

引文格式:刘双,胡祥云,郭宁,等.无人机航磁测量技术综述[J].武汉大学学报(信息科学版),2023,48(6):823-840.DOI:10.13203/j.whugis20220623



Citation: LIU Shuang, HU Xiangyun, GUO Ning, et al. Overview on UAV Aeromagnetic Survey Technology[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2023, 48(6):823-840. DOI:10.13203/j.whugis20220623

无人机航磁测量技术综述

刘双¹ 胡祥云¹ 郭宁¹ 蔡红柱¹ 张恒磊¹ 李永涛¹

¹ 中国地质大学(武汉)地球物理与空间信息学院,湖北 武汉,430074

摘要:无人机(unmanned aerial vehicle, UAV)航磁测作为一种高效便捷、成本低廉的地球物理方法已广泛应用于地质调查、矿产资源探测、工程勘察等领域。首先概括了无人机航磁测量系统近二十年的历史进程,介绍了国内外无人机航磁测量装备的研发进展以及应用情况,比较了三类主要无人机飞行平台的优缺点及其在航空磁测领域的应用场景,对无人机航空磁力仪的类型和特点进行了分析。其次,详细阐述了航空磁测的干扰问题,对航磁补偿原理进行了数学描述,探讨了多种航空磁测补偿方法的应用实例,总结了无人机电磁干扰的特性和相关的抑制方法,指出了在传统磁补偿的基础上进一步改善无人机航空磁测精度的相关途径。最后,介绍了无人机航磁测量技术相关的典型应用案例,对无人机航磁测量技术的优势与不足进行了总结,同时对无人机航磁测量技术的下一步挑战与发展提出了展望。

关键词:无人机;航空磁测;磁补偿;电磁干扰

中图分类号:P237

文献标识码:A

收稿日期:2022-09-23

DOI:10.13203/j.whugis20220623

文章编号:1671-8860(2023)06-0823-18

Overview on UAV Aeromagnetic Survey Technology

LIU Shuang¹ HU Xiangyun¹ GUO Ning¹ CAI Hongzhu¹ ZHANG Henglei¹ LI Yongtao¹

¹ School of Geophysics and Geomatics, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China

Abstract: Unmanned aerial vehicle (UAV) aeromagnetic measurement, as an efficient, convenient and low-cost geophysical exploration method, has been widely used in geological survey, mineral resources exploration, and engineering prospecting. First, we outline the historical process of UAV aeromagnetic measurement systems in the past two decades. The domestic and international progress of research and development, and the application of UAV aeromagnetic measurement are summarized. We compare the advantages and disadvantages of three main types of UAV flight platforms and their application scenarios in the field of aeromagnetic measurement. The types and characteristics of UAV aerial magnetometers are analyzed. Second, we carefully discuss the interference problem of aeromagnetic measurement. The principle of aeromagnetic compensation is mathematically described. The applications of various aeromagnetic measurement compensation methods are discussed. The characteristics of UAV electromagnetic interference and related suppression methods are summarized. The relevant ways to further improve the accuracy of UAV aeromagnetic measurement on the basis of traditional magnetic compensation are pointed out. Finally, the typical application cases of UAV aeromagnetic measurement technology are shown and the challenges and developments of UAV aeromagnetic measurement technology are foreseen.

Key words: unmanned aerial vehicle (UAV); aeromagnetic survey; magnetic compensation; electromagnetic interference

航空磁测是一种快速、高效的地球物理勘探方法,它在大面积的金属矿产普查、地质填图、地

球内部结构探测、油气勘查、区域地质调查、工程地质调查等领域发挥着重要作用^[1-3]。但传统的

基金项目:国家自然科学基金(U1812402)。

第一作者:刘双,博士,教授,主要研究方向为重磁勘探。lius@cug.edu.cn

通讯作者:胡祥云,博士,教授。xyhu@cug.edu.cn

有人驾驶飞机用于航空磁测存在一些局限,主要有以下几个方面,第一,大型航空磁测系统需要严苛的飞行场地和全面的后勤保障,由此产生了高昂的人力和物力成本;第二,较高的飞行高度制约了磁力仪获取地下磁性体详细信息的能力^[4];第三,由于机动性能的不足和驾驶员的安全问题,大型飞行器无法在山地等复杂环境开展低空勘探工作。

无人机(unmanned aerial vehicle, UAV)是一种利用无线电远程遥控或者自主导航飞行的无人驾驶飞行器。搭载遥感或者物探设备的无人机系统在自然灾害监测预警及灾后救援、海洋动物种群保护等方面已被广泛运用^[5-8]。无人机技术的快速发展使其在现代生活中扮演起越来越重要的角色^[9],因此,无人机也受到了广大地球物理勘探工作者的关注。目前无人机在航空磁测领域应用已有相当长时间,与传统航空物探平台相比,无人机具备山地等复杂环境飞行的能力^[10],同时它的低空飞行能力使得高精度航空磁测成为了可能^[11],如在自然灾害监测方面,无人机航空磁测技术被用于活跃火山调查,大大降低了人员安全风险^[12];在工程领域,无人机航空磁测系统的超低空飞行能力有助于发现在浅地表埋藏的管道、未爆炸弹等金属物体^[13];在海洋地球物理勘探中,无人机航磁技术在海岸带等区域勘探也取得了良好的效果^[14];在矿产资源勘探方面,无人机航磁采集的大规模高精度数据进行三维反演,用于圈定有利磁铁矿区有不错的效果^[15];此外,在联合勘探方面,无人机航磁系统和多光谱遥感设备的结合可以实现局部区域详细地质图的绘制和三维地质模型的建立^[16]。

无人机作为一种新型航空磁测飞行平台,具有成本低、复杂地形通航能力、操作简单、作业风险小、智能化等优势^[17-20],但同时无人机航磁系统普遍存在磁干扰、续航时间短、稳定性弱、载荷小等问题。如今根据载荷大小、动力方式等不同,已经发展出了多种类型无人机系统,因此在航空磁测中有针对性地选择无人机飞行平台十分重要。本文首先介绍了国内外无人机航空磁测系统的研发进展及其应用,然后归纳了不同类型无人机航磁平台的优缺点及其磁力仪的选择和安装问题,同时详细探讨了无人机航空磁测中的干扰问题,最后总结并分析了无人机航空磁测技术的应用挑战及展望。

1 无人机航磁系统装备研发进展及其应用

1.1 国外无人机航磁装备研发进展及其应用

2003年,英国Magsurvey公司开展了无人机航空磁测系统研制的尝试,研发了一款名为Prion的固定翼航磁无人机系统,该系统机身长度达1.8 m,翼展为3 m,起飞重量在30 kg左右,采取弹射起飞、撞网回收,巡航速度约为90 km/h,搭载设备主要有铯光泵磁力仪、激光雷达高度计、GPS装置和三轴磁通门磁力仪^[21-23]。

2004年,荷兰Fugro公司推出了Geoeranger-I型固定翼无人机航空磁测系统,其翼展达3 m,设计速度为75 km/h,续航时间约为10 h,有效载荷为5.4 kg,系统具备自动飞行功能,搭载一个铯光泵磁力仪。2005年,该无人机航磁系统进行了升级,改进后总重量达到18 kg,速度提升到100 km/h,续航时间延长至15 h,最低工作高度为100 m,同时具备了简单的沿地形飞行能力^[21-22,24]。

2004年,加拿大万能翼地球物理公司推出了Venturer型无人机航磁系统,2005年对其进行了完善和测试,其续航时间约为10 h,巡航速度为70 km/h,机体采用了低磁性材料代替铁质材料,大大降低干扰磁场,同时具备自动飞行功能和低温环境工作的能力,该系统在北极地区成功进行了航空磁法勘探^[21-22]。

2011年,日本国家极地研究所研制了一款名为Ant Plane的燃油动力固定翼型无人机航磁系统,并在南极的恶劣环境下成功开展了航磁测量相关试验。该系统总成本约2万美元,机身长2.1 m,翼展为2.89 m,前置连接杆搭载一个三轴磁通门磁力仪,机身装备了一个磁阻传感器用于监测干扰磁场,该无人机航空磁测系统可以实现自主导航飞行,最大航行距离500 km,最高升空高度5 000 m,在南极夏季-15℃的低温环境下能展开正常航空磁测作业^[25]。

2016年,俄罗斯伊尔库茨克维诺格拉多夫地球化学研究所矿石地质实验室自主研发了一款多旋翼无人机航空磁测系统,配备了实时运动学定位系统,提供高精度定位能力,同时支持实时传输影像功能,便于监测飞行状态,此外,它具备离地5 m的超低空、以7~10 m/s的速度沿地形飞行展开航空磁测作业的能力。该系统搭载可拆卸电池,单次任务时间为45~50 min。在数据采集方面,该系统采用机体下部垂直悬挂磁力仪的

方式,搭载一个 Overhauser 磁力仪测量磁总场。该系统在俄罗斯东西伯利亚地区开展了 1:10 000 以及 1:5 000 大比例尺的低空航磁测量试验,并与地面磁测资料进行了对比,效果较为理想,能有效监测到地下微弱的磁场异常^[26]。

2017年,加拿大女王大学 Walter 等人使用大疆 S-900 型旋翼无人机为飞行平台,搭建了一套适用于复杂地理环境的航空磁测系统。该系统采用半刚性支架,将一个钾光泵磁力仪置于无人机下方 3 m 左右的位置,使得来自无人机机体对磁探头的干扰充分衰减。同时,该系统搭载了数据收集装置、激光雷达、GPS 定位装置,外搭设备总质量为 2.2 kg,此外,在地面使用一台 GSM-19T 磁力仪用于日变监测。该系统分别以 70 m、45 m、35 m 的飞行高度在一个 500 m×700 m 的矩形工区内完成测量,设置了 21 条测线,测线间距 25 m,测量速度保持在 7.5 m/s 左右,试验中该系统在 35 m 的低空测量中成功发现了以往未发现的磁异常体,在无人机航磁测量资料的指导下发现了一处新的金矿^[27]。

总的来看,国外无人机航空磁测装备由早期的自主研制飞行平台逐步开始转向已有的无人机平台来开发航磁系统,这将大大降低成本以及缩短研发周期。此外,固定翼无人机是最早应用于航空磁法勘探领域的飞行平台,近几年无人直升机、多旋翼无人机等飞行平台也开始在航空磁测领域流行起来,并在更多的复杂场景下取得了良好的应用效果。

1.2 国内无人机航磁装备研发进展及其应用

国内无人机航空磁测技术研究已有十年左右的历史,最早较为完备的航磁系统是基于军用系列的彩虹无人机飞行平台。随着近年来国内无人机装备的迅速发展,许多高校和研究所都成立了无人机航空物探的技术团队,一些物探企业也开拓了无人机航空物探业务。

2009年,中国科学院遥感所、大气物理所、地质与地球物理所等单位联合研制了一套基于无人机飞行平台的航空磁测系统,并在内蒙古赤峰市成功开展了首次试验飞行。该系统为燃油固定翼型无人机,机体采用碳纤维加玻璃钢材料的结构,有效载重 30 kg,搭载一个国产高精度氩光泵磁力仪(GB-10),同时具备磁干扰自动补偿功能^[22-23]。

