

doi: 10.11720/wyht.2016.6.13

王波,贾学天,刘建生,等.基于无人飞艇平台的航磁系统试验与应用[J].物探与化探,2016,40(6):1138-1143.http://doi.org/10.11720/wyht.2016.6.13

Wang B, Jia X T, Liu J S, et al. The trial and application of the aeromagnetic system based on unmanned blimp platform[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2016, 40(6): 1138-1143. http://doi.org/10.11720/wyht.2016.6.13

基于无人飞艇平台的航磁系统试验与应用

王波, 贾学天, 刘建生, 赵国凤, 孙希莹, 陆殿梅

(江苏省地质勘查技术院, 江苏 南京 210049)

摘要:介绍了艇载航磁系统的研制与集成,采用的飞行平台为无人飞艇,配备有优秀的飞控导航系统和高精度航空磁测系统,可实现无人驾驶、三维自主导航沿设计测线飞行。该系统分别完成了飞行试验与实际应用工作,测量成果与测区内以往航磁成果进行对比,结果显示其反映的地磁场特征形态基本一致,验证了系统的有效性;因工作比例尺与飞行参数不同,本次航磁异常等值线在细节上表现更为细致,弱磁异常表现更为清晰。在实际生产应用中,本系统为一些地面勘查难度大,范围小的区域进行航磁测量等提供了一种快速、高效的工作手段。

关键词:无人飞艇;航磁系统;试验与应用

中图分类号: P631

文献标识码: A

文章编号: 1000-8918(2016)06-1138-06

随着国内勘查工作的发展,矿产勘查主要趋向于两大主要方向,一是尚未勘查或工作程度较低的地区,这些区域大多地形较为复杂,如森林、沼泽、海洋等,勘查难度较大。二是在已知成矿带外围或深部继续探测,较小范围内深入研究,攻深找盲。磁法勘探在矿产资源勘查过程中起着重要的作用,尤其在当前以地勘单位为主体的找矿工作中,地面磁测是主要的勘查手段。但由于现阶段可勘查区域地形复杂难以通行加大了工作难度,同时城镇化进程快而造成干扰大;而传统航磁测量成本较高,不适用于较小范围内展开。国内部分地勘单位纷纷寻求在小范围大比例尺、地形复杂、地面施工困难的地区开展新的勘查手段。

随着无人机技术的成熟,无人机航磁测量系统也快速发展。基于无人机航磁测量系统具有小型化、智能化、重量轻、尺寸小等特点,其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,如 Fugro 公司 Georanger 高精度无人机航空磁力测量系统、加拿大 Universal Wing 航空地球物理公司的 UAV 航磁系统、英国 Magsurvey 公司的 Prion UAV 航空磁梯度测系统等^[1-7]。国内的中国国土资源航空物探遥感中心、中国地质科学院及中国科学院遥

感与数字地球研究所、中船重工第七一五研究所等单位也先后开展了基于固定翼或直升机无人机航磁测量技术的研究工作,并取得了很好的成果,如基于国产彩虹 3 无人机的航空物探(磁/放)综合站^[8-10]。部分省级地勘单位也通过改进飞行平台,应用轻型或无人驾驶飞行器搭载航磁仪拓展工作方法。笔者采用无人驾驶飞艇搭载航磁仪集成研发了艇载航磁系统,无人飞艇具有低空低速、稳定便捷、耐久安全等特点,无跑道要求,可夜间飞行,维护维修简单,适合于搭载轻便型航空测量仪器进行野外工作。2011 年本系统成功试验飞行,现已在平原、丘陵和中低山地区的地形条件下开展过航磁测量,取得了较好的勘查效果。

1 系统研发

在对各种类型的轻型飞行器、无人飞行平台的性能与特点进行充分调研的基础上,结合当前航磁测量的工作定位,自主研制了艇载航磁系统。系统主要包括无人飞艇平台和航磁系统两部分,飞艇在空中飞行与地面控制使用无线电传输和控制命令,系统组成框图见图 1。

