

pT级多旋翼无人机量子磁测的优势与挑战

王赟^{1*}, 史钰峰², 韩琦³, 王言章⁴, 张桂迎⁵, 郭良辉¹, 姚长利¹, 卿昊⁶, 马国庆⁴, 周晓权⁷, 戴佳栋^{1*}, 刘宗旭¹, 王光杰⁸

1. 中国地质大学(北京), 深部探测与成像全国重点实验室, 北京 100083

2. 山东航天电子技术研究所, 烟台 264000

3. 哈尔滨工业大学计算学部, 哈尔滨 150001

4. 吉林大学, 深部探测与成像全国重点实验室, 长春 130021

5. 浙江工业大学物理学院, 杭州 310014

6. 加泰科(深圳)有限公司, 深圳 518100

7. 北京优赛寰宇科技有限公司, 北京 100043

8. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029

* 联系人, E-mail: yunwang@mail.iggcas.ac.cn; djd4306@163.com

2025-12-05 收稿, 2026-01-19 修回, 2026-02-06 接受, 2026-02-21 网络版发表

国家科技重大专项(深地专项)(2024ZD1002700)资助

摘要 综合调研国内外无人机航磁技术的现状发现, 除了固定翼和复合翼无人机通过大翼展规避无人机磁扰动对高灵敏度量子磁测的影响, 实现了几十至十几pT的探测精度, 多旋翼无人机量子磁测实际应用的精度只有nT级, 远低于理论预期的pT级; 地球磁场环境中静动态磁力仪、无人机以及二者复合系统的磁干扰极其复杂, 而匹配的软硬件系统优化、补偿技术缺失是造成多旋翼无人机量子磁测性能劣化的主要原因。这一性能劣化的实质是地球内外源场、二次感应场、磁力仪与无人机及其搭载组件的材料磁性及其感应磁场和动态电磁涡流扰动相互耦合机理不明, 造成多旋翼无人机量子磁测系统的静动态扰动特征不清; 尤其传统日变校正与正常场校正等技术只能达到nT级。深入剖析认为, 只有借助于大型零磁或稳磁空间中的移动模拟系统, 配合以超高灵敏度的量子磁传感阵列, 通过系统的多旋翼无人机和量子磁力仪及其复合系统的静动态物理、数值模拟实验, 积累足够的机器学习样本, 在人工智能技术的支持下, 才能突破T-L模型局限性等诸多技术瓶颈, 实现颠覆性的亚nT或pT级精度的量子磁测。

关键词 航磁, 无人机, 多旋翼, 量子磁力仪, 性能劣化, pT级

1 引言

航磁以其高效率的优势在资源勘探、地质调查、工程勘测、科学研究和军事探潜等领域获得了广泛的应用。传统航空磁测利用有人驾驶的大型固定翼飞机、直升机搭载质子或三分量磁通门、光泵磁力仪进行不同高度的飞测, 精度可达nT(nano-Tesla, 纳特)级, 基本满足大部分领域的需求^[1-8]。近年来, 随着超高灵敏度

(pT(pico-Tesla, 皮特)-fT(femo-Tesla, 飞特)级)量子磁传感器的出现, 搭载于大型固定翼无人机平台的光泵磁力仪航磁测量已突破亚nT级的探测精度^[9], 引发人们更大的期望: 能否通过具有更低成本优势的多旋翼无人机与量子磁力仪的结合, 实现变革性或颠覆性的pT和fT级磁异常探测, 以满足深部地下矿产的极弱磁异常或潜艇磁尾流Debye效应的探测需求^[10-15]。为此,

引用格式: 王赟, 史钰峰, 韩琦, 等. pT级多旋翼无人机量子磁测的优势与挑战. 科学通报, 2026, 71: 3198–3215

Wang Y, Shi Y, Han Q, et al. Advantages and challenges of pT-level quantum magnetic surveying mounted on multi-rotor UAVs (in Chinese). Chin Sci Bull, 2026, 71: 3198–3215, doi: [10.1360/CSB-2025-5877](https://doi.org/10.1360/CSB-2025-5877)

本文从无人机、量子磁力仪及其二者集成技术发展的角度,通过国内外的综合调研,结合数值模拟与理论分析,讨论了多旋翼无人机量子磁测的理论优势及其在实际应用中面临的诸多挑战,以期推动领域的研发和科技进步。

1.1 多旋翼无人机的优势

无人机主要可分为多旋翼、无人直升机、固定翼和垂直起降固定翼(又称复合翼)等类型。其中,多旋翼和固定翼是最主要和最具代表性的两种,它们的主要特征和性能优劣对比如表1所示。固定翼无人机代表机型包括航天彩虹系列、翼龙系列无人机,均属于工业级应用的典型。它依靠大型机翼产生升力,具有能耗低、续航时间长(可达数小时)、适合恶劣天气等优点,但它的缺点也很明显:对起降场地要求苛刻,飞行和回收需要更高技巧和专业训练^[16]。多旋翼无人机代表机型——大疆系列是目前市场上消费级和工业级的标杆产品。它除具有表1所列的优点,还具有飞控系统高度自动化、易于操控学习、灵活性高等优点;但有能耗高、续航时间短(一般<1 h)等缺点^[17]。但随着电池与供电技术的发展,大型多旋翼无人机在续航和载荷能力方面已有了很大的提升^[18~21],未来长续航能力可期。垂直起降固定翼无人机属于固定翼与多旋翼的复合型无人机,代表机型包括汉飞鹰SD系列、峰飞航空“盛世龙”、纵横股份CW系列,亦属于工业级无人机。它融合了多旋翼和固定翼的优点,兼具二者优点,适合执行大面积且需要精细巡检的任务,如航磁调查、电网与石油管线的巡查等。但缺点也很明显,包括结构复杂、设计和制造成本更高、涉及多模态飞控转换、操控技术难度大;且垂直起降模式与固定翼模式之间的转换阶段存在一定的故障风险^[22]。

尽管固定翼、多旋翼和垂直起降固定翼无人机在起降方式、作业效率和适用场景上各具特色,但其核心组件和控制算法已高度融合和标准化,如采用通用的飞控系统、发动机、微机电系统惯性传感器和全球导航卫星系统。根据任务需求,如航程、续航时间、挂载重量、旋停要求等,无人机平台能够通过选择通用的核心组件和控制算法实现,而无需重新研发,极大降低了产品成本,提高了系统的可靠性和通用性。这一优势主要来源于无人机系统在核心系统的架构与设备配置上展现出高度的技术共性,均包括: (1) 飞行管理与控制系统(飞控系统),是最核心的硬件与软件综合操控系统, (2) 导航与通信系统包括数据链路,用于在飞行器与地面控制站之间建立双向通信与数传, (3) 任务载荷系统,即搭载的各种辅助设备的统称, (4) 动力与能源系统, (5) 地面控制站,即无人机系统的地面指挥中心。这些共性保障了无人机基本任务的完成——自主稳定飞行、可靠通信、有效执行任务并安全返回。

1.2 量子传感与原子磁力仪的发展

在国际量子理论发展的带动下,基于量子传感的磁力仪研发水平得以大幅度提升。以原子光泵、SERF (spin-exchange relaxation free, 无自旋交换弛豫)和低温超导磁力仪为代表的量子磁测研发日益成熟,推动磁传感精度从nT级向pT和fT级跃迁,如图1所示,为极弱磁异常的探测识别带来了变革性甚至可能颠覆性的理论预期^[23]。其中,光泵磁力仪是基于20世纪50年代诺贝尔奖获得者A. Kastler提出的磁光共振原理实现地球磁总场的测量^[24]。利用该原理制成的测量微弱磁场的磁强计,包括已经广泛使用的光泵磁强计和最新发展的原子磁强计具有高灵敏度、噪声水平可达亚fT级别,且传感器(探头)尺寸达到了立方厘米级、可在室温下