2013年,中国地质调查局联合核工业航测遥感中心、航天空气动力技术研究院共同研发以国

产彩虹 3 固定翼无人机为飞行平台的航空磁测系统^[22,28-29],该款无人机航磁系统总质量为 640 kg,巡航速度达 180 km/h,勘探飞行高度下限为 100 m,可持续工作 12 h 左右。该无人机航磁系统在机翼位置搭载了一个铯光泵磁力仪,机体内部安装了补偿装置、数据收录及远程测控系统。在黑龙江省多宝山矿区实施了该系统的无人机综合测量应用试验,分别完成了 1:10 000 比例尺、飞行高度为 180 m 和 1:50 000 比例尺、飞行高度为 120 m 的测量工作,标志着中国无人机航空磁测技术迈入新的阶段。该航磁系统 2014 年在新疆克拉玛依的戈壁区、2015 年在新疆喀什沙漠地区分别进行了应用,并获得了良好的数据资料^[30]。2020 年,中国地质调查局自然资源航空物探遥感中心在彩虹 3 型无人机航磁系统的基础上升级为彩虹 4 型,升级后系统总质量达到 1 330 kg,最大载荷达到 345 kg,最长续航时间达到 30 h,试验测量的数据和传统有人驾驶飞机航空磁测资料高度吻合^[31]。

2013年,中国海洋大学开展了海洋无人机航空磁测装备的研制,研发了 Z3 型和 V750 型两款燃油动力无人直升机航磁系统,前者有效载荷为 25 kg,续航时间约为 1.5 h,后者有效载荷为 80 kg,续航时间约为 4 h。在仪器方面,二者均搭载了国产 GB-4A 氩光泵磁力仪、加拿大的 MCL-6 三轴磁通门磁力仪以及国产 H/KZB-1 型自动航磁补偿系统。两款航磁系统均由飞行平台、数据采集系统、数据处理系统三部分构成,其中数据处理系统由飞行质量控制模块、数据预处理模块和数据后处理模块组成,可以实现在测量飞行过程中进行数据质量分析、提供实时数据自动补偿、正常场校正、日变校正、平差等功能。其中 V750 型无人机航磁系统在渤海西部的胜利油田浅海滩涂区以飞行高度 325 m、速度 90 km/h 成功完成了航空磁测任务,验证了低空无人机在海洋磁测应用的可行性^[14]。

2018年,成都理工大学李志鹏等基于六旋翼无人机平台设计了一套小型无人机航空磁测系统。该无人机航磁系统的巡航速度为 43.2 km/h,有效载荷为 4 kg,航程约为 10 km,搭载了英国巴灵顿公司的 Mag03 型三轴磁通门磁力仪和一款自主研发的重 200 g 的数据记录器。该系统在四川省黑竹沟地区展开了试验飞行,数据结果与已有的航空磁测资料吻合度高,并发现了一些新的地下小磁异常体。该无人机航磁系统旨在解决

在复杂的山地、丛林等特殊区域开展物探工作高成本、耗时的问题,验证了多旋翼无人机在复杂环境下的测量可靠性^[32]。

在物探企业方面,2017年,浙江大年科技有限公司以中国著名地球物理学家黄大年教授创立企业为依托而成立,其主营业务是从事无人机系统和物探装备研制以及相关数据处理与解释技术的研发。该公司自主研制了多款无人机航磁系统,其中DN20-G4型多旋翼无人机航磁系统具备较低的磁干扰和沿地形飞行功能,针对复杂地形条件可以快速完成大比例尺的航磁作业,其作业成本是地面传统磁测的1/4~1/3;该公司还生产了一款具备垂直起降功能的固定翼无人机航磁系统——DN小鹰1060型,该系统机身长度为3.5 m,翼展达4.5 m,有效载荷为15 kg,续航时间为4.5 h,速度为120~150 km/h,机身完全采用了无磁性材料,同时核心部件进行磁屏蔽处理,它最大的特点是不需要起降跑道,同时能够实现大面积、快速航空磁测工作。

除了上述无人机航磁测量装备的研制以及应用案例外,国内其他一些高校和科研院所也开展了无人机航磁系统的应用研究,如2021年中国科学院地质与地球物理研究所的武雪岭等采用小型旋翼无人机航磁测量系统在新疆伊犁地区为寻找地下深部的隐伏矿体开展了测试与应用^[33];2021年中南大学的柳建新等使用旋翼无人机航磁系统在云南省金平地区开展了航磁测量工作,克服了该地区海拔高、地形陡峭、植被茂密等困难,成功预测了地下隐伏的钛磁铁矿^[34];国家海洋局的周普志等选用了湖南山河科技股份有限公司飞玥型汽油无人直升机和成都纵横自动化技术有限公司CW-30固定翼垂直起降无人机作为航磁测量飞行平台分别于2019年和2020年在山东省三山岛、浙江省岱山岛开展了无人机航空磁测试验^[35]。

2 无人飞行平台与磁力仪类型的选择

2.1 飞行平台的选择

传统航空磁测的飞行平台主要分为固定翼型和直升机型两种飞机,动力三角翼等飞行器在航空磁测中也有少量应用^[36-37];无人机航空磁测系统的飞行平台主要以固定翼型、直升机型、多旋翼无人机为主,此外,还有飞艇等特殊飞行器^[38-39]。不同的飞行平台在经济成本、适用场景、安全风险、操控性能、工作效率等方面存在较大

差异,因此针对不同的勘探对象和任务要求,选择合适的无人机航空磁测飞行平台至关重要。

固定翼无人机具有飞行速度快、续航时间长、有效载荷大等优点,适用于平坦地形区域展开大面积快速地球物理勘探任务,其缺点是起飞和着陆通常需要跑道或特殊设备,并且存在失速风险,因此不适合低速和高分辨率的磁力测量。

无人直升机是一种单旋翼垂直起降飞行器,它的飞行速度慢于固定翼型,但快于多旋翼型无人机,速度从80 km/h到悬停静止,动力来源包括燃油发动机驱动和电力驱动,适宜在复杂地形或火山等危险区域执行任务,其缺点是不易控制,飞行安全性较低。

多旋翼无人机是最晚被研发的一类无人机,目前只有电力驱动型,它又分为四旋翼、六旋翼、八旋翼三类,具备优秀的操控性能和自主导航飞行能力,定位精度高,具备低速低空沿地形巡航能力,此外其价格低廉,是开展航空磁测研究的理想飞行平台。多旋翼无人机的缺点也很明显,它的有效载荷往往低于10 kg,由于电池供应问题,其续航时间一般为几十分钟。因此多旋翼无人机航空磁测系统较为适合大比例尺、小面积的高分辨率航空磁法勘探。

总的来说,在实际航空磁力勘探作业中,需要综合考虑工区的地形环境、气候条件以及资金和对数据精度的需求,选择最合适的无人机航空磁测飞行平台和对应的磁力仪,结合本文所调研文献,归纳了固定翼无人机、无人直升机、多旋翼无人机三类航磁平台的主要特点,见表1。

2.2 无人机航空磁力仪的类型

航空磁力仪是航磁测量的重要仪器,选择合适的磁力仪对于提升无人机航磁数据的质量十分关键。一般来说,在体积和重量满足的条件下,传统有人飞机航空磁力仪也同样适用于无人机航磁系统。中国最早的航空磁力仪可以追溯到20世纪五六十年代长春地质学院研制的中国第一台航空核子旋进式磁力仪和第一台航空光泵磁力仪^[49]。20世纪90年代,中国国土资源航空物探遥感中心(简称航遥中心)自主研制出了HC-90K型航空氦光泵磁力仪,其灵敏度达到0.002 5 nT,之后又升级研制出HC-2000型航空氦光泵磁力仪^[50]。

根据本文所调研文献,对航磁测量应用中不同类型磁力仪的重量、灵敏度等相关参数进行了归纳统计,见表2。由表2可知,在44项无人机航

磁系统中,使用光泵磁力仪的达到了 29 项,磁通门磁力仪有 9 项,质子磁力仪仅有 2 项,还有 4 项采用不同磁力仪的组合。在磁力仪型号方面,磁通门磁力仪主要有英国巴庭顿公司的 Mag03 系列、德国的 Magdrone 型;光泵磁力仪有加拿大 Scintrex 公司的 CS-VL 铯光泵磁力仪、加拿大 GEM 公司的 GSMP-35 系列高精度钾光泵磁力仪以及国产 GB-4A 氦光泵磁力仪;质子磁力仪有加拿大 GEM 公司的 GSM-19T 型质子磁力仪。综合所调研文献来看,上述 3 类较为常见的航空磁力仪有以下特点:光泵磁强计具有较高的灵敏度、分辨率及采样率,具备无零点漂移、无需严格

定向的优势^[51];磁通门磁力仪主要优势在于可以提供磁场三分量信息,但其灵敏度、分辨率以及采样率相对光泵磁力仪要低,且存在较为严重的转向误差;质子磁力仪体积较大、采样率较低、精度相对较高,故往往用于地面监测磁场日变或在多旋翼型无人机平台下开展监测点磁测。

总的来看,高精度光泵磁力仪是无人机航磁系统较好的选择,更重要的是考虑任务的精度需求和预算,在无人机载荷允许的情况下,可以采用不同类型磁力仪组合或者搭载多个磁力仪开展航磁测量,可能会获得更为丰富的磁场信息。

表 1 三类无人机航磁飞行平台的比较

Tab. 1 Comparison of Three Types of UAV Aeromagnetic Flight Platforms

比较项目	固定翼无人机	无人直升机	多旋翼无人机
装备成本	高:十几万元到几百万元	高:几十万元到几百万元	低:几万元到几十万元
服务成本	高:起降场地、维护团队、燃油成本	高:较平坦的起降场地、维护团队	低:两三人、维护简单、无需专门的起降场地
有效载荷/kg	<100	<80	<10
测量速度/(km·h ⁻¹)	50~200	5~80	5~50
测量高度/m	50~5 000	10~5 000	1~4 000
续航时间/h	<15	<10	<1
磁力仪搭载方式	机翼安装、硬杆连接	悬吊、硬杆连接、吊舱	悬吊、硬杆连接、吊舱
特点	续航时间长、速度快、抗风能力强、航程远、燃油发动机为主	续航时间较长、可悬停、低空测量、燃油发动机型和电机驱动型皆有	悬停、定位精度高、超低空测量、电机驱动
适用场景	一般雨雪天气可以工作	白天工作、对天气要求较高、雨雪等恶劣天气无法工作	可在白天和夜晚开展工作、对天气要求高、雨雪、大风等天气无法工作
主要应用	大面积快速普查、地质勘查、矿产资源普查	矿产勘查、地质构造调查、海洋地质调查、火山监测	小区域大比例尺地质调查、危机矿山勘查、浅地表金属探测
参考文献	[21],[25],[28],[31],[35],[40-43]	[12],[14-15],[18],[24],[27],[35],[39]	[17],[26],[32-34],[44-48]

表 2 不同类型磁力仪特点比较

Tab. 2 Comparison of Characteristics of Different Types of Magnetometers

比较项目	磁通门磁力仪	光泵磁力仪	质子磁力仪	多类磁力仪组合
灵敏度/nT	0.07~0.1	0.000 1~0.02	0.05~0.1	—
分辨率/nT	0.1~1	0.000 1~0.014	0.01~0.1	—
采样率/Hz	1~200	10~1 000	<1	—
方向误差/nT	0.2	0.05~0.65	—	—
重量/g	160~920	133~1 000	约 2 000	—
磁力仪代表	Mag03、Magdrone	CS-VL、GSMP-35U、GB-4A	GSM-19T、GEM-19GW	—
参考文献	[10],[13],[25],[43-44]、 [47-48],[52-53]	[12],[15-17],[27-30],[32-33]、 [41],[43],[46],[54-69]	[34],[46]	[14],[18],[31],[35]