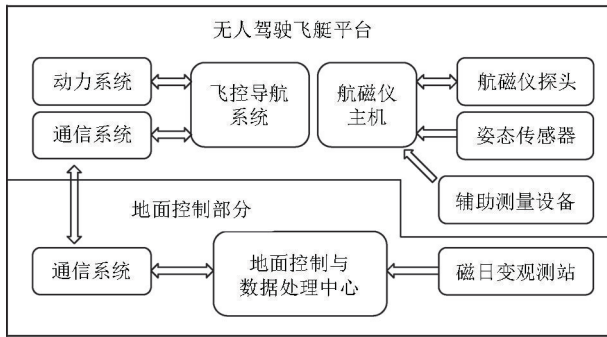


图1 艇载航磁系统组成

1.1 飞行平台

飞艇属于轻于空气的飞行器,靠空气浮力升空,通过配置的动力装置实现飞行和操控^[1]。本次采用的无人驾驶飞艇主要有艇囊、尾翼和吊舱几部分组成,续航时间2~4 h,飞行速度50 km/h,相对飞行高度在50~300 m之间,海拔飞行高度可达4 km,技术指标见表1,该飞行平台具有以下特点:

1) 控制系统采用神经元自适应飞控导航系统,具备目测遥控、超视距实时控制和预编程自主机动飞行功能,可以根据作业要求设置飞行航线和任务指令。

2) 自动驾驶系统投入生产使用前进行了抗风试验,风速小于5 m/s时满足飞艇平稳飞行,最大抗风能力小于12 m/s。

3) 通信系统使用无线电传输和控制。飞艇飞行过程中的系统方位、姿态、速度、电量等数据和搭载的任务设备数据信号经链路传至地面站,可实现对平台和任务载荷的远程监控。

4) 采用油电混合动力系统,在电池缺电或断电的情况下汽油发动可发挥作用,而在没油或发动机出现故障时电动机则会发挥作用。

5) 艇囊主要由有聚酯材料制作,内部充满氦气。氦气属于惰性气体,具有很高的安全性,同时产生大量升力,抵消了绝大部分飞艇自重,载重能力相对较大。

表1 飞艇主要技术指标

参数	指标
艇长/m	12.0
艇宽/m	3.9
艇高/m	4.2
气囊体积/m ³	77
有效载荷/kg	13
续航时间/h	2~4
巡航速度/(m/s)	13~21
相对飞行高度/m	50~300

1.2 航空磁测仪器

本项目采用RS-HGB-10型氦光泵航磁系统,系统主要由微型光泵探头、信号处理机、自动补偿器和采集收录软件组成。该系统显示分辨率为0.001 nT,静态噪声小于0.01 nT,航磁仪测量范围为35 000~70 000 nT,灵敏度优于0.01 nT,采样率可设为1~10次/s,工作温度为0℃~50℃。此系统可实时采集地磁场总场数据、矢量磁力仪的地磁三分量数据、GPS的飞机实时位置数据等,实时对飞机产生的磁干扰进行补偿,并存储采集到的所有数据^[12]。

1.3 系统集成

为了减少飞行平台的磁干扰,实现高精度测量,飞艇中除关键部件外,其余各组件均采用无磁或弱磁材料,使航磁测量系统在最小的电磁干扰下,完成数据的采集工作。在飞艇的艇身腹部区域专门设计航磁测量系统固定工作平台(即固定箱),封装了航磁主机、电源等部分。固定箱的前侧设有长3.5 m碳纤维探杆,探杆一端封装磁通门三分量传感器和航磁仪探头,使其远离发动机的影响。飞艇吊舱、航磁固定箱、探杆均通过绳索与艇囊进行固定,图2是集成后的艇载航磁系统^[13-14]。