表 1 几种无人机优缺点对比

Table 1 Comparison of advantages and disadvantages of several types of drones

特性	多旋翼无人机	垂起固定翼无人机	固定翼无人机
起降方式	垂直起降, 最灵活	垂直起降, 灵活	需要跑道/弹射, 要求高
悬停能力	长时间悬停	短时悬停	无
续航时间	短(通常<45 min)	中等至长(1~6 h)	长(通常>2 h)
飞行速度	慢	中等至快	快
作业效率	细节作业效率高	大面积作业效率高	超大面积作业效率高
操作复杂度	简单	中等	复杂
主要应用	航拍、巡检、侦察、编队表演	大面积测绘、管线巡检、物流配送	大面积测绘、国土勘测、气象监测
成本	消费级低, 工业级中高	高	通常较高

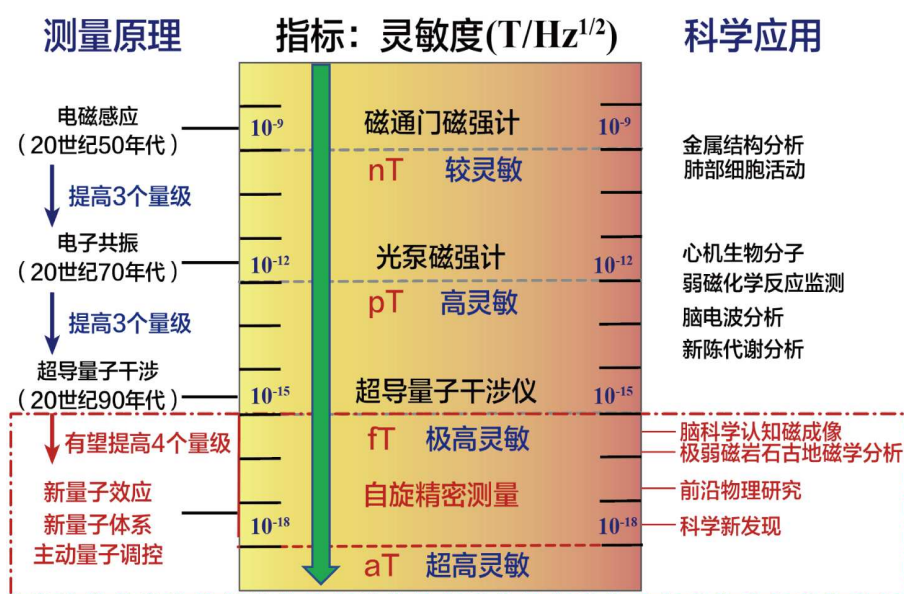


图1 (网络版彩色)磁感应技术发展历程^[23]

Figure 1 (Color online) Development history of magnetic sensing technology^[23]

工作的特点,因而在无人机航磁中得到广泛应用^[25,26].

目前国际上光泵磁力仪已经实现了完全的产业化应用,多款磁力仪产品长期在地球物理、军事等领域占据统治地位,如表S1所示.其中典型代表为航空磁探领域应用的加拿大Scintrex公司的CS铯光泵系列、地面磁探领域加拿大GEM公司的GSMP钾光泵系列、海洋磁探领域美国Geometrics公司的G8铯光泵系列.无人机电载的出现和应用,进一步推动光泵磁力仪向高精度、小型化、低成本、低功耗和大带宽方向发展.例如,为顺应无人机航磁发展趋势,美国QuSpin实现了立方厘米级超小体积全场激光光泵磁力仪的商业化应用,美国Twinleaf公司推出了兼具小体积和高精度的脉冲泵浦激光光泵磁力仪.

我国数家科研机构已经研发了性能参数媲美国外产品的光泵磁力仪产品.例如北京大学^[27,28]、上海通用卫星导航有限公司^[29]、中国科学院空天信息创新研究院^[30]等推出的灯泵式铯光泵磁力仪,中国船舶集团有限公司第七一五研究所、中国自然资源航空物探遥感中心等推出的灯泵式氦4光泵磁力仪^[31~33],浙江工业大学联合杭州量磁科技有限公司、合肥墨测科技有限公司、中国航天科工三院33所等也推出了小体积激光光泵磁力仪^[34].然而,对标光泵磁力仪的国际产业化成熟度,我国的光泵磁力仪仍处于产业化发展的

初期阶段.虽然我国光泵磁力仪已经得到了长足发展,磁力仪性能指标不亚于国外同类产品,如表S1所示.但是所研发的产品相较于国外的成熟商品迭代次数较少,一些产品依然停留在科研院所研制的原理样机层次,产学研用与商品化程度相比国外依然存在差距.

1.3 无人机航磁的现状

无人机技术的发展带动航空磁测进入量子磁测仪器搭载多旋翼无人机、固定翼、复合翼的快速发展通道^[35~43].其中,国外固定翼无人机磁探测技术起步较早,早在20世纪90年代,美国军方率先将磁力仪集成到无人机平台,用于反潜和战场侦察^[44,45].当前,美国、加拿大和欧洲国家处于国际领先地位,在高精度传感器研制、抗干扰算法开发等方面开展大量工作,已具备成熟的理论体系与产业链,相关成果已广泛应用于军事领域^[46,47].例如,美国国防高级研究计划利用小型固定翼无人机搭载微型光泵磁力仪(美国QuSpin生产的QTFM型号光泵磁力仪)研制了系列无人机磁探测系统——定点扫描鹰^[48],通过集群分布式磁探测大大提升了探测精度与覆盖范围,主要用于战场未爆弹和地下掩体探测,可在地磁扰动环境中工作.据报道该系统2021年进行了模拟水雷目标探测试验^[49].基于固定翼无人机的航磁已在军事和地磁调查等领域大规模列装,

如表S2所示为美国主要固定翼无人机航磁系统。

国内在固定翼无人机平台和磁传感器技术上进展迅速,技术指标达到国际先进水平,部分已经业务应用(表S3)。包括北京大学联合开发的CH-4固定翼无人机原子磁探潜系统^[50],机身采用无磁材料和低磁化设计,辅助以各种磁补偿算法,静态探测能力已达pT级,性能优于美国的“捕食者A”;中国航天科工三院302所、33所等联合开展的固定翼原子磁探系统,优秀的磁补偿算法可大幅度降低无人机的磁干扰影响^[51];中国航天科技五院513所研制的复合翼激光氦光泵磁探系统已在多地进行了飞行试验,系统动态噪声优于60 pT^[52]。

相较于固定翼无人机航磁,多旋翼无人机磁探测系统研发起步较晚。美国自2010年开始多旋翼无人机磁探测系统研制,基于DJI Phantom多旋翼无人机与质子旋进磁力仪,美国首先开发了应用于小范围资源勘探和未爆弹检测的无人机磁探测系统。例如,早期美国Geometrics公司基于高灵敏度铯光泵磁力仪开发了一体化航空磁探测系统“MagArrow”,可搭载于多旋翼无人机,主要用于地下资源勘探与地磁测绘等。2021年以来,美国逐步转向高精度与集群化多旋翼无人机磁探测,代表机型包括具有抗干扰和AI避障能力的军用级Skydio X10D(<https://www.skydio.com/x10d>)和Teal Golden Eagle^[53],主要用于城市地下管网探测与隐蔽军事目标侦察。德国Fraunhofer研究所开发了轻量化无人机磁梯度系统,配置两个光泵磁探头进行磁梯度测量,梯度分辨率可达0.1 nT/m,用于地下空洞探测与考古遗址探测等^[54]。拉脱维亚SPH Engineering公司分别采用氦光泵、铯光泵、磁通门等磁力仪,与多旋翼无人机平台集成了一系列无人机磁探测系统,部分产品同时配置激光雷达、可见光相机等载荷,实现多种传感器协同作业,用于地下资源勘探、地下管道探测、未爆物探测、海底管道巡检以及考古等。调研国外主要的多旋翼无人机磁测系统研发现状(表S4),主要包括:(1) 美国国家能源技术实验室开发的无人机磁探测系统,(2) 美国海军地雷战快速评估功能系统(MIW RAC),(3) 美国Skipper NDT公司的“幽灵平台”技术,(4) 德国MGT公司开发的无人直升机磁探系统,(5) 荷兰Fugro公司的Geoeranger-I型无人机航磁系统,欧盟开发的“智能探索”系统,可实施无人机频域电磁测量,用于矿产资源的测绘和建模。有报道显示,利用多旋翼无人机搭载两个磁通门磁力仪进行梯度测量,多个国家