3 无人机航磁干扰分析

根据性质不同,航空磁测干扰可分为机动干扰和非机动干扰两大类。机动干扰随着飞机运动姿态变化而变化,此类干扰往往通过 Tolles-Lawson(T-L)模型进行补偿,在 T-L 模型中,机

动干扰可划分为剩余干扰场、感应干扰场、涡流干扰场。非机动干扰包括机电设备的电磁干扰、磁力仪的转向差等,此类干扰一般可以通过滤波、屏蔽等方式对其削弱^[70-71]。一般来说,无人机体体的干扰幅值比有人驾驶飞机的干扰幅值要小,但是在飞行姿态变化的情形下,这部分机体

干扰磁场仍然存在不可忽略的影响^[72]。本节主要针对机动干扰以及非机动干扰中的电磁干扰,对无人机航磁系统的干扰问题进行了详细分析与讨论。

3.1 机动干扰描述及补偿

机动干扰的概念最早可以追溯到1950年,Tolles和Lawson提出的T-L航磁补偿模型^[73-74];对机动干扰的补偿研究已有相当长的历史,1960年加拿大研发了AN/ASA-65(9)型半自动航磁补偿器^[75];1979年Bickel具体分析了飞机机动引起的磁场小信号,考虑飞机航向和小幅度机动对航磁补偿模型求解的影响,简化了补偿系数的求解流程^[76];1980年Leach使用线性回归的方法开展了航磁补偿研究,首次讨论了求解航磁补偿数学模型时存在的多重共线性问题^[77]。

中国对机动干扰的补偿研究始于1965年,中国第一批航空物探队成员卓松年发表的《飞机磁干扰场补偿原理设计》的论文^[78];1979年李标芳等^[79]论述了将飞机磁干扰划分为4项平面磁干扰项和4项垂直磁干扰项;1981年曾佩韦^[80]论述了稳态法和机动法这两类航磁补偿方法,1985年何敬礼^[81]首次在《飞机磁场的自动补偿方法》中提出了一种自动化的航磁补偿方法,1993年吴文福^[82]基于T-L补偿模型设计了一种以16位微机运算系统为核心的16项补偿系数的自动航磁补偿方法。

3.1.1 机动干扰的描述

T-L模型用于航空磁测的机动补偿至今已有70多年的历史,它将飞行平台的磁干扰分解为剩余磁场、感应磁场和涡流磁场,其中剩余磁场也称恒定磁场,是飞机硬磁性材料在外界磁场的磁化作用下形成的、在一定时期内强度稳定的磁场;感应磁场是机体的软磁性材料在飞机运动过程中被地磁场磁化所产生的感应磁场;涡流磁场则是航磁系统的回路导体在飞机机动过程中切割外界磁场而产生的^[74,83]。T-L补偿模型对应的坐标系如图1所示,其中X、Y、Z为空间坐标轴,飞机纵轴为Y,横轴为X,Z轴垂直于XOY平面, B_g 表示地磁场, B_d 表示干扰磁场, B 则表示磁力仪的测量场, x 、 y 、 z 分别是地磁场与坐标轴的夹角。

1961年Leliak^[84]在T-L补偿模型的基础上,将3类干扰磁场以包含姿态方向角余弦的线性方程组形式表示。总的干扰磁场 B_d 可由恒定干扰场 B_p 、感应干扰场 B_i 和涡流干扰场 B_e 表示,计算式为:

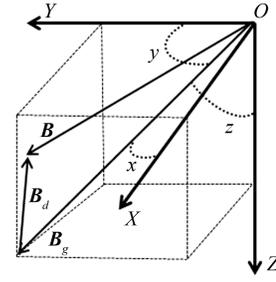


图1 T-L航磁补偿坐标系^[53]

Fig. 1 T-L Aeromagnetic Compensation Coordinate System^[53]

$$B_d = B_p + B_i + B_e \quad (1)$$

$$B_d = [c_1 \ c_2 \ c_3] \begin{bmatrix} \cos x \\ \cos y \\ \cos z \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中, c_1 、 c_2 、 c_3 代表恒定干扰场补偿系数; $\cos x$ 、 $\cos y$ 、 $\cos z$ 分别是夹角 x 、 y 、 z 的方向余弦;

$$B_i =$$

$$B_g \begin{bmatrix} \cos x & \cos y & \cos z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos x \\ \cos y \\ \cos z \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中, B_g 表示背景场(地磁场); b_{ij} ($i, j=1, 2, 3$)表示感应补偿系数。同时有:

$$(\cos x)^2 + (\cos y)^2 + (\cos z)^2 = 1 \quad (4)$$

由式(3)、式(4)化简同时合并系数, B_i 可表示为含5项补偿系数的表达式:

$$B_i = B_g [c_4 (\cos x)^2 + c_5 \cos x \cos y + c_6 \cos x \cos z + c_7 (\cos y)^2 + c_8 \cos y \cos z] \quad (5)$$

涡流干扰磁场 B_e 的计算式为:

$$B_e =$$

$$B_g \begin{bmatrix} \cos x & \cos y & \cos z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos x' \\ \cos y' \\ \cos z' \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中, $\cos x'$ 、 $\cos y'$ 、 $\cos z'$ 表示夹角方向余弦对时间的导数。同时有:

$$\cos x \cos x' + \cos y \cos y' + \cos z \cos z' = 0 \quad (7)$$

由式(6)、式(7)化简同时合并系数, B_e 可表示为含8项补偿系数的表达式:

$$B_e = B_g (c_9 \cos x \cos x' + c_{10} \cos x \cos y' + c_{11} \cos x \cos z' + c_{12} \cos y \cos x' + c_{13} \cos y \cos y' + c_{14} \cos y \cos z' + c_{15} \cos z \cos x' + c_{16} \cos z \cos y') \quad (8)$$

将式(2)、式(5)、式(8)代入式(1),若有 N 组数据,则可写成矩阵形式,总干扰磁场 B_d 可表示为:

$$B_d = AC \quad (9)$$

$$A = \begin{bmatrix} a_{1(1)} & a_{2(1)} & \cdots & a_{16(1)} \\ a_{1(2)} & a_{2(2)} & \cdots & a_{16(2)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{1(N)} & a_{2(N)} & \cdots & a_{16(N)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos x_{(1)} & \cos y_{(1)} & \cdots & \cos z \cos y'_{(1)} \\ \cos x_{(2)} & \cos y_{(2)} & \cdots & \cos z \cos y'_{(2)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \cos x_{(N)} & \cos y_{(N)} & \cdots & \cos z \cos y'_{(N)} \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$C = [c_1 \quad c_2 \quad \cdots \quad c_{15} \quad c_{16}]^T \quad (11)$$

因此,航磁补偿的主要目的就是首先通过试验飞行获取 A 矩阵的 16 项系数和 B_d 磁干扰值数据,然后利用式(9)求解补偿系数矩阵 C ,最后在航磁测量中使用估计的补偿系数矩阵 C 和方向余弦信息代入式(9),则可实时求解总的磁干扰场,进而实现航磁数据补偿。

3.1.2 机动干扰补偿方法

航磁机动干扰补偿处理也称为航磁补偿,已有许多学者采用各类算法进行补偿系数的求解,旨在提高补偿估计的准确性和补偿速度。最小二乘法是一种经典回归系数求解方法,周文月等^[52]在使用巴特沃斯低通滤波器对高频噪音进行处理后,采用三轴磁通门磁力仪提供的飞行姿态信息,用最小二乘法进行了航磁补偿系数的求解,补偿结果一定程度上改善了无人机航磁数据的质量。Han 等^[85]开发了一款基于 Overhauser 磁力仪的旋翼无人机航磁测量系统,并用最小二乘法进行了补偿系数的估计。

在航空磁测过程中,由于飞行姿态的变化幅度较小,补偿模型中的系数矩阵常常存在严重的多重共线性,即病态求解问题,针对这一问题,学者们提出了一些方法来降低多重共线性的影响。张宁等^[86]采用了一种改进岭回归估计方法进行航磁补偿系数求解,在一定程度上减弱了多重共线性的影响;庞学亮等^[87]使用截断奇异值方法进行了补偿处理,效果与岭回归估计方法相当;Gu 等^[88]提出了一种针对解决 T-L 航磁补偿模型病态问题的改进截断奇异值方法;Zhang 等^[89]采用偏最小二乘法进行了航磁补偿处理;Zhao 等^[90]分析了在不同飞行航向上补偿模型中的各变量项对于模型多重共线性的贡献差异,通过选择较小的方差膨胀系数,在不同航向上建立对应的补偿子模型,该补偿方法一定程度上提高了补偿精度,试验补偿效果优于最小二乘法和岭回归估计方法;Wu 等^[91]进行了基于主成分分析的航磁补

偿系数求解,在直升机航磁系统上进行了测试,补偿质量与岭回归估计的补偿效果相近。

除了上述补偿方法外,无人机机体材料选择碳纤维、玻璃纤维等合成材料也是一种削弱干扰场的可行办法,Zhang 等^[92]对绝缘合成材料制造的无人机机体产生的涡流干扰场进行了分析,提出了在使用低磁性无人机平台开展航磁测量的情况下,补偿模型中原有的 16 项补偿系数可以排除 8 项涡流干扰场系数项,最终简化为只包含 8 项航磁补偿系数的模型,简化后的补偿模型多重共线性得到了抑制。Dou 等^[93]提出了一种基于小波多分辨率分析的自适应滤波器,该滤波器在航磁补偿前进行数据预处理,对抑制 T-L 航磁补偿模型的多重共线性利用飞机机动的频率特性起到了较好的效果。2017 年加拿大 RMS 仪器公司提出了一种自适应航磁补偿技术,该方法仍然基于 T-L 补偿模型,其创新在于使用递归算法在飞行过程中定期修正补偿模型,动态地调整补偿系数,对每一组新的测量值进行最佳补偿^[94]。Feng 等^[95]提出了一种考虑地磁梯度影响的改进航磁补偿方法,首先利用差分全球定位系统获取高精度飞行剖面,然后根据国际地磁参考场(international geomagnetic reference field, IGRF)模型获取地磁场信息,将地磁梯度建模为经度、纬度和飞行高度的函数;最后将包含地磁梯度信息的背景场代入补偿模型求解补偿系数,试验结果表明,该方法在一定程度上提高了估计补偿系数的准确性和稳定性,改善了航磁补偿效果和弱磁异常检测能力,但还未见实际应用。

随着计算机技术的发展,神经网络方法在航磁补偿中也得到了应用。Williams^[59]较早提出了运用神经网络的方法进行航磁补偿系数的求解,通过试验飞行提供位置、时间和姿态相关的变量值作为输入,现场测量磁场值作为目标输出进行训练,了解由横滚、俯仰、偏航及其时间导数与它们产生的干扰场之间的函数关系,使用优化与正则化算法进行训练。吴佩霖等^[60]设计了一种无人机航磁全轴总场梯度测量系统,相应提出了采用前馈网络的方法进行航磁补偿处理,经过前馈网络实现数据补偿后,验证了高精度航磁测量的全轴梯度系统和神经网络数据补偿方法的可行性。Ma 等^[61]针对线性补偿模型求解方法欠拟合和神经网络补偿方法过拟合的问题,提出了一种双重补偿估计方法,该方法基于无迹卡尔曼滤波器,在迭代过程中采用梯度下降法使得飞机机动