2 磁干扰及其消除

飞行平台的磁干扰是影响高精度航磁测量的主要因素,为了提高磁力仪的测量精度,在航磁系统集成的过程中需要飞行平台本身磁干扰较小,并尽可能



图2 艇载航磁系统

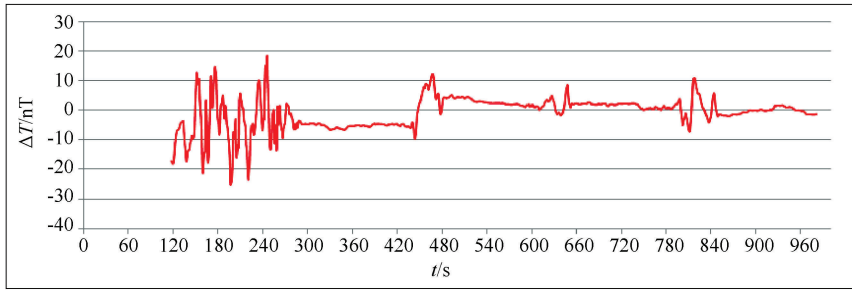


图3 发动机未工作时探头与吊舱之间距离变化对探头的影响曲线

能的去除产生磁干扰的影响。

2.1 磁干扰类型与消除

通常认为飞行平台磁干扰的来源主要包括恒定磁场、感应磁场和涡流磁场 3 个方面。恒定磁场是由飞行平台上的铁磁性物质的剩磁引起的,感应磁场是由飞行平台上的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飞行平台的机身、机翼、起落架等大的金属片或金属壳等切割地磁场产生的^[15-18]。

无人飞艇航磁系统的制作材料大部分均为非磁性物质或使用复合材料代替磁性物质。首先系统内体积最大的艇囊部分是由无磁的聚酯材料组成;尾翼与吊舱及其内部结构采用了大量无磁的碳纤维、凯夫拉等复合材料,使得结构轻盈、强度较高;动立杆、起落架等是采用航空铝合金材料。由于无人飞艇的艇身、尾翼等为无磁材料制作,不存在因自身动作而切割地磁场产生的涡流磁场。综上所述,无人飞艇飞行平台的磁干扰主要来源于发动机内部的一些零部件。为了减少这部分磁干扰,通过碳纤维探杆使得航磁仪探头远离发动机的影响。

2.2 磁干扰试验

在发动机关闭时,改变探头与吊舱之间的距离,分别为 2.7、3、3.5、4、4.5 m,每个距离点采样读数 2 min 左右,试验曲线见图 3。根据试验结果分别对不同距离位置时的磁场值变化进行了统计,结果见表 2。探头与吊舱之间距离为 2.7 m 时,磁场值变化范围为 39.8 nT,由图 3 可见曲线跳动较为剧烈。当两者之间距离大于 3 m 时,磁场值的变化范围与静态噪声迅速变小,曲线形态表现较为平稳,变化范围在 2.2~4.1 nT 之间。因此,距离大于 3 m 即可使得吊舱内磁性物质对探头测量数据的影响最小。

当发动机开始工作时,在 2.7 m 处最初的 1 min 内磁场值变化范围较大;发动机稳定工作时(60~130 s),磁场值变化范围为 9.6 nT 左右。改变探头与吊舱之间的距离为 4.5 m 时(采样时间为 150~

表 2 发动机关闭时探头与吊舱之间距离变化对探头的影响

距离/m	时间范围/s	变化范围/nT
2.7	120~240	39.8
3	300~420	2.2
3.5	490~600	4.1
4	660~780	2.6
4.5	850~970	3.8

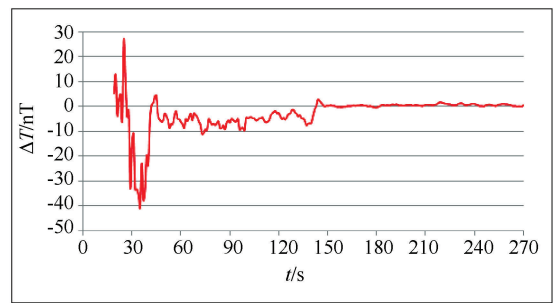


图4 发动机工作时探头与吊舱之间距离变化对探头的影响曲线

270 s), 磁场值变化范围为 2.1 nT 左右(图 4)。

结合试验结果,最终确定探头与吊舱之间的距离为 3.5 m。在此距离上通过安装吊舱(包含发动机),将前后磁场值大小对比,测试飞艇吊舱对次探头测量数据的影响。未安装吊舱时,磁场值为 49 479.3 nT;安装吊舱,发动机未工作时,磁场值为 49 482.2、49 480.9、49 481.2 nT,吊舱对探头影响约为 1.6~2.9 nT;发动机工作,探头位置固定,测得的磁场值为 49 481.6 nT,与发动机未发动时磁场值水平基本一致。由此可知无论发动机工作与否,吊舱整体对探头的影响很小,约为 3 nT。