尝试用于识别浅层地下埋藏的金属管线^[55]和未爆弹^[56],以及用于考古^[57]。而最近十年随着多旋翼无人机产业的成熟,因其具有姿态稳定、小型化、航空管制宽松、成本低廉、空间分辨率高、环境适应性强、探测深度大等显著优势,已成为局域目标快速高精度探测的首选航磁方法和研究热点^[58,59]。

受国内AI技术发展和低空经济的推动,中国国家自然科学基金资源航空遥感中心、浙江大年科技有限公司、北京桔灯导航科技发展有限公司、加泰科(深圳)有限公司等单位在多旋翼无人机磁探测系统研制方面^[60,61],从量子磁力仪及其搭载的多旋翼无人机磁测系统研发到仪机系统的制造、产品销售、软件技术和航磁技术服务等诸多方面均取得了长足的进步;市场推出的多旋翼无人机光泵磁测系统的静态噪声达亚nT级,飞控补偿误差控制在20 pT以内,在资源勘查、工程应用等领域广泛推广。但受现行的航磁规范(DZ/T 0142-2010)和配套技术缺失的影响,总体上给出的磁异常精度依然停留在nT级的水平,远未达到量子磁测的理论预期。

2 多旋翼无人机量子磁测的优势分析

2.1 多旋翼无人机航磁的理论优势

除多旋翼无人机的飞行和成本等各种优势,与航磁最为密切相关的是,多旋翼无人机超低空飞行带来的对地下隐伏磁异常探测的空间分辨率优势。如图2所示为水平地表条件下地下不同间隔横向分布的直立板状磁性体的磁异常理论模拟曲线。显然,随着飞行高度的逐渐增加,在低空飞测明晰可见的多个磁异常逐渐合并直至消失,到150 m高度时只能看到一个宽缓的磁异常,几乎没有了地下横向非均匀磁性结构的反映。

对于背景介质无磁性、地下埋深不同、磁化强度不同的两个磁异常体,如图3所示,当飞行高度逐渐增大后,不仅表现为类似图2的磁异常空间分辨率降低,理论上异常幅度随探测距离的三次方衰减使得地面磁测表现为nT级的磁异常,随高度增长异常幅度迅速衰减;即使在理想的情况下,至1500 m高度,最大磁异常幅度已衰减为亚nT级,传统的nT级磁探系统已经无法识别地下磁异常的存在。从而可以说明,多旋翼无人机量子磁测对于弱磁异常的识别和探测空间分辨率的提高是有明显优势的。

不同高度的实际航空磁测对比也证明了这一点,如图S1所示为同一区域不同时期有人机固定翼航磁与

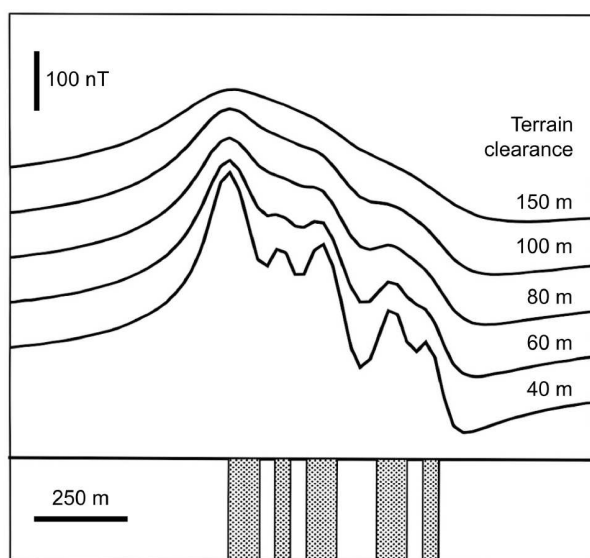


图2 地下横向间隔分布的不同宽度直立板状磁性体的磁异常理论模拟曲线^[62]

Figure 2 Theoretical simulation curves of magnetic anomalies for vertically oriented plate-shaped magnetic bodies with varying widths distributed in underground lateral intervals^[62]

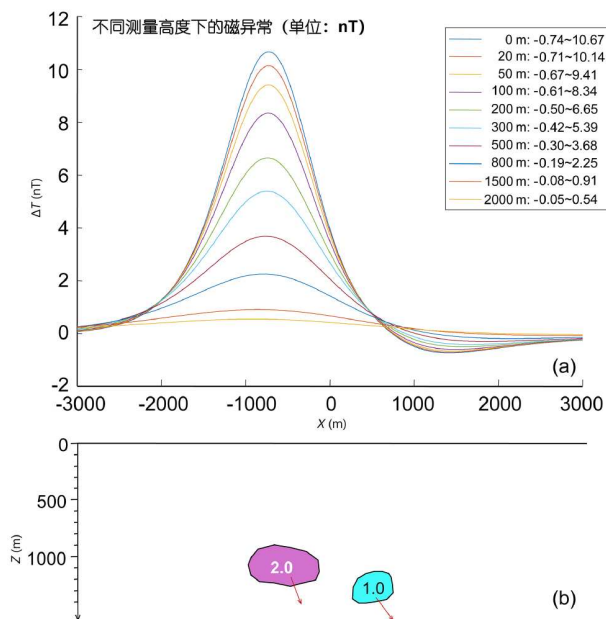


图3 (网络版彩色)地下磁性异常体的磁异常幅度随探测距离变化的理论模拟。(a) 理论磁异常曲线。(b) 地下磁性体模型。“1.0”和“2.0”表示磁性体为两个磁化强度分别为1.0和2.0 A/m、磁倾角为60°和45°的两个弱磁异常体,模拟测线方向为磁北方向

Figure 3 (Color online) Theoretical simulation of magnetic anomaly, shown as amplitude variation versus detection distance for two underground magnetic bodies. (a) Theoretical magnetic anomaly curves. (b) Subsurface magnetic body model. The bodies labeled 1.0 and 2.0 represent two weakly magnetic anomalous bodies with magnetizations of 1.0 and 2.0 A/m, and magnetic dip of 60° and 45°, respectively. The simulated survey line is oriented in the magnetic north direction

无人机低空航磁的对比。需要说明的是,对比的两次磁测使用的是相同的磁测精度,均为nT级,但固定翼的飞行高度远高于无人机。显然,低空航磁显示了更多的局部细节、小弱磁异常^[43]。

2.2 量子磁测的理论优势

理论上,量子磁测确实具有极弱磁异常的感知优势。例如,SERF与低温超导磁力仪可以感知fT级的极弱磁变化^[63,64],从而为弱磁异常的探测提供了高灵敏度的探测仪器。以目前市场上广泛应用的光泵磁力仪为例,其灵敏度大多在pT、亚pT级,即传感器感应记录了以nT为单位小数点后至少3位有效数字、达pT或亚pT级的磁响应数据。以此类型仪器的灵敏度作为二维模拟的数值精度,假设一个二维模型:地下存在孤立的磁性异常体,设异常体埋深逐渐增加,从10、100、200、300、500、700、800 m直至1000 m分别模拟二维磁异常曲线。为方便对比,把二维模拟获得的不同埋深异常测线合并,给出形如图4(a)的三维异常数据。显然,受浅埋大异常影响,深埋测线未显示出应有的深部异常。即,虽然使用fT级灵敏度磁测,百米以浅的nT级磁异常掩盖了深部弱异常的显示,如图4(b)所示(Z轴磁异常单位为fT)。而当我们只显示深埋测线的异常,即相当于对图4(a)的局部深埋测线进行放大显示,如图4(c, d)所示,数百米直至千米探测距离也具有数百pT和fT量级的磁异常,在量子磁测的感知范围内,理论上应可探测。但如何在强异常背景下分离出弱磁异常,对于量子磁测数据处理和反演而言是个无法回避的挑战。

也正因如此,采用高灵敏的量子磁力仪(灵敏度可达pT和fT量级),包括磁总场测量的光泵磁力仪、三分量的SERF磁力仪和低温超导相对磁力仪已成为目前国内外航磁的研究热点和技术竞争的主流。