过程中可以调整线性补偿模型的参数,以及通过引入观测噪声来抑制神经模型过拟合的问题,该方法达到了在飞机机动中补偿性能的同时抑制了神经网络过拟合引入的噪声,但是也存在一些与机动无关的干扰无法被模型学习的问题。Ma等^[96]对神经网络方法在航磁补偿中的不确定性进行了分析,设计了一种在航磁补偿中同步预测干扰的期望值和偏差的VB神经网络模型,将估计偏差用作补偿的性能指标。Yu等^[97]提出了一种基于回归方程和广义回归神经网络的航磁补偿方法,并在一套无人直升机航磁系统开展了补偿试验,通过对构成广义回归神经网络的概率密度函数的分析,验证了采用适当的平滑因子和多个训练集可以提高该神经网络补偿模型的泛化能力,从而减弱过拟合的影响。Jiao等^[98]提出了一种神经网络模型压缩和加速技术,优化了反向传播神经网络,该神经网络方法实现了部分实时航磁补偿。

除了上述对补偿系数求解方法的研究,一些学者对补偿模型进行了改进。王婕等^[62]提出了一种基于地面测量的静态补偿方法,该方法的主要思路是首先将机动干扰分为静态干扰场和动态干扰场,通过滤波将动态干扰消除,然后在地面获取飞机在水平面上8个不同朝向方位以及两个俯仰姿态的磁场数据,用于计算补偿系数,值得注意的是,该方法只适用于对于固定翼无人机,并且补偿精度有待进一步研究。在T-L航磁补偿模型中,方向余弦通常使用三轴磁通门磁力仪获取,然而标量磁力仪的精度比磁通门磁力仪更高,所以磁通门测量的误差导致方向余弦的不准确,进而将该误差引入补偿模型的系数求解中。Han等^[99]使用标量磁力仪的磁总场对修正了T-L模型中的方向余弦,引入补偿项改进了T-L航磁补偿模型;针对磁通门磁力仪刻度因子误差、三轴不严格正交、零偏不一致引起的转向误差问题,乔中坤等^[53]提出了一种将磁通门磁力仪转向误差和飞机的机动干扰结合建立一个综合误差补偿模型的方法,在T-L模型的基础上引入了转向误差模型,进一步提高了无人机搭载磁通门磁力仪测量的数据补偿精度。Mu等^[63]使用两个高精度光泵磁力仪设计一种基于信号相关性的航磁补偿方法,建立了双通道线性时不变模型,如图2所示。其中, $a(n)$ 为磁异常场, $i(n)$ 为机体的干扰磁场, $s_1(n)$ 、 $s_2(n)$ 分别是两个光泵磁力仪的测量值。该方法的基本原理是磁力仪与

机体距离的不同导致高精度光泵磁力仪测量信号存在差异,从而分离出机体产生的干扰场。Walter等^[64]针对标量原子磁力仪在航空磁测中存在航向误差的问题,提出了一种结合T-L模型干扰场、地磁梯度干扰以及磁力仪航向误差三者的改进航磁补偿模型,相较原有模型,该模型的品质因子和标准差都得到了提升。

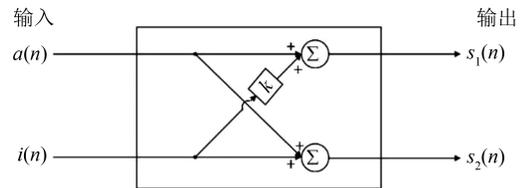


图2 无人机磁强计系统信号模型^[63]

Fig. 2 Signal Model of UAV Magnetometer System^[63]

3.2 电磁干扰描述及抑制方法研究

无人机航磁系统携带的电磁干扰场是一种机电设备干扰,采用电机驱动的无人机航磁系统将引入更强的电磁干扰^[64],这一类干扰成为了无人机航磁中最为主要的干扰源^[100],由于这类干扰与机动干扰的频率不一致,使用T-L模型无法对其进行补偿处理,此外,无人机结构相对于飞机也有一定区别,如机体内部电子设备的分布、发动机类型、机身材料等都会导致航磁测量过程中干扰的差异,因此对于无人机航空磁测系统的干扰研究是十分必要的。

3.2.1 无人机航磁系统的电磁干扰特性研究

分析无人机航磁系统的电磁干扰特性是改善航磁数据质量的一个重要工作,已有一些学者开展了相关的研究。Walter等^[65]使用四旋翼无人机航磁系统设计了静态和动态试验,针对机体的电磁干扰信号进行了分析,给出了电磁干扰信号的频率与无人机电机的旋转频率的相关关系,发现观察到的最低频率磁干扰信号与电机转子的机械旋转频率同步,高频磁干扰信号比机械旋转频率大1~2个数量级,该研究工作对削弱无人机航磁系统的电磁干扰具有一定的意义。Tuck等^[101]建造了一个简易的磁场扫描装置来绘制机体磁场分布图,以此了解机体电磁干扰的强度以及分布情况,该扫描装置如图3所示。

使用该扫描装置,笔者开展了两项测试工作,第一项测试是在恒定电流状态下采集固定翼、直升机、四旋翼、六旋翼4种无人机的磁干扰信息,并绘制了机头面向磁北和向东的磁干扰分布图。通过机体磁干扰平面分布图可以判断各种类型无人机强磁干扰源的大致位置以及强度,

结果表明,固定翼无人机的磁干扰场主要集中在发动机、电池、伺服电机所在的机头和机尾,并呈偶极磁异常分布,在机翼处幅值较小,其最大干扰幅值小于 100 nT;直升机的干扰相对集中在以传动轴为中心的圆形范围内,呈现单极负磁异常,其幅值较大,超过了 300 nT;四旋翼无人机的干扰磁场近似三角形分布,其干扰磁场强度在 4 类无人机中最小;六旋翼无人机的干扰磁场类似偶极磁异常分布,其最大干扰磁场幅值超过了 200 nT。

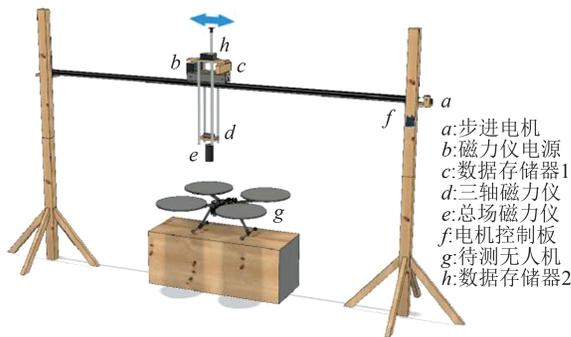


图 3 磁场扫描装置^[101]

Fig. 3 Magnetic Field Scanning Device^[101]

第二项测试是在不同工作电流状态下绘制每个机体朝北的磁干扰剖面,以此分析电流变化对机体电磁干扰的影响。结果表明,机体电磁干扰受电流影响最剧烈的区域在电池附近,其中四旋翼无人机与六旋翼无人机的整体磁干扰随电流波动幅度最为明显,电流变化引起的磁干扰幅值变化可达 100 nT 以上。该研究表明电磁干扰是引起无人机航磁系统磁干扰的一个重要来源。

3.2.2 无人机航磁系统电磁干扰抑制

Cao 等^[102]分析了无人机航磁系统的电磁干扰源和光泵磁力仪的工作特性,对开关电源电路进行了优化设计,将其电磁干扰限制在合理水平,减少机体电源电磁干扰的产生,使光泵磁力仪的测量精度得到了改善。Forrester 等^[103]提出了一种基于无人机系统干扰磁场的场源位置和方向对机体上各个电机进行最优布置的技术。首先将单个伺服电机的磁场建模为单个永磁偶极子,则机体上多个伺服电机产生的磁场表示为多个目标函数,然后使用遗传算法寻找伺服电机的组合优化配置,其最优特性定义为:(1)机翼尖端位置处的磁场最小化,(2)平衡或最小化翼尖位置之间的磁场差异,(3)每个翼尖周围一定空间内磁场均匀性变化。

除了上述对干扰源的抑制来削弱电磁干扰

的方式外,还可以选择合理的搭载方式来减少机体电磁干扰对磁力仪的影响。目前常见的有硬杆连接、悬挂以及使用吊舱装置 3 类磁力仪搭载方式,图 4 以多旋翼无人机为例展示了 3 类搭载方式^[100]。其中,硬杆连接往往是在机身的中轴线上安置无磁性硬杆,顶部安装磁力仪,绕杆或空心杆内布置导线,具备稳定性强的特点,但磁力仪受机体磁场影响较大,固定翼无人机航磁系统多采用此类搭载方式;悬吊的搭载方式采用一根高强度细绳或者电缆一端固定在机体重心处,另一端垂吊磁力仪,该方式可以有效削弱机体磁干扰,但其抗风性能较差,且由于摆动导致 GPS 记录的磁力仪位置坐标误差较大,特别是磁力仪的转动、摇摆会导致对方向敏感的磁力仪(比如三轴磁通门磁力仪)的测量数据准确性、可靠性大大降低,多用于对勘查速度要求不高的旋翼类无人机;吊舱装置与磁力仪直接悬吊不同,它将磁力仪或者 GPS 等安置在吊舱内部,使得飞行稳定性得到了增强,它在悬吊基础上为磁力仪加装一个类似整流罩的外壳来减弱风的干扰,达到增强机载磁力仪稳定性、同时削弱机体磁干扰以及起到保护的作用,但是这给无人机引入了额外负重。

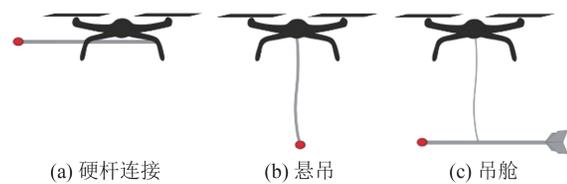


图 4 多旋翼无人机搭载磁力仪方式示意图^[66]

Fig. 4 Schematic Diagram of the Multi-Rotor UAV Equipped with a Magnetometer^[66]

此外,在航磁测量中,磁力仪安装的空间位置与数据质量也有着非常重要的关系。在高精度无人机航空磁测中常常应用光泵磁力仪,其测量精度优于磁通门磁力仪^[104],但在获取磁场信息时具有方向依赖性,即塞曼效应。在无人机航磁测量中,为了使搭载的光泵磁力仪能够采集高质量磁场数据,在安装光泵磁力仪时需要考虑其方向和角度,由于在三维空间中塞曼效应最大化的最佳角度是 45°,因此可以得到磁力仪轴与磁场之间的位置关系,如图 5 所示,其中绿色区域是光泵磁力仪采集磁场数据的有效区间^[105]。

此外,为了保证悬吊式搭载的光泵磁力仪在飞行中保持在合理的操作区域内,Walter 等^[105]设计了一款半刚性磁力仪安装支架(如图 6 所示),用于限制磁强计的偏转。试验证明,该磁力仪安装方式采集的数据达到了航空磁测的行业标准。

