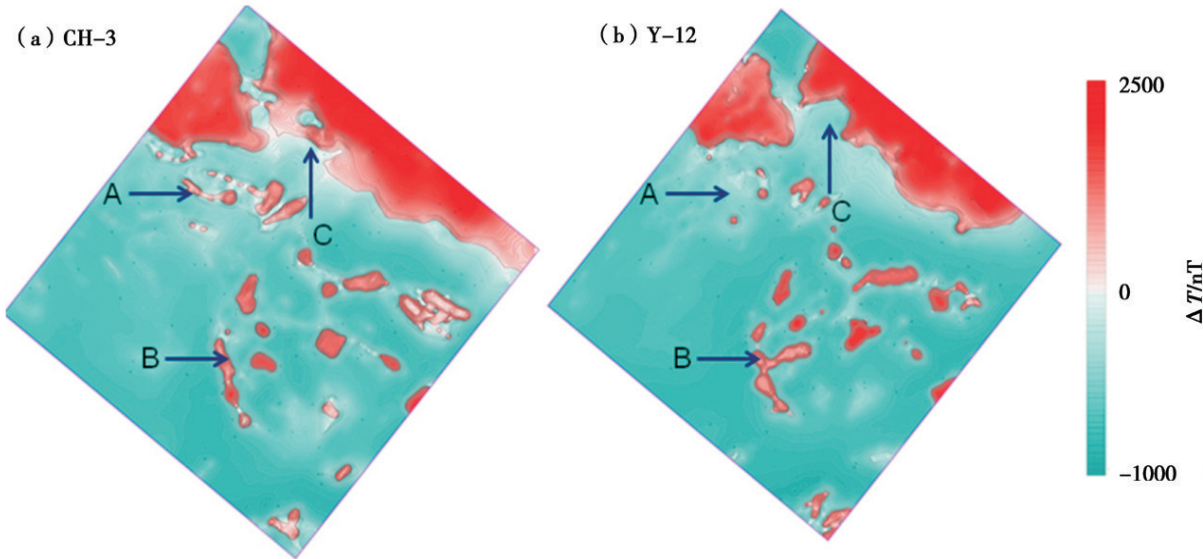


图 6 无人机和有人机航磁 ΔT 等值线平面的对比

图 6a 中 A 和 C 处的异常在图 6b 中对应的位置未能发现或不清晰,相反,图 6b 中的 B 处异常在图 6a 中又没有反映。经初步分析认为这是由于二者的测线方向不一致造成的。在测线方向垂直于异常走向的情况下,对异常形态的反映较清晰。根据测区地质构造合理选择主测线方向对于高分辨磁测是非常重要的,因此灵活性更好的无人机航磁系统在小区域大比例尺磁测应用中具有优势。

3 结语

我国自主研发的无人机航空磁测系统具有创新设计的气动布局及气动外形,配备有航空物探专用飞控子系统、航磁仪远程测控子系统及三维航迹规划子系统,能够全自主起降、超低空依地形起伏飞行测量,是我国首套具备长航时、超低空、高精度磁测能力的无人机航空磁测系统。

该系统在国内首次成功开展了面积性的无人机航磁试生产试验。试验结果表明,该系统具有较好的地形和气候适应性。能够在丘陵和低山地形条件下开展低空飞行测量工作;可以在 8 m/s 侧风条件下顺利起降;基于全自主起降技术,首次成功实现了航空物探技术的夜间作业,极大程度地提高了飞行效率和数据质量,降低了飞行成本。该系统的飞行控制精度及地形跟踪能力明显优于有人机系统,为高质量航空物探数据的获取提供了可靠保障。基于无人机磁测获得的成果图件与有人机航磁相比具有较好的一致性,磁测总精度优于有人机系统,微弱异常的细节更加清晰连贯,凸显了应用无人机系统开展高精度大比例尺勘查的优点。

作为有人机航空物探系统的有益补充,最新研发的 CH-3 无人机航磁系统将为促进找矿突破战略行动提供了一种更加安全、高效、灵活,且运营成本更低的航空物探装备,特别适用于小区域大比例尺高精度航空磁法测量。在此基础上,通过卫星通信、集群控制等关键技术的研发与应用,该系统将有可能在大规模航磁普查方面发挥更大的作用。

参考文献:

- [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):1-8.
- [2] Christopher W Lum. Autonomous airborne geomagnetic surveying and target Identification, Infotech@ Aerospace[R].Arlington, Virginia, 2005;26-29.
- [3] Partner R.GeoRanger aeromagnetic UAV: development to commercial survey[R].Fugro Explore, 2006..
- [4] Austin Development Corp. Austin's subsidiary, Universal Wing Geophysics Corp completes Arctic survey, accepts mineral exploration contract, plans offshore oil survey test[R].Corporate SEDAR Release, 2005.
- [5] Prof Jeremy Laliberte, Carleton University Fixed Wing UAV Project [EB/OL].04_FW_UAV_Project_Summary_and_Introduction_26Feb13pptx.pdf, from <http://uav.mae.carleton.ca>.
- [6] Hitoshi Morikawa, Satoshi Tokue, A Development of Airborne Survey of Gravity and Magnetism on an Unmanned Helicopter and Its Data Processing[C]//Japan Geoscience Meeting,2013.
- [7] Shinya Sakanaka, Minoru Funaki, etc. Aeromagnetic survey by a small unmanned airplane over northern part of Deception Island [C]// Japan Geoscience Meeting,2013.
- [8] 李军峰,无人机航磁遥测系统的设计与实现[C]//中国地质学会 2013 学术年会论文摘要汇编,2013.
- [9] 航 DZ/T0142-2010 空磁测技术规范[S].中华人民共和国国土资源部,2010.

Trial survey of a novel UAV-borne magnetic system in the Duobaoshan ore district

LI Jun-Feng¹, LI Wen-Jie¹, QIN Xu-Wen², XU Zhi-Li¹, LIU Jun-Jie¹, MENG Qing-Min¹, LI Fei¹, LIU Ying-Ying¹
(1. Institute of Geophysical and Geochemical Exploration, CAGS, Langfang 065000, China; 2. China Geological Survey, Ministry of Land and Resources, Beijing 100037, China)

Abstract: A UAV-borne magnetic field trial survey was carried out in the Duobaoshan ore district, Heilongjiang Province, by using a novel fixed-wing UAV-borne magnetic system developed by IGGE. It is for the first time that a commercial trial survey by a UAV-borne magnetic system is reported in China. The field data quality, including dynamic magnetic noise and flight quality, accords well with the survey standard of the manned airborne magnetic survey. The advantages of UAV-borne survey, such as fully autonomous flight, precisely-controlled flight quality, longer survey range, low flight clearance and all-weather operational capability, have been achieved. It will be a practical technique for the geophysical exploration.

Key words: unmanned aerial vehicle (UAV); airborne magnetic survey; trial survey; the Duobaoshan ore district

作者简介: 李军峰(1972-),男,高级工程师,主要从事航空电磁法仪器系统研发及应用研究。