3 多旋翼无人机量子磁测性能劣化原因分析

相比于传统的固定翼和复合翼无人机航磁可通过加长翼展物理上规避无人机磁干扰对磁测的影响,基于多旋翼无人机的量子磁测虽然在应用上具有低空仿地飞行等诸多优势,但无法采用类似方法规避无人机对磁测的影响,无人机磁干扰成为多旋翼无人机量子磁测性能劣化的直接原因^[65]。以我们执飞的一典型金属矿区多旋翼无人机航磁测量为例,如图5(a)所示,尽管搭载的光泵磁力仪灵敏度高达1 pT,分辨率为0.1 pT,磁测传感器记录了以nT为单位小数点后4位有效数字,

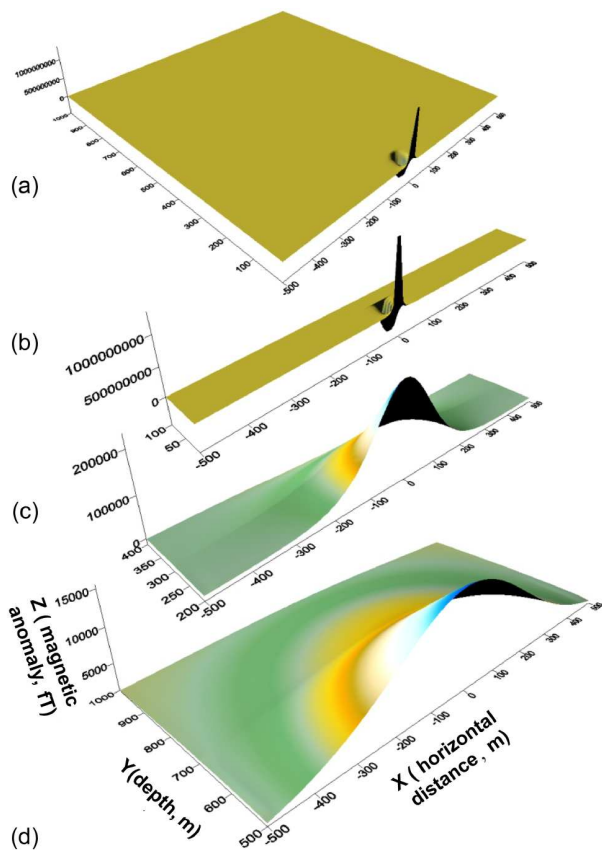


图4 (网络版彩色)地下磁性异常体随埋深变化产生的fT级磁异常逐级放大显示。(a) 所有深度磁异常时;(b) 100 m以浅的磁异常;(c) 200~400 m的磁异常;(d) 500~1000 m的磁异常。按右手螺旋法则,图中Y轴表示异常体的埋深;X轴表示异常体二维空间分布范围,异常体在X轴0坐标的正下方,两侧对称分布;Z轴表示磁异常大小

Figure 4 (Color online) fT-level magnetic anomaly amplification of an underground magnetic anomaly body with burial depth increasing. (a) Anomalies of all depth; (b) anomalies above 100 m; (c) anomalies between 200 to 400 m; (d) anomalies between 500 to 1000 m depth. following the right-hand spiral rule; Y-axis represents burial depth of the anomaly body in meters; X-axis represents two-dimensional spatial distribution range of the anomaly body, symmetrically distributed on both sides directly below the origin; Z-axis represents magnitude of magnetic anomaly

但最终提交的磁总场只是nT级,最高精度仅为0.3 nT。当我们试图发掘数据中的微弱磁异常,通过消除大背景异常场的数值影响,显示pT级的相对异常时,如图5(b)所示,出现了明显的与多旋翼无人机飞行路线一致的磁条带干扰。调研国内外不同领域的多旋翼无人机航磁结果发现,类似的案例很多^[66],且是目前航磁规范(DZ/T 0142-2010)下的普遍现象。系统分析多旋翼无人机量子航磁性能劣化的原因,以下诸多症结问题是多旋翼无人机量子磁测目前亟待针对攻关解决的技术关键。

3.1 磁力仪背景噪声及其磁扰动分布特征

由于量子磁传感器的高灵敏度特征,目前仪器研发领域对于量子磁力仪的性能指标大多沿用的是实验室环境,甚至是磁屏蔽筒环境的静态性能参数指标。例如,有研究^[67]证实单束零场光泵磁力仪的传感器噪声本底可低至20 fT/Hz^{1/2},但受直流至30 Hz范围内的噪声,主要是激光强度、激光频率、激光偏振、原子气室温度和磁场线圈噪声以及电子电路等诸多因素影响,光泵磁探头的探测灵敏度只能达到亚nT级。当量子磁传感器与传统的数控、数传等电子电路集成后,不论是静态的实验室环境还是飞行状态,磁力仪材料磁性、与电子电路系统在复杂的地磁场环境中产生复杂感应磁场,从而诱发远超传感器本底噪声的磁扰动,这是量子磁力仪整机探测精度性能劣化的重要原因之一。

3.2 多旋翼无人机的静动态磁扰动特征

由于铁磁性材料的使用,以及电机产生的电磁涡流扰动,尤其是在复杂的地球磁场环境中,多旋翼无人机移动时对地磁场的切割和多种感应涡旋电磁场的相互作用,使得无人机及其上搭载的各种辅助组件形成的磁扰动成为搭载的量子磁力仪磁测性能劣化的主要因素^[59,65,68]。如图6所示,某款六旋翼无人机静态和悬停状态自身所产生的空间磁扰动高达几十nT。若不加以补偿校正,将对真实磁异常产生明显的抑制和假的条带型、与飞行路线重叠的异常干扰。

3.3 仪机系统的磁扰动特征

当磁力仪与无人机及其各种搭载组件融合为一套系统后,磁力仪的搭载组合方式及其与无人机相互影响所产生的磁测性能劣化也是重要的、需要系统厘定的主控因素。尽管固定翼无人机通过加长翼展长度,将磁力仪尽量布设在不受无人机磁干扰影响的空间范围,以压制航磁的磁干扰水平^[69],且国内外目前已将仪机系统噪声压制在十几pT至pT级的水平;但对于多旋翼无人机,这种硬件上的磁干扰压制方式无法照搬,必须从仪机系统的噪声厘定角度来研发针对性的软硬件补偿技术,在充分厘定性能劣化机理的基础上研发相应的硬件优化和软件补偿方法。因此,在量子磁力仪与搭载的多旋翼无人机集成过程中,对量子磁力仪的搭载方式、空间组合方式以及无人机飞行速度、姿态与光泵磁力仪的磁偏角盲区设计、控制是需要试验系统实