总的来说,针对无人机航空磁测中存在的两类干扰问题,其消除的主要措施包含了算法的改进以及无人机航磁系统硬件的优化设计两个方面,具体对比见表3。

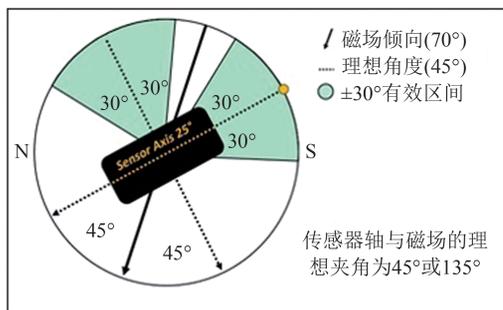


图5 光泵磁力仪与磁场二维位置示意图^[105]

Fig. 5 Two Dimensional Position Diagram of Optical Pump Magnetometer and Magnetic Field^[105]



图6 半刚性安装系统及其应用示意图^[105]

Fig. 6 Semi-Rigid Mounting System and Its Application Schematic^[105]

表3 无人机航磁干扰类型对比

Tab. 3 Comparison of UAV Aeromagnetic Interference Types

干扰类型	干扰源	解决方案	具体方法
机动干扰	机体磁性材料	航磁补偿处理、采用低磁性材料	最小二乘法、截断奇异值、岭回归估计、神经网络方法
非机动(电磁)干扰	电池、电机、电路	滤波、屏蔽处理、机体电源、电机、电路优化布置、延长磁力仪与机体距离	巴特沃斯滤波、小波分析

4 无人机航空磁测应用

随着无人机硬件技术的发展,无人机航磁系统的续航能力、飞行稳定性、载荷、机动性等都得到了很大提高,此外无人机航空磁测具有快速、低成本、安全以及数据分辨率较高等特点,因此被越来越多地应用于矿产资源勘查、自然灾害防治及环境保护、地质填图、军事等领域,如推断地质构造、寻找地热资源、探测地下线缆等^[67]。本节主要从矿产资源勘查、自然灾害防治和环境保护两方面介绍近年来无人机航磁技术的应用实

例及其前景。根据文献资料来看,目前无人机航空磁测技术的应用主要有以下几个方面:(1)矿产资源勘查、资源潜力评价以及危机矿山找矿;(2)基础地学研究,如地质构造、地层岩性调查等;(3)工程探测,如未爆炸物、金属管道、废弃油气井等人造磁性物的探测;(4)地震活动的构造背景研究及其成因调查、高风险地震区的分布研究;(5)火山活动监测。

4.1 矿产资源勘查

矿产资源勘查是无人机航磁技术应用的主要领域,高分辨率无人机航磁资料有利于确定金属矿床的位置及范围、地热能开发的调查等,高精度无人机航磁资料的反演结果处理有助于精细研究深部地质构造、磁性基底岩相以及断裂构造展布规律,对深层油气调查具有重要意义^[48]。

无人机航磁系统的一个突出特点是具备低空作业能力,因此在矿产勘查中无人机航磁测量往往可以发现一些隐藏矿床。Parvar等^[68]使用多旋翼无人机搭载一个高精度GSMP-35A钾光泵磁强计,用于铬铁矿矿床的勘查,该系统分别在20 m和60 m的高度进行了两次飞行作业,其中测线距离为30 m,测量结果如图7所示。由图7可知,20 m低空测量数据验证了一处已知铬铁矿露头(图7(b)),其中小椭圆圈定范围是已知的一处铬铁矿,同时一处潜在铬铁矿在大椭圆圈定范围内被发现;但60 m高度的航磁数据则无法确定矿床位置(图7(a)),该应用结果证实了低空航磁测量的效果可以满足高精度磁法勘探要求。

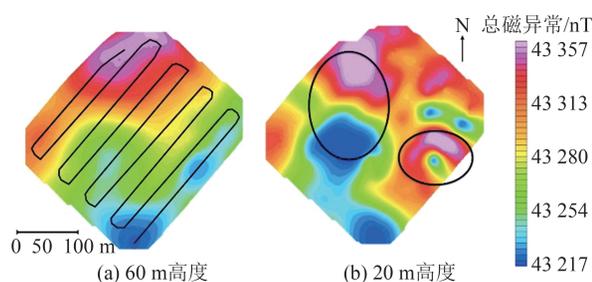


图7 不同测量高度的总磁场强度^[68]

Fig. 7 Total Magnetic Field Intensity at Different Heights^[68]

在数据处理方面,低空采集的高分辨率无人机航磁数据同样可以获得不错的反演结果,有助于准确获取地下磁性源的位置和规模。Kim等^[69]采用无人机航空磁测系统对一处铁矿开展了铁矿石分布的调查,该多旋翼无人机搭载了一个MagArrow钾光泵磁力仪,其测线距为50 m,飞行高度为60 m。在数据处理中进行了无约束非均质属性反演,结果如图8所示。在多

旋翼无人机航磁系统的数据结果中, B 区异常与已有的直升机航磁结果一致, 并且在 C 区发现了新的磁异常体, 通过与 Well 1、Well 2、Well 3 三处钻井资料的对比, 证实了低空无人机航磁数据反演结果的准确性和可靠性。

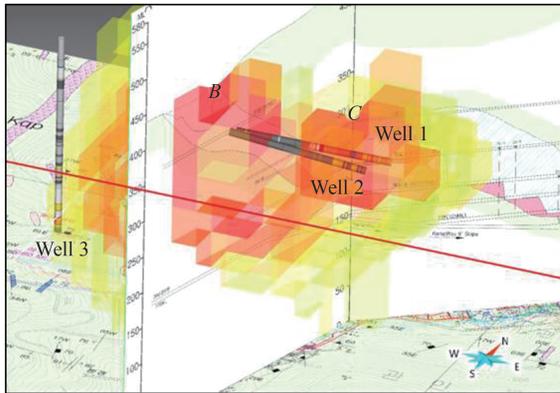


图 8 无人机航磁资料反演结果与钻井资料对比^[69]

Fig. 8 Comparison of UAV Aeromagnetic Data Inversion Results and Drilling Data^[69]

除了单一的无人机航磁测量之外, 无人机航磁系统比较容易与其他遥感设备展开联合探测。Jackisch 等^[106]提出了一种结合光学遥感和磁法勘探的无人机多传感器集成采集与处理技术, 用于描述铁、钛、钒矿床的露头特征, 分别在 15 m、40 m、65 m 的高度, 以 0.5 m 的测线距采集磁总场数据, 将高分辨率光谱遥感图像与无人机航磁信息进行融合和联合解释。该应用得到了铁矿点位置预测图, 较为详细刻画了地表铁矿石产状分布, 经过与地面测量结果对比, 表明低空航磁测量一定程度上可以替代地面磁测, 反映了低空无人机航磁与遥感结合勘探可靠、快速、经济的优势。

4.2 自然灾害防治和环境保护

近年来, 地质灾害频发以及人类对于环境保护愈加重视, 无人机航空磁法探测作为一种安全、便捷、经济的调查方式, 在自然灾害防治和环境保护方面具有良好应用前景。通过航磁系统获取地下磁性构造特征及探测隐伏断层等信息, 研究地震的动力机制, 推断孕震高风险区域以及余震的分布规律, 有助于地震学家对地震活动规律的认识^[107-110]。无人机航磁可以轻松获取火山区域的磁性岩石分布信息, 是一种安全便捷的火山监测方式^[51]。此外, 无人机航磁也被用于近地表未爆炸物勘查^[63]、废弃油气井调查^[57]等方面。

地震活动是人类面临最为严重的自然灾害活动之一, 虽然地震的发生不可预测, 但对地震活动的地质构造背景和高风险区域研究一直是地球物理学家关注的重点。航空磁测作为一种

快速的大规模物探技术, 在地震研究领域发挥着重要作用。2017 年博茨瓦纳莫伊巴纳地区发生里氏 6.5 级地震, Kolawole 等^[109]使用与差分干涉合成孔径雷达分析相结合的高分辨率航磁和重力数据, 对该区域的岩石圈结构进行了研究并分析了地震成因, 该研究对震后预防工作和快速了解地震发生机制具有重要意义。

Minelli 等^[110]通过已有的直升机低空高分辨率航磁数据, 对意大利亚平宁山脉中部地震带的地质构造展开了研究。由于各年代地层和地质构造间具有不同磁性特征, 航空磁测数据不同波长成分代表的磁性源深度也存在差异, 因此对航磁资料进行滤波等处理后可以获取更为丰富和详细的地质信息, 结果表明, 使用低空高分辨率航空磁测数据推测的断层位置和规模与已有的地质和地震结果吻合度高, 也证实了亚平宁中部的地震构造背景和大多数震源的推断。无人机航磁测量具备的高效性、及时性和高分辨率等特点, 从目前航磁在地震领域的应用实例来看, 无人机航空磁测技术在地震活动分布研究和震源调查方面具有良好的应用前景。

无人机航空磁测除了用于天然磁性源的勘查之外, 还经常用于人造磁性源的探测, 如含金属的废弃油气井、地下的未爆炸物(地雷、哑弹)以及工程管道等等。

随着油气勘探规模日益扩增, 许多废弃油气井释放的有毒有害气体可能污染地下水。据不完全统计, 仅美国就有多达三百多万口废弃油气井, 并且很多废弃油气井被遗忘, 因此探测遗忘废弃油气井并对其封堵管理是十分必要的^[57], 而具有低成本、高效便捷特点的无人机航空磁测则是探测废弃油气井的一个很好选择。Nikulin 等^[111]使用一台大疆经纬 M600 型多旋翼无人机搭载一个 G-858 型铯光泵磁力仪, 对废弃和未标记的油气井进行快速检测和识别, 该应用分别开展了 0.15 m 的地面磁测与 10 m、20 m、40 m 高度无人机航磁测量, 结果如图 9 所示。由图 9 可以看出, 在 50 m 以下开展航磁测量得到的金属套管井磁异常与背景磁场具有明显差异, 随着无人机航磁测量高度的降低, 油气井的磁异常可以从背景场中很好地分离, 该应用表明低空无人机航空磁测对于废弃油气井探测拥有良好的可靠性。

在探测地下磁性物体(未爆炸物、地下金属管道等)方面, 无人机航空磁测对于大规模快速

探测地下物体具有良好的应用前景。Mu等^[63]开发了一种欧拉反褶积法和YOLOv3(you only look once version 3)的组合方法,应用于无人机航空磁测自动估计地下物体位置,该系统通过一架多旋翼无人机搭载两个铯光泵磁力仪进行探测,首次将YOLOv3这种基于深度卷积神经网络的图像和视频检测器应用于无人机航磁力测量领域,该方法优于传统的滑动窗口方法。该应用表明,无人机航空磁测技术与目标识别算法的结合对于快速确定浅地表磁性物体的位置具备高效、经济、可靠的特点。