2.3 磁补偿试验

由于飞艇飞行动作与有人驾驶飞机或直升机的飞行动作有很大差别,在空中进行补偿动作时不易操作。在经过多番讨论分析与试验后,采用在地面人为做动作,控制其飞行姿态。

补偿试验工作选择在磁梯度小、平稳磁场区域,同时进行日变观测。试验过程中以探头位置为中心

点,保持探头位置不动。采用无磁物质如木架制作补偿专用支架来固定和架设吊舱部分,支架具有一定活动空间,可满足各项动作要求且可围绕探头做旋转。根据需要补偿的磁干扰类型分成两步进行。首先求取方向差,即探头位置固定,360°旋转艇身或吊舱,同时记录磁场值和日变磁场值;然后求取机动磁干扰大小,探头位置固定,旋转艇身或吊舱,依次在0°、90°、180°、270°4个方向进行机动动作。每个方向分别进行3次摇摆动作,动作幅度一般为 $\pm 6^\circ$ 左右。做完试验后求出补偿系数,并重复上述动作进行验证。

根据补偿结果(图5)可知,飞艇系统实测的方向差磁干扰补偿前360°方向差为3 nT,补偿后的飞艇方向差为1.2 nT。由于无人飞艇系统整体产生的磁干扰较小,且飞艇在空中飞行时动作变化幅度较小,由不同动作引起的磁干扰均小于1 nT。因此,在进行机动动作补偿时,可通过近似摇摆动作的峰峰值来评价补偿结果。图6为3个周期的摇摆动作补偿前后曲线,由此可得补偿前摇摆机动磁干扰最大为0.228 nT,补偿后摇摆机动动作干扰最大为0.086 nT。

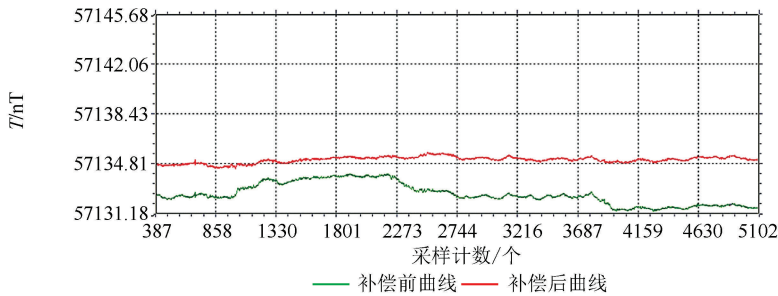


图5 方向差补偿前后曲线

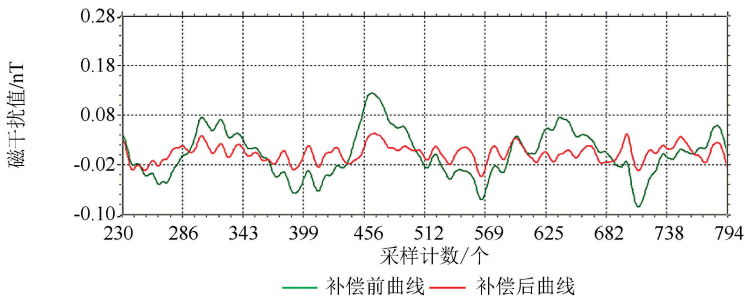


图6 摇摆动作磁干扰补偿前后曲线

补偿结果主要通过品质因子 FOM (figure of merit) 来进行评价,即通过4个方向上进行摇摆、俯仰、偏航的动作求得的12个峰峰值的总和。根据飞艇磁性分析和实测数据分析,无人飞艇磁干扰补偿前的FOM最大为2.74 nT,补偿后的FOM最大为1.03 nT,改善比为2.66。

综上所述,无人飞艇系统除少数零部件外均为无磁材料,同时通过探杆使得探头远离干扰源,尽量消除了飞行平台本身的磁干扰,且实测磁干扰很小,大约在3 nT左右。因此,认为本套系统在不补偿的情况下也满足一定比例尺的工作要求。

3 系统应用效果

2014年应用本系统在黑龙江省某测区开展了应用飞行测量工作。测区位于大兴安岭与小兴安岭

交汇部位,区内属低山丘陵浅切割区,平均海拔300~500 m。2011年使用Y-12固定翼飞机在本区开展了1:5万航磁测量,本次艇载航磁测量工作比例尺为1:1万。