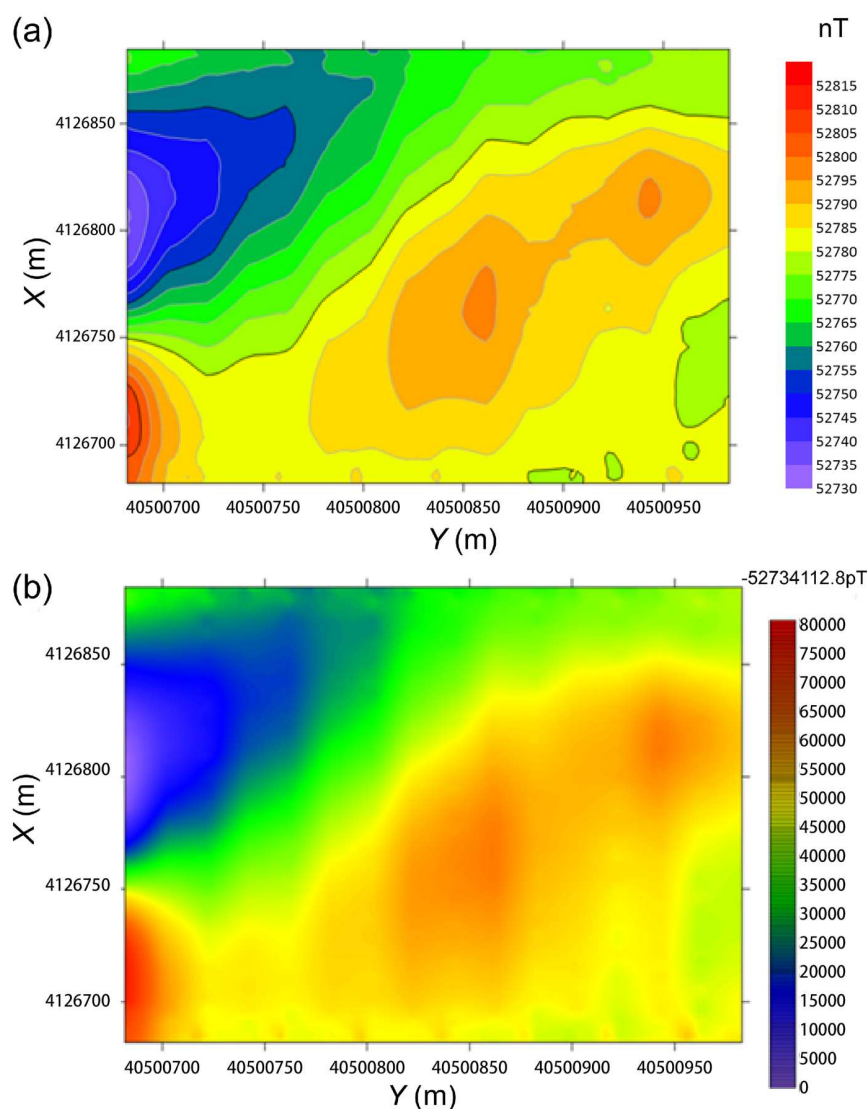


图 5 (网络版彩色)典型区域的多旋翼无人机光泵磁力仪探测结果. (a) 以nT为单位的磁总场; (b) 减去区域磁总场最小值后显示的pT级磁总场相对变化

Figure 5 (Color online) Magnetic pump magnetometer detection results for a typical region using a multi-rotor UAV. (a) Total magnetic field in nT; (b) relative change in total magnetic field at pT level after subtracting the minimum regional total magnetic field

验厘定, 并通过积累大量的人工智能样本和智能算法给出最优方案的重要一环.

3.4 匹配无人机磁测系统的高精度软补偿技术

对于磁力仪和航磁系统研发、销售或提供技术服务的商业市场而言, 在实验室环境中完成了磁传感器的标定计量基础上, 磁力仪、无人机及二者组合系统的磁干扰厘定和补偿压制后, 理想的航磁工作可以提供可靠、精度远高于nT级的磁异常数据. 但实际并非如此. 例如某多旋翼磁探测系统服务商在新疆某区域

找矿的实践中, 利用亚pT级的铷光泵磁力仪, 搭载在多旋翼无人机上, 在仿地航磁完成后, 按照传统航磁规范(DZ/T 0142-2010)进行了规范、细致的飞控校正和磁日变校正, 尽管传感器的回传数据中记录了丰富的pT级的磁测值, 但实际上最终获得的磁异常成果也仅是nT级的, 如图S2所示. 剖析原因, 一个重要的因素是无人机仿地飞行时, 地形测量采用的是相对低精度(误差数米)的GPS(Global Positioning System, 全球定位系统, 专指美国的卫星导航系统)卫星导航, 且使用的传统正常场校正、日变校正均是nT级的.

而理论模拟显示(图7),当空间测量误差达到亚米级时(包括水平向和高度测量误差),将会产生pT级校正误差.因此,pT级的隐伏磁异常探测需要激光雷达和RTK(real-time kinematic,实时动态测量)等高精度空间测量技术实现厘米级的定位,同时还需要匹配pT级的正常场校正.同时,高精度的日变校正也是重要一环.而若仍沿用目前的nT级航磁技术规范,例如,在有限的测区范围,一般只布设一台地面日变观测站,进行nT级尺度的日变校正,获得的磁异常数据中无疑会残留pT级的日变场信息,而无法真实显示隐伏的微弱磁异常特征.

3.5 多源磁场解耦困境

地球磁场的内外源场呈秒级、日际直到年度的多

时间尺度变化特征,且变化幅度与范围高达pT~nT级.无人机磁测过程中,这些复杂的地球磁场又与仪机系统的磁干扰相互作用耦合,并衍生感应场,如图S3所示,进一步加剧了系统的性能劣化.因此,如何消除内外源场的时变趋势及其感应场影响是提升极弱磁隐伏目标探测精度达pT级需要突破的主要问题之一.其中的难点在于如何解耦地磁场的主磁场、外源场以及各种可能的感应磁场.

显然,上述问题的解决需要利用零磁空间实现多源磁场的解耦来标定不同类型的磁噪声.一般地,小尺寸量子磁传感器的本底噪声测量是在实验室的小型磁屏蔽筒中完成,而稍大一点的磁力仪整机一般就需要使用零磁装置.但是国内外目前已有的各种磁屏蔽筒以及建成的大型零磁装置只能提供静态的磁测量,对

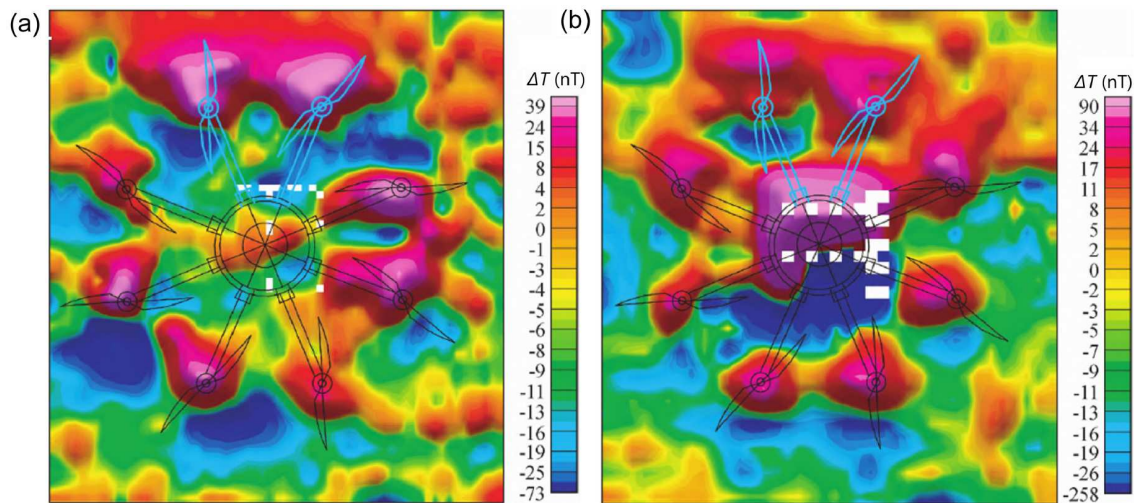


图6 (网络版彩色)某多旋翼无人机所产生的磁扰动空间分布^[59]. (a) 静态磁噪声; (b) 悬停状态磁噪声

Figure 6 (Color online) Spatial distribution of magnetic disturbance generated by a multirotor UAV^[59]. (a) Static magnetic noise; (b) magnetic noise in hovering state

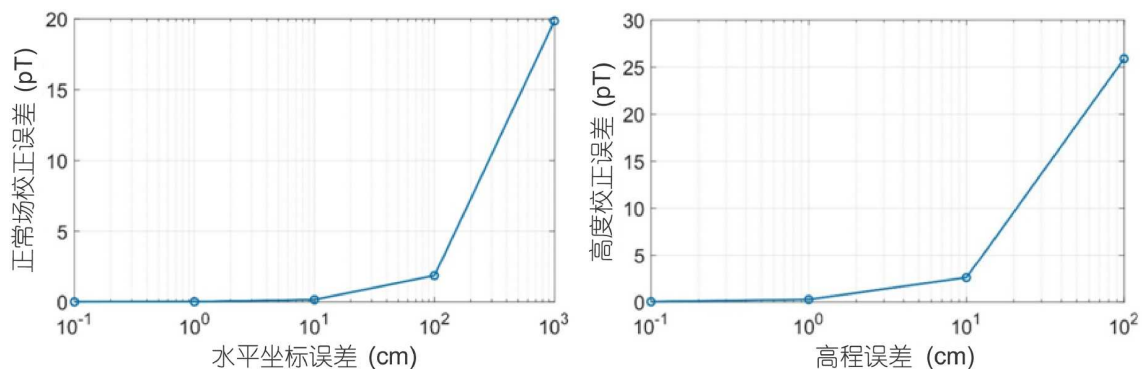


图7 (网络版彩色)水平坐标(a)与高程坐标(b)测量误差所引起的校正误差模拟

Figure 7 (Color online) Simulation of correction errors caused by measurement errors in horizontal coordinates (a) and elevation coordinates (b)

于大型的仪机系统及其动态的测量则需要更大的零磁空间,且具有模拟动态移动和温压环境的功能;同时需兼备pT级的磁感应阵列精密测量实验目标的三维空间磁干扰.而这种环境、实验平台和实验装置的缺失是造成多旋翼无人机量子磁测性能劣化机理不明或领域对之特征了解不足的主要原因.