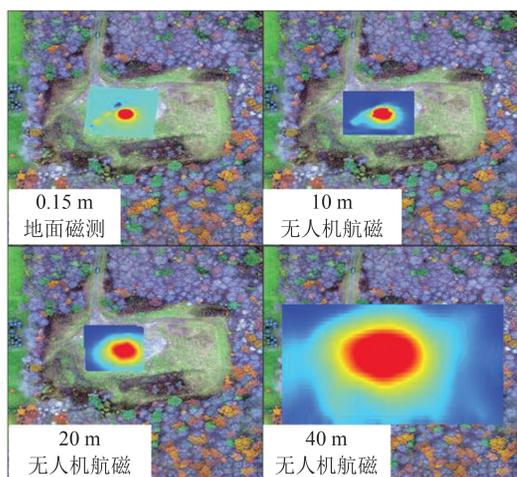


图9 地面磁测与不同高度无人机航磁TMI^[111]

Fig. 9 Ground Magnetic Survey and UAV Aeromagnetic TMI at Different Heights^[111]

5 结 语

无人机航空磁测技术具有高性价比、安全便捷、高效等独有优势,在传统的矿产勘查、地学研究、军事探测等领域发挥着越来越重要的作用。近年来,无人机航空磁测技术在环境保护、工程应用等领域的应用频率也在快速增长,各领域对于无人机航空磁测的需求都在不断提高。随着无人机技术快速发展,实现飞行智能化、多机协同作业和任务自主智能是无人机系统发展的趋势^[112],目前无人机航磁系统的智能化程度仍然较低。此外,研发与无人机相匹配的航空磁力仪也是一个重点内容。总的来看,无人机航空磁测从硬件到软件还存在一些需要考虑和解决的问题。

在硬件方面,无人机航磁系统包括机载磁力仪和无人机平台两个方面。目前无人机搭载的磁力仪测量以磁总场和磁场梯度信息为主,在磁场矢量信息采集方面还有不足,发展高精度三分量磁测以及全张量磁梯度测量是未来无人机航

磁发展的需要^[113],同时无人机航空磁力仪设计需要考虑轻量化、低能耗、高灵敏度、高分辨率、抗干扰等^[114]。无人机平台存在的问题主要是续航时长不足、有效搭载质量小以及机体电磁干扰等问题,应从材料、结构、动力等综合考虑设计航空磁测专用无人机,使无人机航磁系统向模块化、智能化、集成化发展,能够最大程度发挥出无人机航空磁测的独特优势。此外,多机协同作业在其他领域已有相关应用,因此无人机航磁勘探的多机协同作业对于实现多种地球物理勘探技术的联合探测是不错的选择。

在软件方面,航磁补偿问题一直是航磁物探技术的一个重点,目前大部分补偿方式仍然沿用传统有人驾驶飞机的航磁补偿方法,所以在考虑无人机特殊的结构和电子设备布局下,开发针对无人机平台的实时高精度补偿软件有助于进一步提高无人机航磁测量数据的精度。此外,无人机航磁系统任务自主智能化作业有望通过飞行控制算法优化和机载智能计算机程序设计得以实现,这有助于提高无人机航磁低空测量的稳定性和安全性、节省人力成本以及获取更高分辨率和精度的航磁数据。

参 考 文 献

- [1] Xiong Shengqing. Innovation and Application of Airborne Geophysical Exploration Technology [J]. *Journal of Geomechanics*, 2020, 26(5): 791-818. (熊盛青. 航空地球物理勘查科技创新与应用[J]. 地质力学学报, 2020, 26(5): 791-818.)
- [2] Shirman B, Rybakov M, Beyth M, et al. Deep Structure of the Mount Amram Igneous Complex, Interpretation of Magnetic and Gravity Data [J]. *Geophysical Journal International*, 2015, 200(3): 1362-1373.
- [3] Li Xiao, Tong Jing, Zhang Wan, et al. Application of Airborne Geophysical Survey in Antarctica [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2022, 46(1): 12-21. (李筱, 佟晶, 张婉, 等. 航空地球物理勘探在南极调查中的应用[J]. 物探与化探, 2022, 46(1): 12-21.)
- [4] Chen Bin, Xiong Shengqing, Zhao Baimin. The Preliminary Study on Flight Altitude of Aero-magnetic Survey [J]. *Progress in Geophysics*, 2010, 25(3): 957-961. (陈斌, 熊盛青, 赵百民. 航空磁测飞行高度的初步研究[J]. 地球物理学进展, 2010, 25(3): 957-961.)
- [5] Li Teng, Zhang Baogang, Cheng Xiao, et al. Applications of UAVs in Antarctic Scientific Research:

- Progress and Prospect[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, 47(5): 651-664. (李腾,张宝钢,程晓,等. 无人机在南极科学研究的应用:进展与展望[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2022, 47(5): 651-664.)
- [6] Erdelj M, Krol M, Natalizio E. Wireless Sensor Networks and Multi-UAV Systems for Natural Disaster Management[J]. *Computer Networks*, 2017, 124: 72-86.
- [7] Johnston D W. Unoccupied Aircraft Systems in Marine Science and Conservation[J]. *Annual Review of Marine Science*, 2019, 11: 439-463.
- [8] Li Deren, Li Ming. Research Advance and Application Prospect of Unmanned Aerial Vehicle Remote Sensing System [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2014, 39(5): 505-513. (李德仁,李明. 无人机遥感系统的研究进展与应用前景[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2014, 39(5): 505-513.)
- [9] Motlagh N H, Taleb T, Arouk O. Low-altitude Unmanned Aerial Vehicles-based Internet of Things Services: Comprehensive Survey and Future Perspectives [J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2016, 3(6): 899-922.
- [10] Bian J, Wang X, Gao S. Experimental Aeromagnetic Survey Using a Rotary-wing Aircraft System: A Case Study in Heizhugou, Sichuan, China[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2021, 184: 104245.
- [11] Yu Changchun, Fan Zhengguo, Wang Naidong, et al. High-resolution Aeromagnetic Exploration Methods and Their Application in Daye Iron Mines[J]. *Progress in Geophysics*, 2007, 22(3): 979-983. (于长春,范正国,王乃东,等. 高分辨率航磁方法及在大冶铁矿区的应用[J]. 地球物理学进展, 2007, 22(3): 979-983.)
- [12] 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 and Space*, 2013, 65(6): 657-666.
- [13] Stoll J B. Unmanned Aircraft Systems for Rapid Near Surface Geophysical Measurements [J]. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2013, XL-1/W2(1): 391-394.
- [14] Pei Y L, Liu B H, Hua Q F, et al. An Aeromagnetic Survey System Based on an Unmanned Autonomous Helicopter: Development, Experiment, and Analysis [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2017, 38(8-10): 3068-3083.
- [15] Jiang D D, Zeng Z F, Zhou S, et al. Integration of an Aeromagnetic Measurement System Based on an Unmanned Aerial Vehicle Platform and Its Application in the Exploration of the Ma'anshan Magnetite Deposit [J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 189576-189586.
- [16] Martelet G, Gloaguen E, Døssing A, et al. Airborne/UAV Multisensor Surveys Enhance the Geological Mapping and 3D Model of a Pseudo-skarn Deposit in Ploumanac'h, French Brittany [J]. *Minerals*, 2021, 11(11): 1259.
- [17] Zhang Wenjie, Yang Sheng, Guo Gang, et al. The Application Prospect of Light UAV Aeromagnetic Survey in Mineral Exploration[J]. *Mineral Exploration*, 2021, 12(4): 989-999. (张文杰,杨生,郭刚,等. 轻型无人机航磁调查系统及在矿产勘查中的应用前景[J]. 矿产勘查, 2021, 12(4): 989-999.)
- [18] Zhang Fuming, Wen Jianliang, Zhao Xinghui, et al. Development and Application of Aeromagnetic Measurement System for Unmanned Helicopter [J]. *Progress in Geophysics*, 2019, 34(4): 1694-1699. (张富明,温建亮,赵兴辉,等. 无人直升机航磁测量系统的研发与应用[J]. 地球物理学进展, 2019, 34(4): 1694-1699.)
- [19] Cui Zhiqiang, Xu Zhili, Meng Qingmin. 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. (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.)
- [20] Vadim T, Alexander P, Vasily A, et al. Unmanned Airborne Magnetic Survey Technologies: Present and Future[M]//Recent Advances in Rock Magnetism, Environmental Magnetism and Paleomagnetism, Cham: Springer, 2019.
- [21] Zhang Hongrui, Fan Zhengguo. Recent Advances in Aerogeophysical Techniques Used Abroad[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2007, 31(1): 1-8. (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.)
- [22] Cui Zhiqiang, Xu Zhili, Li Junfeng, et al. Status and Prospect of Research and Development and Application of UAV Airborne Geophysical Exploration Technology [J]. *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration*, 2016, 38(6): 740-745. (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.)
- [23] Wu Taiqi, Xu Xiuming, Ren Laiping, et al. Progresses and Perspectives of Marine Aeromagnetic Technology in UAV [J]. *Hydrographic Surveying and Charting*, 2017, 37(6): 17-20. (吴太旗, 徐修明, 任来平, 等. 无人机海洋航磁测量技术进展与展望[J]. 海洋测绘, 2017, 37(6): 17-20.)
- [24] Barnard J A. The Use of Unmanned Aircraft in Oil, Gas and Mineral E+P Activities [J]. *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, 2008, 27(1): 3713.
- [25] Funaki M, Higashino S I, Sakanaka S, et al. Small Unmanned Aerial Vehicles for Aeromagnetic Surveys and Their Flights in the South Shetland Islands, Antarctica [J]. *Polar Science*, 2014, 8(4): 342-356.
- [26] Parshin A V, Morozov V A, Blinov A V, et al. Low-altitude Geophysical Magnetic Prospecting Based on Multirotor UAV as a Promising Replacement for Traditional Ground Survey [J]. *Geo-Spatial Information Science*, 2018, 21(1): 67-74.
- [27] Walter C, Braun A, Fotopoulos G. High-resolution Unmanned Aerial Vehicle Aeromagnetic Surveys for Mineral Exploration Targets [J]. *Geophysical Prospecting*, 2020, 68(1): 334-349.
- [28] Li Wenjie, Li Junfeng, Liu Shikai, et al. The Progress in the Development of the Integrated UAV Magnetic & Radiation Survey System [J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2014, 35(4): 399-403. (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.)
- [29] Li Junfeng, Li Wenjie, Qin Xuwen, 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. (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.)
- [30] Li Fei, Ding Zhiqiang, Cui Zhiqiang, et al. Application Demonstration of the CH-3 UAV-borne Magnetic Survey System in Different Terrain Areas of Xinjiang [J]. *Geology and Exploration*, 2018, 54(4): 735-746. (李飞, 丁志强, 崔志强, 等. CH-3无人机航磁测量系统在我国新疆不同地形区的应用示范[J]. 地质与勘探, 2018, 54(4): 735-746.)
- [31] Ju Xing, Niu Haibo, Guo Hua, et al. Safety Analysis and Quality Evaluation of the Aeromagnetic Measurement System of CH-4 UAV [J]. *Progress in Geophysics*, 2020, 35(4): 1565-1571. (鞠星, 牛海波, 郭华, 等. 彩虹4无人机航磁测量系统的安全分析与质量评价[J]. 地球物理学进展, 2020, 35(4): 1565-1571.)
- [32] Li Zhipeng, Gao Song, Wang Xuben. New Method of Aeromagnetic Surveys with Rotorcraft UAV in Particular Areas [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2018, 61(9): 3825-3834. (李志鹏, 高嵩, 王绪本. 特殊区域旋翼无人机航磁测量研究[J]. 地球物理学报, 2018, 61(9): 3825-3834.)
- [33] Wu Xueshan, Huang Song, Yu Changming, et al. Application of Rotorcraft UAV Aeromagnetic Measurement System in Beizhan Iron Deposit [J]. *Xinjiang Geology*, 2021, 39(4): 667-670. (武雪山, 黄松, 于昌明, 等. 旋翼无人机航磁测量系统在备战铁矿的应用[J]. 新疆地质, 2021, 39(4): 667-670.)
- [34] Liu Jianxin, Liu Huipeng, Liu Rong, et al. Aeromagnetic Survey Using a Multirotor UAV: A Case Study in Jinping, Yunnan, China [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2022, 4: 1-18.
- [35] Zhou Puzhi, Tang Minqiang, Liu Diren, et al. Application Research of New Domestic UAV Aeromagnetic System [J]. *Hydrographic Surveying and Charting*, 2022, 42(1): 30-35. (周普志, 汤民强, 刘迪仁, 等. 新型国产无人机航磁系统的应用研究[J]. 海洋测绘, 2022, 42(1): 30-35.)
- [36] Wang Qingyi, Xing Yingdi, Jiang Bin, et al. The Design and Development of the MAMSS-1 Type Minimum Altitude High-Precision Aeromagnetic System [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2010, 34(6): 712-716. (王庆乙, 行英弟, 蒋彬, 等. MAMSS-1超低空高精度航磁系统的研制[J]. 物探与化探, 2010, 34(6): 712-716.)
- [37] An Shaole, Zhou Kefa, Wang Jinlin, et al. Aeromagnetic Survey System with Dynamic Delta Wing and Its Applications in Kalatage Exploration Area [J]. *Progress in Geophysics*, 2019, 34(3): 1170-1175. (安少乐, 周可法, 王金林, 等. 动力三角翼平台航磁测量系统及其在卡拉塔格勘查区的应用[J]. 地球物理学进展, 2019, 34(3): 1170-1175.)
- [38] Singhal G, Bansod B, Mathew L. Unmanned Aerial Vehicle Classification, Applications and Challenges: A Review [J]. *Preprints*, 2018, DOI: 10.20944/preprints201811.0601.v1.
- [39] Kim B, Lee S, Park G, et al. Development of an Unmanned Airship for Magnetic Exploration [J]. *Exploration Geophysics*, 2021, 52(4): 462-467.
- [40] Yu Xianli, Liu Shun'an, Liu Jialin. Application of Unmanned Aerial Vehicle for Geophysical Surveying [J]. *China Mining Magazine*, 2012, 21(7): 107-109. (于显利, 刘顺安, 刘佳琳. 无人机在地球物