根据已有的地质、航磁资料,结合主测线方向需垂直于区内主要地质构造走向的原则,本次工作布置主测线方向为北东—南西向,飞行方向角为37°~217°,主测线距100 m。起降坪选取测区内较为平坦的一处空地。

2014年完成测量面积209 km²,有效总飞行公里数为2020 km,主测线千米数为1950.1 km。根据研究区内基本气候情况,结合飞艇的工作特性,其中76%的工作量为夜间飞行测量,表明该系统具有夜航能力,可开展全天候测量。

本次测量的测网疏密度为100±8.9 m,偏航距在

20 m 范围内的采样点占 93.4%, 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, 实飞平均飞行高度为 119 m, 在 80 ~ 140 m 范围内的采样点占 80%, 以平均飞高为中心呈正态分布; 本次测量各测线的动态噪声水平最小为 0.015 nT, 最大为 0.135 nT, 依据规范中的分级标准均为一二级水平。航空磁测总精度通过计算控制线与测线交点上磁场差值之均方差来衡量, 96% 的交叉点参与计算的调平前总精度为 ± 4.42 nT, 调平后总精度

为 0.6 nT。数据处理与质量统计采用了中国国土资源航空物探遥感中心的 Geoprobe2.0 软件, 计算结果满足设计与规范要求^[19-21]。

将本次获得的成果与以往 1:5 万航磁成果进行对比(图 7), 主体异常所在位置、分布范围是一致的, 在细节上表现更为细致, 证明系统工作效果好。因两次航磁工作比例尺、飞行方向等参数的不同, 在对磁异常细节方面的表现也是有区别的。

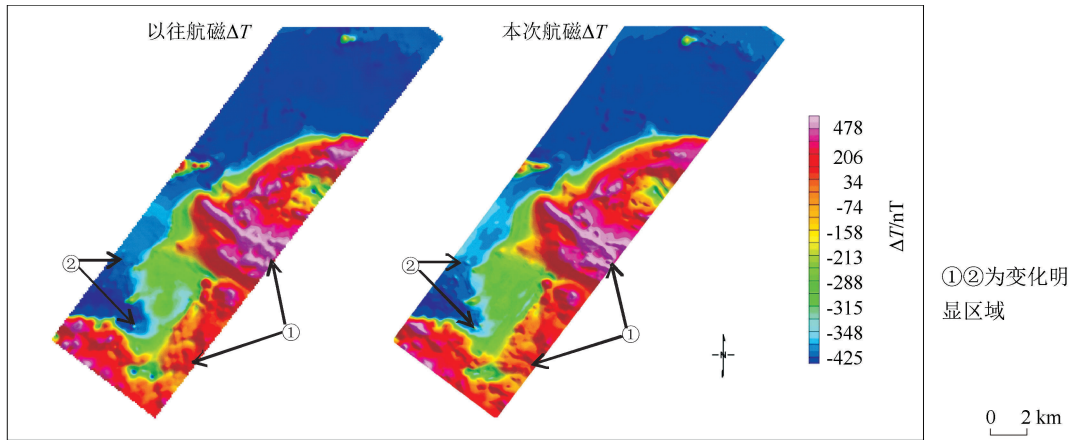


图 7 测区 1:5 万航磁与本次航磁 ΔT 等值线平面对比

4 结论

艇载航磁系统创新的将无人驾驶飞艇应用到航磁测量领域, 为地质调查、矿产勘探等提供了更为高效的工作手段。该系统目前主要应用在地势起伏不大的区域, 所获数据精度高、数据密度大, 且不受地面状况对布点的影响, 缩短勘查项目运行时间; 其配备有优秀的飞控导航系统, 空中可实现 GPS 三维全自主导航飞行, 并通过地面站实时监控, 保证系统飞行安全; 应用系统测量时会按预先航迹进行自主飞行, 工作人员只需进行地面实时监控, 工作任务轻; 当遇到工作环境恶劣的区域, 如原始森林、沙漠、大面积水域等环境可直接减少工作人员的劳动强度, 降低了人员的工作风险, 保障人员安全; 该系统相对于固定翼、直升机等具有低技术性, 组装简便, 利于维护和维修; 在天气条件允许的情况下, 该系统白天、夜间均工作, 可开展全天候测量, 提高了工作效率。由于艇载航磁测量所需时间相对地磁测量时间要少得多, 系统应用在大比例尺、范围较小的区域内效率大大提高, 无人驾驶亦提高作业人员安全性, 特别是在地面勘查难度大的地区不失为一种快速、高效的工作手段, 弥补了地面磁测和航空磁测之间的