4 亟待攻关研究的内容

4.1 劣化机理实验与补偿校正技术

基于上述对多旋翼无人机量子磁测系统性能劣化原因的剖析,我们认为欲达到量子磁测理论或期望的探测精度,需要重点进行如下三个方面的实验与相关技术攻关.

(1) 硬件系统优化: 针对原子磁力仪静动两种状态下性能劣化机理与磁扰动特征、多旋翼无人机静动两种状态下的磁感应特征、仪机系统磁干扰耦合与磁测性能劣化机理未知的问题,需要在足够大的、具有移动模拟环境的零磁空间或稳磁空间(相对零磁空间)中分别进行磁力仪、多旋翼无人机、仪机系统的静态和动态磁噪声测量,并从装备组件材料、电机磁屏蔽等不同角度进行硬件设计、制造和量子磁传感器搭载与组合方式的优化,以尽量压制磁传感器受到来自磁力仪、无人机硬件的影响,达到硬件上磁噪声的最大消除或规避.

(2) 软硬件结合的优化和补偿: 既使我们完美地解决了第一步硬件产生的噪声压制问题,仍需要结合硬件特点研发配套的软补偿技术.即针对飞行姿态的变化、速度变化、风的影响以及气温变化、磁偏角测量方式等因素,均需要在充分试验的基础上,分别在零磁空间、稳磁空间以及复杂的地磁环境和飞行环境中经过多轮次、多参量的变化试验和磁干扰特征采集,研发对应的软补偿技术,尤其是研发基于人工智能的算法来实现与硬件相关的动态磁噪声实时识别与压制.

(3) 软补偿与校正技术: 从前述分析我们知道,在航磁提供了足够高精度的、消除了无人机等硬件影响和飞行姿态产生的磁噪声后,配套同样高精度的日变观测与校正,地形测量与正常场校正等亦是必要的后处理步骤.但隐藏背后的关键基础问题是pT级时空变地磁场模型的构建.因此,需要系统研究日变场诱发的磁感应机理,建立能够定量描述日变耦合次级场的物理模型,通过对电磁感应的准确建模与数据处理,实现

对次级场的有效剥离.

4.2 实验条件

不论是厘定劣化机理、了解磁扰动的时空分布特征,还是研发匹配的软硬件补偿与校正技术,满足以下两个前提试验条件:

(1) 可实现pT级或优于pT级磁测的量子磁力仪是实现性能劣化机理实验必需的测量工具.例如,若要厘定光泵磁力仪、无人机和仪机系统的pT级磁扰动,需要至少同一灵敏度量级的光泵磁力仪,甚至更高精度的SERF或低温超导磁力仪作为测量工具.

(2) 具有优于pT级磁背景噪声的实验环境,包括绝对零磁空间和相对零磁空间,以实现地球内外源的解耦;且体积足够大,可以容纳磁力仪整机、无人机整机的测试,以及仪机系统的静动态测试,并能够模拟不同移动姿态和风速等环境参数变化.

调研国内外的大型零磁装置发现,以国际最为先进的德国慕尼黑大学建造的最新零磁装置^[70]和中国哈尔滨工业大学的零磁空间(<http://sesri.hit.edu.cn/post/detail/123/3734>)为例,它们的内部零磁空间容积也只有十几立方米和近40 m³,如表2所示,无法模拟磁力仪和无人机的移动飞行;且中心区域均匀磁场的绝对剩磁分别为亚nT和50 pT的量级,磁噪声梯度尽管优于1 pT/cm,但是否满足多旋翼无人机量子磁测对pT级噪声控制的要求,且跨越0.01~100 Hz的频段,尚需要在实验中验证.而且,以灵敏度达0.1 pT的铷光泵磁力仪为例,对于pT级磁扰动的测量需要更高精度的SERF磁力仪或低温超导磁力仪标定,然后利用原子磁传感器的小体积优势,构建灵敏度达亚pT级的立体磁感知阵列.

而基于我们已构建的深地实验室^[71]和开展的深地多物理场观测研究初步结果^[72]表明,在深部地下,利用废弃坑道巨大空间建设的深地无磁房、深地零磁空间,有望获得远优于地面零磁装置的多源磁场解耦环境,且具有大空间优势.例如,淮南深地实验室得益于870 m厚的沉积覆盖层和-848 m深度,已实施的低温超导量子磁测显示,深地环境的磁噪声扰动低至pT和亚pT级@1 Hz~kHz,在大于100 Hz的高频段具有与实验室磁屏蔽筒同样水平的磁噪声环境,可达fT级^[64,73~75],如图8所示.

已建成的泰山深地实验室无磁房(图S4(a)),空间容积达30 m×4.0 m×2.5 m,约300 m³,磁噪声梯度<0.01 nT/m,优于中国地震局的地面无磁房标准(DB/T 9-

表 2 国内外零磁与稳磁装置主要参数对比

Table 2 Comparison of key parameters for zero-magnetic and constant-magnetic devices at home and abroad

国别/单位	零磁类型	绝对零磁	磁扰动梯度	容积(m^3)	成本(万元)
	磁屏蔽筒	亚nT	fT/m	0.06	500~2000
德国慕尼黑大学	零磁装置	0.9 nT	5 fT/m	10~45	12000
哈尔滨工业大学	零磁装置	0.05 nT	0.1 nT/m	5.8~43	10000
中国计量科学研究院	零磁空间	nT级	10~50 nT/m	3~6	未公布
中国船舶集团有限公司第七一零研究所	零磁空间	nT级	30~50 nT/m	<0.01	未公布
北京航空航天大学杭州创新研究院(拟)	零磁装置	nT级	fT/m	>1000	1000000
美国橡树岭国家实验室MSR	稳磁空间	40~80 nT	0.1 nT/m	0.1~350	未公布
日本	零磁空间	nT级	未公布	5	未公布
中国地质大学(北京)	稳磁空间	未测	<0.01 pT	240	不含深地实验室费用108
深地项目(在建)	零磁空间	0.01 nT	0.16 fT/m	90	8600

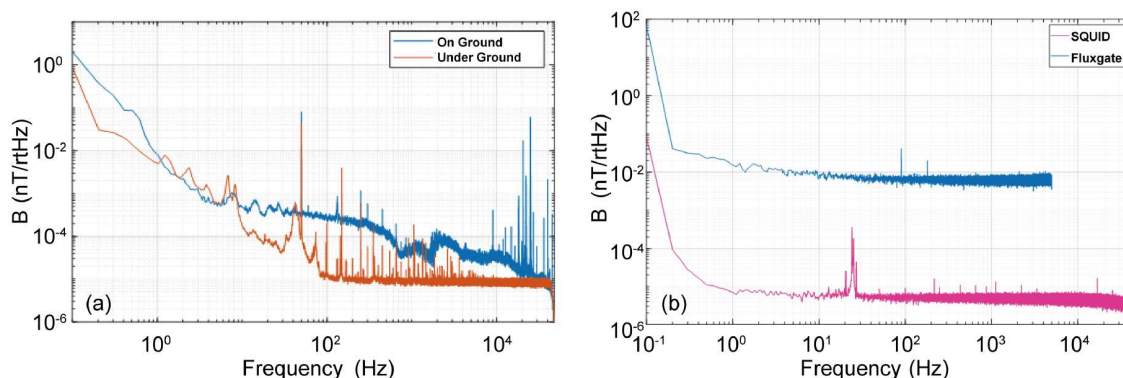


图 8 (网络版彩色)淮南深地实验室低温超导量子磁测与地面的对比(a), 以及低温超导(SQUID)磁力仪实验室屏蔽筒测量结果(b)