- 理探测中的应用[J]. 中国矿业, 2012, 21(7): 107-109.)
- [41] Cui Zhiqiang, Li Fei, Xu Zhili. Application Effect Evaluation of the Rainbow-3 UAV Aeromagnetic Survey System[J]. *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration*, 2019, 41(6): 787-797. (崔志强, 李飞, 胥值礼. 彩虹-III型无人机航空磁测系统应用示范效果评述[J]. 物探化探计算技术, 2019, 41(6): 787-797.)
- [42] Cui Zhiqiang, Xu Zhili, Meng Qingmin, et al. Review on Exploration Effect and Characteristics of Aeromagnetic Survey System Based on Current Three Types Flying-platform[J]. *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration*, 2015, 37(4): 437-443. (崔志强, 胥值礼, 孟庆敏, 等. 现行三类平台航磁勘查系统特点及勘查效果评述[J]. 物探化探计算技术, 2015, 37(4): 437-443.)
- [43] Wood A, Cook I, Doyle B, et al. Experimental Aeromagnetic Survey Using an Unmanned Air System [J]. *The Leading Edge*, 2016, 35(3): 270-273.
- [44] Maire P L, Bertrand L, Munsch M, et al. Aerial Magnetic Mapping with an Unmanned Aerial Vehicle and a Fluxgate Magnetometer: A New Method for Rapid Mapping and Upscaling from the Field to Regional Scale[J]. *Geophysical Prospecting*, 2020, 68(7): 2307-2319.
- [45] Wang Meng, Liu Yuanyuan, Wang Dayong, et al. Application Effect Analysis of UAV Aeromagnetic Survey Technology in Desert and Semidesert Regions [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2022, 46(1): 206-213. (王猛, 刘媛媛, 王大勇, 等. 无人机航磁测量在荒漠戈壁地区的应用效果分析[J]. 物探与化探, 2022, 46(1): 206-213.)
- [46] Malehmir A, Dynesius L, Paulusson K, et al. The Potential of Rotary-wing UAV-based Magnetic Surveys for Mineral Exploration: A Case Study from Central Sweden [J]. *The Leading Edge*, 2017, 36(7): 552-557.
- [47] Shahsavani H. An Aeromagnetic Survey Carried out Using a Rotary-wing UAV Equipped with a Low-cost Magneto-inductive Sensor [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2021, 42(23): 8805-8818.
- [48] Cui Zhiqiang, Xu Zhili, Li Fei, et al. Deep Geological Structure Beneath the Southwest Tarim Basin Derived from High-Precision Aeromagnetic Survey Data [J]. *Geology and Exploration*, 2020, 56(6): 1238-1250. (崔志强, 胥值礼, 李飞, 等. 基于高精度航空磁测的塔西南坳陷深部地质构造研究[J]. 地质与勘探, 2020, 56(6): 1238-1250.)
- [49] Lu Qihu, Peng Kezhong, Yi Bijin. The Development of Geophysical Instrumentation in China [J]. *Progress in Geophysics*, 2007, 22(4): 1332-1337. (陆其鹤, 彭克中, 易碧金. 我国地球物理仪器的发展[J]. 地球物理学进展, 2007, 22(4): 1332-1337.)
- [50] Luo Yao, Duan Shuling, Wang Jinlong, et al. Key Indicators Testing for AGS-863 Three Axis Airborne Magnetic Gradiometer [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2011, 35(5): 620-625. (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.)
- [51] Jiang Zhipeng, Zhao Wei, Qu Kaifeng. Development and Application of Magnetic Field Measurement Technology [J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2008, 45(4): 1-5. (姜智鹏, 赵伟, 屈凯峰. 磁场测量技术的发展及其应用[J]. 电测与仪表, 2008, 45(4): 1-5.)
- [52] Zhou Wenyue, Huang Dalian, Yu Xianli, et al. Attitude Affection and Correction of Aircraft in Airborne Survey [J]. *Global Geology*, 2015, 34(1): 248-253. (周文月, 黄大年, 于显利, 等. 航磁测量飞机飞行姿态影响及矫正[J]. 世界地质, 2015, 34(1): 248-253.)
- [53] Qiao Zhongkun, Ma Guoqing, Zhou Wenna, et al. Research on the Comprehensive Compensation of Aeromagnetic System Error of Multi-rotor UAV [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2020, 63(12): 4604-4612. (乔中坤, 马国庆, 周文纳, 等. 多旋翼无人机航磁系统误差综合补偿研究[J]. 地球物理学报, 2020, 63(12): 4604-4612.)
- [54] Kaneko T, Koyama T, Yasuda A, et al. Low-altitude Remote Sensing of Volcanoes Using an Unmanned Autonomous Helicopter: An Example of Aeromagnetic Observation at Izu-Oshima Volcano, Japan [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2011, 32(5): 1491-1504.
- [55] Cunningham M, Samson C, Laliberté J, et al. Inversion of Magnetic Data Acquired with a Rotary-wing Unmanned Aircraft System for Gold Exploration [J]. *Pure and Applied Geophysics*, 2021, 178(2): 501-516.
- [56] Glen J M G, Egger A E, Ippolito C, et al. Correlation of Geothermal Springs with Sub-surface Fault Terminations Revealed by High-Resolution, UAV-Acquired Magnetic Data [C]//Proceedings of the 38th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering,

- Stanford, USA, 2013.
- [57] De Smet T S, Nikulin A, Romanzo N, et al. Successful Application of Drone-based Aeromagnetic Surveys to Locate Legacy Oil and Gas Wells in Cattaraugus County, New York[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2021, 186: 104250.
- [58] Li Fei, Dong Hao, Cui Zhiqiang, et al. Application of Integrated Geophysical Survey Technology in the Spatial Distribution of Benchahe Fault in Rudong Mudflat Area, Jiangsu Province[J]. *Geology and Exploration*, 2020, 56(3): 566-579. (李飞, 董浩, 崔志强, 等. 滩涂区综合地球物理调查技术在嵛茶河断裂空间展布中的应用[J]. *地质与勘探*, 2020, 56(3): 566-579.)
- [59] Williams P M. Aeromagnetic Compensation Using Neural Networks[J]. *Neural Computing & Applications*, 1993, 1(3): 207-214.
- [60] Wu Peilin, Zhang Qunying, Li Guang, et al. Research on Compensation Algorithm of Three Axis Gradient Aeromagnetic Prospecting System [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2017, 39(12): 3030-3038. (吴佩霖, 张群英, 李光, 等. 航磁全轴总场梯度系统补偿算法研究[J]. *电子与信息学报*, 2017, 39(12): 3030-3038.)
- [61] Ma M, Zhou Z J, Cheng D F. A Dual Estimate Method for Aeromagnetic Compensation[J]. *Measurement Science and Technology*, 2017, 28(11): 115904.
- [62] Wang Jie, Guo Ziqi, Qiao Yanchao. Magnetic Compensation of the Fixed-wing UAV Aeromagnetic Detection System[J]. *Progress in Geophysics*, 2015, 30(6): 2931-2937. (王婕, 郭子祺, 乔彦超. 固定翼无人机航磁测量系统的磁补偿问题初探[J]. *地球物理学进展*, 2015, 30(6): 2931-2937.)
- [63] Mu Y X, Zhang X J, Xie W P, et al. Automatic Detection of Near-surface Targets for Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Magnetic Survey[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(3): 452.
- [64] Walter C, Braun A, Fotopoulos G. Spectral Analysis of Magnetometer Swing in High-resolution UAV-borne Aeromagnetic Surveys [C]//2019 IEEE Systems and Technologies for Remote Sensing Applications Through Unmanned Aerial Systems (STRATUS), Rochester, USA, 2019.
- [65] Walter C, Braun A, Fotopoulos G. Characterizing Electromagnetic Interference Signals for Unmanned Aerial Vehicle Geophysical Surveys[J]. *Geophysics*, 2021, 86(6): 21-32.
- [66] Døssing A, Silva E, Martelet G, et al. A High-Speed, Light-weight Scalar Magnetometer Bird for Km Scale UAV Magnetic Surveying: On Sensor Choice, Bird Design, and Quality of Output Data [J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(4): 649.
- [67] Xi Yongzai, Wu Shan, Liao Guixiang, et al. An Application Test of UAV Aeromagnetic Survey in Geological Survey of the Tidal Flat Area[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2021, 45(2): 355-360. (西永在, 吴珊, 廖桂香, 等. 无人机航空磁测在滩涂区地质调查的应用试验[J]. *物探与化探*, 2021, 45(2): 355-360.)
- [68] Parvar K, Braun A, Layton-Matthews D, et al. UAV Magnetometry for Chromite Exploration in the Samail Ophiolite Sequence, Oman[J]. *Journal of Unmanned Vehicle Systems*, 2018, 6:57-69.
- [69] Kim B, Jeong S, Bang E, et al. Investigation of Iron Ore Mineral Distribution Using Aero-magnetic Exploration Techniques: Case Study at Pocheon, Korea[J]. *Minerals*, 2021, 11(7): 665.
- [70] Wang Jie, Guo Ziqi, Liu Jianying. Analysis on Magnetic Compensation Model of Fixed-wing UAV Aeromagnetic Detection System[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2016, 37(11): 3435-3443. (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.)
- [71] Zhao Shuangqiu. The Study of UAV Aeromagnetic System and Compensation[D]. Changsha: Central South University, 2011. (赵双求. UAV航磁系统及补偿研究[D]. 长沙: 中南大学, 2011.)
- [72] Zhu Xuejun. Study on the Compensation Method of Vehicle Interferential Magnetic Field in UAV Aeromagnetic Survey[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2014. (朱学军. 无人机航磁测量中载体干扰磁场补偿方法研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2014.)
- [73] Liu Shoushan, Tang Linmu, Xu Qingfeng, et al. Investigation of Aeromagnetic Compensation Technology and Performance Assessment Method[J]. *Journal of Naval Aeronautical and Astronautical University*, 2016, 31(6): 641-647. (刘首善, 唐林牧, 许庆丰, 等. 航磁补偿技术及补偿质量的评价方法[J]. *海军航空工程学院学报*, 2016, 31(6): 641-647.)
- [74] Tolles W E, Lawson J D. Magnetic Compensation of MAD Equipped Aircraft [J]. *Airborne Instruments Lab*, 1950, 20(1): 201.
- [75] Meng Qingkui, Zhou Dewen, Gao Wei, et al. History and Prospects of Aeromagnetic Compensation Technologies Used in China and Abroad[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2017, 41