工作空白, 具有很大的发展空间和应用前景。

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] Partner R. GeoRangeraeromagnetic UAV; development to commercial survey [R]. Fugro Explore, 2006.
- [3] Christopher W. Lum. 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>.
- [4] Barnard J. Use of unmanned air vehicles in oil, gas and mineral exploration activities [R]. AUVSI Unmanned Systems North America 2010 Conference, 2010.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] THashimoto, TKoyama, T Kaneko, et al. Aeromagnetic survey using an unmanned autonomous helicopter over Tarumae Volcano, northern Japan[J]. Exploration Geophysics, 2014, 45(1): 37-42.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 崔志强, 胥值礼, 孟庆敏. 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.
- [11] 甘晓华, 郭颖. 飞艇技术概论[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005.
- [12] GB-10 航磁测量系统使用手册[R]. 杭州瑞声海洋仪器有限公司, 2007.
- [13] 江苏省地质勘查技术院. 搭载在飞艇平台上的航磁测量系统[P]. 中国专利, 201120213024.7, 2012-02-01.
- [14] 江苏省地质勘查技术院. 一种封装航磁测量探头系统的碳纤维管[P]. 中国专利, 201120213025.1, 2012-02-01.
- [15] 吴文福. 16 项自动磁补偿系统[J]. 声学及电子工程, 1993(4): 14-30.
- [16] 李晓祿, 蔡文良. 运五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.
- [17] 刘晓杰. 航磁补偿技术研究[D]. 长春: 吉林大学, 2009.
- [18] 赵双求. UAV 航磁系统及补偿研究[D]. 长沙: 中南大学, 2011.
- [19] 熊盛青. 中高山区高精度航磁方法技术[M]. 北京: 地质出版社, 2009.
- [20] DZ/T 0142-2010 航空磁测技术规范[S]. 中华人民共和国国土资源部, 2010.
- [21] AGRS GeoProbe 地球物理数据处理解释系统用户操作手册[R]. 中国国土资源航空物探遥感中心, 2012.
- [22] 张永军. 无人驾驶飞艇低空遥感影像的几何处理[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2009, 34(3): 284-288.
- [23] 稽艳鞠, 王远, 徐江, 等. 无人飞艇长导线源时域地空电磁勘探系统及其应用[J]. 地球物理学报, 2013, 56(11): 3640-3650.
- [24] 刘明军, 林宗坚, 苏国中. 无人飞艇低空航测系统在 1:500 大比例尺地形图航测中的应用[J]. 遥感信息, 2013, 28(4): 69-74.

The trial and application of the aeromagnetic system based on unmanned blimp platform

WANG Bo, JIA Xue-Tian, LIU Jian-Sheng, ZHAO Guo-Feng, SUN Xi-Ying, LU Dian-Mei

(Geological Exploration Technology Institute of Jiangsu Province, Nanjing 210049, China)

Abstract: This paper introduces the development and integration of Unmanned Blimp Aeromagnetic Acquisition System (UBAS). UBAS's platform is an unmanned blimp, which is equipped with excellent flight control, navigation system and high-precision aeromagnetic survey system. So it can implement unmanned operation, three-dimensional autonomous navigation along the designed flight route. Trial and practical application was carried out for UBAS. A comparison with aeromagnetic survey data completed in the past shows highly similar characteristics in the anomaly contour maps, which verifies the effectiveness of the system. The authors also used different scales and flight parameters in this project, and it is shown that UBAS's results highlighted more weak magnetic anomalies and details. UBAS provides a quick and efficient method for difficult exploration on the ground and small area of aeromagnetic survey.

Key words: unmanned blimp; aeromagnetic system; trial and application

作者简介: 王波(1973-), 男, 研究员级高级工程师, 主要从事地质勘查与信息技术的集成研究工作。