Figure 8 (Color online) Comparison of low-temperature superconducting quantum magnetic measurements at the Huainan Deep Underground Laboratory with ground-based measurements (a), and laboratory shielded-bore SQUID magnetometer results (b)

2004, 地震台站建设规范: 地磁台站); 以正在建设中的深地零磁空间为例, 俄罗斯套娃式的架构设计有望获得优于地面零磁装置的绝对零磁环境, 理论计算磁屏蔽系数可高达 $10^9 \sim 10^{11}$, 绝对剩磁可低至pT级, 如图S4(b)所示. 经过适当的磁环境改造, 深地实验室具有构建无磁移动模拟系统(图S5(a))和pT级立体磁感知阵列(图S5(b))的先天优势, 将可能成为多旋翼无人机量子磁测系统性能测试与计量标定的理想实验平台.

5 讨论与结论

本文从量子磁传感具有远超传统航磁nT级精度, 理论上可达pT或fT级灵敏度的极弱磁探测能力的角度, 通过数值模拟和实际应用案例剖析给出了目前多旋翼无人机量子磁测的优势与所面临的技术瓶颈, 归纳总结为五个方面的关键症结问题. 对应的关键技术突破将可能推动多旋翼无人机的量子磁测达到理论预期,

但仍存在多物理场耦合机理不清、电磁感应的磁偶极子远场近似理论无法刻画多旋翼无人机磁感应的近场效应两个核心的基础科学问题, 可能导致如下的攻关研究存在诸多变数, 需要开展对这些基础科学问题的先行深入研究.

5.1 高精度时变地磁模型与日变校正

美国空军与麻省理工学院曾围绕地磁导航对高精度地磁建模进行了专项试验^[76], 证明了不论对于磁探测还是磁导航, 精度的提高离不开高精度磁日变模型的建立. 而调研现行的各种地磁场模型, 包括国际地磁学与高空物理联合会发布的IGRF地球主磁场基准模型、美国国家地理空间情报局与美国国家海洋和大气管理局联合制定的WMM模型^[77], 两者的空间分辨率仅为千千米量级, 难以满足低空航磁对中小尺度场的高精度模型需求; 且对快速外源扰动(如磁暴、电离层

扰动)的刻画能力有限. 考虑了地磁场时变特征的CHAOS和CM系列模型在空间分辨率上通常仅能解析至20~25阶; MF模型、NGDC720和EMM模型、HDGM-RT模型的790阶展开空间分辨率也仅达几十千米. 表S5比较了各类国际代表性地磁场模型的主要特征^[78~87], 显然, 这些模型均难以满足pT级量子磁测的高精度日变校正需要. 采用这些不同的模型对中国区域的岩石圈磁异常场进行换算, 如图S6所示^[88], 只能达到nT级精度, 远远不足以支撑pT级磁异常探测和磁导航. 而这恰恰是国内外目前尚在探索而无法突破的难点之一.

尤其是对于高精度量子磁测, 时空变地磁场除受图S3所示的感应场及其耦合效应影响外, 不同周期与不同尺度磁场叠加也是造成高精度地磁场模型难以准确刻画的重要原因, 如图S6^[89]和S7^[90]所示. 地磁场的不同频段对应着电离层、磁层及其相互作用所产生的多源场的叠加. 这种简单的多源、多周期、多尺度磁场线性叠加使得单一尺度或单一方法建立的磁模型适用性受限. 进一步考虑地磁场的变化所引起的岩石圈感应磁化及其与激化场的耦合关系, pT级的次级磁异常(图S8)在pT级高精度探测中也是不可忽略的. 特别是在局部强磁化体附近, 感应磁场往往表现出复杂的时空变化特征, 对时空变地磁场建模和传统日变校正方法提出了额外的严峻的挑战.

欧美发达国家在航空磁测、行星磁场探测及空间环境研究方面, 已逐步探索基于多台站的联合建模与高分辨率插值方法^[91,92]. 但总体而言, 对pT级日变校正问题的系统研究尚处于起步阶段, 尚缺乏成熟方法与可推广的工程技术. 我国近年来在高灵敏度磁力仪研制方面已取得突破, 但对pT级精度数据处理和日变校正体系建设方面仍存在明显短板, 若不能尽快突破, 将制约量子磁测装备的应用、高灵敏度优势发挥以及国际竞争.

5.2 精度的量级式跨越与复杂的地磁场环境

尽管多旋翼无人机与量子磁力仪的结合理论上具有pT级磁异常探测的可能性, 但在传统的nT级探测精度理论与技术框架内, 在复杂的地磁场环境中, 是否获得预期的pT级极弱磁异常的探测精度是我们需要深入探索和解决的关键任务. 无人机与人工智能技术介入航磁领域以来, 领域体会更深刻的主要是复杂地表条件下, 无人机航磁所带来的效率大幅度提升和勘探成

本的大幅度下降; 习惯于将无人机航磁结果与地面磁测或固定翼小比例尺的航磁结果进行对标, 以体现异常的可比性、精度达到nT级作为满足条件. 跨越至pT级, 不仅仅是精度数字上10倍、百倍乃至千倍的提高, 这种量级式的跨越, 和所可能获得的极弱磁异常的识别颠覆了领域的传统认识: 不仅仅要颠覆已有的航磁规范; 极弱磁异常除了可能揭示更深的弱磁性异常的存在, 是否引入了更多的环境磁噪声, 而使得磁异常的反演解释陷入更多可能解的窘境? 显然, 这些深层次的理论与技术考量、迭代更新超出了目前的认知, 需要系统性的研究. 例如对于无人机姿态和磁扰动的校正, 传统的补偿方法不论是基于T-L(Tolles-Lawson)模型的^[93,94], 还是自适应的各种人工智能方法^[95~97], 大多在有人机、大型固定翼、复合翼无人机得以较好的应用, 且只能适用于nT级的航磁精度需求. 进一步的大幅度精度提升, 需要更新改进理论模型^[9]; 甚至抛弃这一技术路线, 转而求助于人工智能的完全替代^[98].

5.3 多源磁场的耦合效应及其解耦的可能性

在本文论述的多旋翼无人机量子磁测系统pT级磁异常探测面临的技术瓶颈中, 在复杂的地磁场环境与多源磁场耦合作用下, 为解决量子磁测性能的劣化机理问题, 我们分别给出了地面磁环境、地面零磁装置、深地零磁空间或稳磁环境三个层次的试验, 试图解耦各种可能的内外源场, 将多参量串扰明显的复杂物理问题通过逐个的、在单一因素可控的环境中分别厘定的方式, 来获得我们应该掌握的仪机系统磁干扰时空特征, 确定磁测性能劣化的各因素影响程度和主导因素, 以为软硬件研发和优化提供理论指导; 为硬件、软件以及硬件与软件相互融合的磁噪声优化和校正技术研发提供基础和大量样本的支撑. 毫无疑问, 这一物理模拟和实验的过程中, 数值模拟也是十分重要的、不可或缺的一环^[99~101]. 但在5.1部分所提及的两个基础科学问题尚未解决的前提下, 这一系列的实验平台改造、试验与测试是否能获得预期的效果仍存在不确定性.

正是由于量子磁测的原子层级的操控及其对环境影响的高度敏感性, 振动噪声、温压扰动、Schumann谐振^[102]乃至更强的磁暴对量子传感的影响^[103], 在多源、多周期、多尺度地球圈层结构及其静动态磁场的影响下^[104~106], 尤其感应电磁涡流对量子测量的影响^[107]均是需要从基础科学层面深入探索的.