- (4): 694-699. (孟庆奎, 周德文, 高维, 等. 国内外航磁补偿技术历史与展望[J]. 物探与化探, 2017, 41(4): 694-699.)
- [76] Bickel S H. Small Signal Compensation of Magnetic Fields Resulting from Aircraft Maneuvers[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1979, 15(4): 518-525.
- [77] Leach B W. Aeromagnetic Compensation as a Linear Regression Problem[M]//Information Linkage Between Applied Mathematics and Industry. Amsterdam: Elsevier, 1980: 139-161.
- [78] Liu Dehua. Research on Magnetic Interference Compensation Algorithm for Aeromagnetic Measurement Platform [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2019. (刘德华. 航磁测量平台磁干扰补偿算法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2019.)
- [79] Li Biaofang, Wang Zhendong. Aircraft Magnetic Interference and Electronic Compensation Method[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 1979, 3(1): 35-43. (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.)
- [80] Zeng Peiwei. Mobile Aeromagnetic Compensation Method [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 1981, 11(3): 94-102. (曾佩韦. 机动式航磁补偿法[J]. 长春地质学院学报, 1981, 11(3): 94-102.)
- [81] He Jingli. Automatic Compensation Method of Aircraft Magnetic Field[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 1985, 9(6): 464-469. (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.)
- [82] Wu Wenfu. 16 Automatic Magnetic Compensation Systems[J]. *Acoustics and Electrical Engineering*, 1993(4): 14-21. (吴文福. 16项自动磁补偿系统[J]. 声学与电子工程, 1993(4): 14-21.)
- [83] Li Ting, Wang Shicheng, Zhang Jinsheng. A Review on Geomagnetic Measurement Error Compensation Technologies[J]. *Electronics Optics & Control*, 2018, 25(6): 66-71. (李婷, 王仕成, 张金生. 磁场测量误差补偿技术综述[J]. 电光与控制, 2018, 25(6): 66-71.)
- [84] Leliak P. Identification and Evaluation of Magnetic-field Sources of Magnetic Airborne Detector Equipped Aircraft [J]. *IRE Transactions on Aerospace and Navigational Electronics*, 1961, 8(3): 95-105.
- [85] Han X Q, Li W, Jian L, et al. Aeromagnetic Compensation of Rotor UAV Based on Least Squares [C]//Chinese Control Conference, Nanjing, China, 2018.
- [86] Zhang Ning, Lin Chunsheng. Modeling and Compensation of Aircraft Magnetic Interference Based on Ameliorated Ridge Estimation [J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2012, 34(5): 887-891. (张宁, 林春生. 基于改进岭估计的飞行器背景磁干扰的建模与补偿[J]. 系统工程与电子技术, 2012, 34(5): 887-891.)
- [87] Pang Xueliang, Lin Chunsheng, Zhang Ning. Parameter Estimation of Airplane Magnetic Model Based on Truncated Singular Value Decomposition [J]. *Journal of Detection & Control*, 2009, 31(5): 48-51. (庞学亮, 林春生, 张宁. 飞机磁场模型系数的截断奇异值分解法估计[J]. 探测与控制学报, 2009, 31(5): 48-51.)
- [88] Gu B, Li Q L, Liu H Y. Aeromagnetic Compensation Based on Truncated Singular Value Decomposition with an Improved Parameter-choice Algorithm [C]//The 6th International Congress on Image and Signal Processing (CISP), Hangzhou, China, 2014.
- [89] Zhang D L, Huang D N, Lu J W, et al. Aeromagnetic Compensation with Partial Least Square Regression [J]. *ASEG Extended Abstracts*, 2016, (1): 1-3.
- [90] Zhao G Y, Han Q, Peng X, et al. An Aeromagnetic Compensation Method Based on a Multimodel for Mitigating Multicollinearity [J]. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 2019, 19(13): 2931.
- [91] Wu P L, Zhang Q Y, Chen L Z, et al. Aeromagnetic Compensation Algorithm Based on Principal Component Analysis [J]. *Journal of Sensors*, 2018, 4: 1-7.
- [92] Zhang B G, Guo Z Q, Qiao Y C. A Simplified Aeromagnetic Compensation Model for Low Magnetism UAV Platform [C]//IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Vancouver, Canada, 2011.
- [93] Dou Z J, Han Q, Niu X M, et al. An Adaptive Filter for Aeromagnetic Compensation Based on Wavelet Multiresolution Analysis [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2016, 13(8): 1069-1073.
- [94] Noriega G, Marszalkowski A. Adaptive Techniques and Other Recent Developments in Aeromagnetic Compensation [J]. *First Break*, 2017, 35(9): 31-38.
- [95] Feng Y Q, Zhang Q M, Zheng Y X, et al. An Improved Aeromagnetic Compensation Method Robust to Geomagnetic Gradient [J]. *Applied Sciences*, 2022, 12(3): 1490.

- [96] Ma M, Cheng D F, Chalup S, et al. Uncertainty Estimation in the Neural Model for Aeromagnetic Compensation [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2018, 15(12): 1942-1946.
- [97] Yu P, Zhao X, Jiao J, et al. An Improved Neural Network Method for Aeromagnetic Compensation [J]. *Measurement Science and Technology*, 2021, 32(4): 045106.
- [98] Jiao J, Yu P, Zhao X, et al. Real-time Aeromagnetic Compensation with Compressed and Accelerated Neural Networks[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2022, 19: 1-5.
- [99] Han Q, Dou Z J, Tong X J, et al. A Modified Tolles - Lawson Model Robust to the Errors of the Three-axis Strapdown Magnetometer [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2017, 14(3): 334-338.
- [100] Jirigalatu M, Krishna V, Silva E, et al. Experiments on Magnetic Interference for a Portable Airborne Magnetometry System Using a Hybrid Unmanned Aerial Vehicle (UAV)[J]. *Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems*, 2021, 10(1): 25-34.
- [101] Tuck L E, Samson C, Laliberté J, et al. Magnetic Interference Mapping of Four Types of Unmanned Aircraft Systems Intended for Aeromagnetic Surveying [J]. *Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems*, 2021, 10(1): 101-112.
- [102] Cao Z W, Chen D S, Yu F, et al. EMI Suppression of UAV Power in Aeromagnetic Survey [J]. *IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine*, 2013, 2(1): 45-53.
- [103] Forrester R, Huq M S, Ahmadi M, et al. Magnetic Signature Attenuation of an Unmanned Aircraft System for Aeromagnetic Survey [J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2014, 19(4): 1436-1446.
- [104] Billings S, Wright D. Optimal Total-field Magnetometer Configuration for Near-surface Applications [J]. *The Leading Edge*, 2009, 28(5): 522-527.
- [105] Walter C A, Braun A, Fotopoulos G. Impact of Three-dimensional Attitude Variations of an Unmanned Aerial Vehicle Magnetometry System on Magnetic Data Quality[J]. *Geophysical Prospecting*, 2019, 67(2): 465-479.
- [106] Jackisch R, Madriz Y, Zimmermann R, et al. DroneBorne Hyperspectral and Magnetic Data Integration: Otanmäki FeTiV Deposit in Finland [J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(18): 2084.
- [107] Jiao Liguang, Lei Yu, Tu Jiyao, et al. A Review on the Analysis of Aeromagnetic Anomaly and Its Geological and Tectonic Applications [J]. *Reviews of Geophysics and Planetary Physics*, 2022, 53(3): 331-358. (焦立果, 雷宇, 涂继耀, 等. 航磁异常分析技术及其在地质构造中的应用[J]. 地球与行星物理理论评, 2022, 53(3): 331-358.)
- [108] Yan Yafen, Teng Jiwen, Ruan Xiaomin, et al. Aeromagnetic Field Characteristics and the Wenchuan Earthquakes in the Longmenshan Mountains and Adjacent Areas [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2016, 59(1): 197-214. (闫亚芬, 滕吉文, 阮小敏, 等. 龙门山和相邻地域航磁场特征与汶川大地震 [J]. 地球物理学报, 2016, 59(1): 197-214.)
- [109] Kolawole F, Atekwana E A, Malloy S, et al. Aeromagnetic, Gravity, and Differential Interferometric Synthetic Aperture Radar Analyses Reveal the Causative Fault of the 3 April 2017 Mw 6.5 Moiyabana, Botswana, Earthquake [J]. *Geophysical Research Letters*, 2017, 44(17): 8837-8846.
- [110] Minelli L, Speranza F, Nicolosi I, et al. Aeromagnetic Investigation of the Central Apennine Seismogenic Zone (Italy): From Basins to Faults [J]. *Tectonics*, 2018, 37(5): 1435-1453.
- [111] Nikulin A, de Smet T S. A UAV-based Magnetic Survey Method to Detect and Identify Orphaned Oil and Gas Wells [J]. *The Leading Edge*, 2019, 38(6): 447-452.
- [112] Fan Bangkui, Zhang Ruiyu. Unmanned Aircraft System and Artificial Intelligence [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2017, 42(11): 1523-1529. (樊邦奎, 张瑞雨. 无人机系统与人工智能 [J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2017, 42(11): 1523-1529.)
- [113] Lin Jun, Diao Shu, Zhang Yang, et al. Research Progress of Geophysical Vector Magnetic Field Survey Technology [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2017, 62(23): 2606-2618. (林君, 刁庶, 张洋, 等. 地球物理矢量场磁测技术的研究进展 [J]. 科学通报, 2017, 62(23): 2606-2618.)
- [114] Pisciotta A, Vitale G, Scudero S, et al. A Lightweight Prototype of a Magnetometric System for Unmanned Aerial Vehicles [J]. *Sensors*, 2021, 21(14): 4691.