5.4 人工智能技术(AI)主导

神经网络凭借其强大的非线性拟合能力和端到端学习特性,为复杂磁干扰场的建模和人工智能识别提供了有效手段,使得实时的磁扰动补偿成为可能。2020年,美国空军与麻省理工学院联合发起“MagNav挑战赛”并发布公开数据集,为算法比较和优化提供了统一基准,推动了物理先验与机器学习的深度融合^[108]。在此公开数据集之上,一系列融合物理先验与机器学习的干扰校正技术应运而生。Gnadt(2022)率先验证了机器学习增强标定的可行性,证明仅利用机舱内部传感器数据即可实现高精度补偿,误差稳定在6.5 nT以内,证实了在无尾杆条件下实现高精度补偿的可能性^[108]。Zhai等人^[109]将补偿问题表述为需要“记忆能力”的非线性时序学习任务,比较了水库计算(reservoir computing)与时延前馈网络(time-delayed FNNs)等模型,强调了网络的内生记忆机制对于捕捉缓变弱信号的关键作用,其结果表明时间延迟前馈网络在典型飞行航段中能够显著降低移动产生的磁扰动并保持预测信号与真值高度一致。Nerrise等人^[110](2023)更是将T-L模型的物理特征嵌入液态时间常数网络(LTCs),通过连续时间动态特性实现磁噪声最高64%的降低,代表了当前最前沿的智能补偿方向。表S8总结了主要航磁补偿模型的发展、代表性工作与优缺点。

综上所述,航磁补偿技术已经经历了从经典的线性物理模型到稳健回归,再到结合深度学习的智能补偿的衍进;并在MagNav挑战赛的推动下发展出以物理信息神经网络为核心的最新技术方向。尽管如此,现有方法依然存在不足:离线建模难以应对实时变化,深度学习方法在泛化性和可解释性上仍需改进,而算力和功耗的约束也限制了模型的实际应用。因此,构建融合物理先验与人工智能的实时补偿模型,不仅是突破传

统T-L理论框架的必然选择,更是提升多旋翼无人机量子磁测精度、推动实用化水平的关键。

5.5 结论

本文通过详细分析多旋翼无人机的优势、量子磁测超高灵敏度特征,以及目前广泛应用的原子磁力仪无人机磁测及其取得的磁异常探测效果,表明:欲充分发挥多旋翼无人机与量子磁测融合可达到的理论预期——pT级弱磁异常探测能力优势,需要在大型零磁空间或稳磁空间中,利用更高精度的量子磁传感器作为磁测工具,开展以下几个方面的实验和攻关研究工作。

(1) 在地磁外源场和内源场可解耦分离或稳定可控的大型磁空间环境中,开展量子磁力仪整机、多旋翼无人机、磁力仪与无人机集成(仪机)系统的静态、动态模拟,进行pT级或亚pT级高灵敏度立体磁测量,揭示三者的三维磁扰动特征。

(2) 在大型的零磁或稳磁空间环境中,对前述三种仪器装备进行不同移动速度、不同仪器材料、不同电磁屏蔽方案以及仪机组合方案的设计优化和系统性实验,给出仪机融合的最优技术路线,建立大型的静动态磁测样本库。

(3) 开展高精度时变地磁模型构建及其匹配的日变校正,以及基于高精度地形测量的正常场校正等软补偿方法研究。

(4) 融合人工智能多种深度学习技术,开展具有实时数据处理功能的多旋翼无人机量子磁测的姿态控制与校正、磁方位测量与校正技术、磁力仪与无人机磁扰动自动补偿技术、pT级磁日变观测与局域磁模型建模技术、正常场改正等系列、系统的校正与补充技术研究,将各个环节的磁噪声均控制在pT级或更小水平,才有可能实现颠覆性的量子磁测。

致谢 感谢自然资源部中央地质勘查基金管理中心李钟山研究员提出的高精度航磁建议,感谢中国地质大学(北京)郑元满博士对理论模拟的支持,吉林大学王言章教授和本团队的研究生周原锐、董嘉恒、田一行等在数值模拟、绘图等方面给予的协助;感谢有色金属矿产地质调查中心提供的多旋翼无人机航磁测量数据和相关图件;感谢清华大学的杨顶辉教授对本文的修改给出了诸多宝贵意见。

参考文献

- 1 Yue Z K. Analysis of fixed-wing anti-submarine patrol aircraft performance (in Chinese). Fire Control Command Control, 2007, 32: 27–30 [岳增坤. 固定翼反潜巡逻机及其作战效能分析. 火力与指挥控制, 2007, 32: 27–30]
- 2 Yuan G Q. Research on geophysical exploration technology and applications (in Chinese). Acta Geol Sin, 2011, 11: 1021–1026 [袁桂琴. 地球物

- 理勘查技术与应用研究. 地质学报, 2011, 11: 1021–1026]
- 3 Luo Y. Key index testing of AGS-863 full-axis aeromagnetic gradient survey system (in Chinese). *Geophys Geochem Explor*, 2011, 35: 620–625 [骆遥. AGS-863航磁全轴梯度勘查系统关键性指标测试. 物探与化探, 2011, 35: 620–625]
 - 4 Wang J R. Magnetic compensation results of Bell helicopter aeromagnetic system (in Chinese). *Ocean Surv Mapping*, 2013, 33: 11–13 [王景然. 贝尔直升机航磁仪磁补偿结果分析. 海洋测绘, 2013, 33: 11–13]
 - 5 Cheng J B, Sun X Y. Review of aeromagnetic anomaly detection technology development (in Chinese). *Acoust Electron Eng*, 2018, 3: 46–49 [成建波, 孙心毅. 航空磁异常探测技术发展综述. 声学及电子工程, 2018, 3: 46–49]
 - 6 Deng D W, Shi Y, Wu X. Study on helicopter aeromagnetic compensation quality (in Chinese). *Geophys Geochem Explor Comput Tech*, 2018, 40: 218–223 [邓德伟, 石岩, 吴雪. 直升机上航磁补偿的质量研究与探讨. 物探化探计算技术, 2018, 40: 218–223]
 - 7 Tao R H, Wang D, Chi C. Application and development trend of foreign airborne magnetic detection equipment (in Chinese). *Underwater Unmanned Syst J*, 2021, 29: 369–373 [陶荣华, 王丹, 迟铤. 国外航空磁探潜装备应用分析及发展趋势. 水下无人系统学报, 2021, 29: 369–373]
 - 8 Xiong S Q, Mao J W, Liu M, et al. Development strategy of airborne geophysical survey technology (in Chinese). *Eng Sci*, 2024, 26: 104–116 [熊盛青, 毛景文, 刘敏, 等. 航空地球物理勘查技术发展战略研究. 中国工程科学, 2024, 26: 104–116]
 - 9 Liu S, Hu X Y, Guo N, et al. Review of UAV aeromagnetic measurement technology (in Chinese). *J Wuhan Univ (Inf Sci Ed)*, 2023, 48: 823–840 [刘双, 胡祥云, 郭宁, 等. 无人机航磁测量技术综述. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, 48: 823–840]
 - 10 Brooks J S, Vasic R, Kismarahardja A, et al. Debye relaxation in high magnetic fields. *Phys Rev B*, 2008, 78: 045205
 - 11 Madurasinghe D, Tuck E O. The induced electromagnetic field associated with submerged moving bodies in an unstratified conducting fluid. *IEEE J Ocean Eng*, 2014, 19: 193–199
 - 12 Madurasinghe D. Induced electromagnetic fields associated with large ship wakes. *Wave Motion*, 2014, 20: 283–292
 - 13 Zhang C Y, Liu J M, Yang L. Status and trends of magnetic detection technology (in Chinese). *Sci Technol Eng*, 2022, 22: 18–27 [张朝阳, 刘济民, 杨林. 磁探潜关键技术现状及发展趋势. 科学技术与工程, 2022, 22: 18–27]
 - 14 Liu T J, Wang D, Liu J G, et al. Review of submarine non-acoustic detection technology (in Chinese). *Underwater Unmanned Syst J*, 2023, 31: 521–526 [刘腾蛟, 王丹, 刘金国, 等. 潜艇非声探测技术综述. 水下无人系统学报, 2023, 31: 521–526]
 - 15 Huang B, Liu Z, Xu Y, et al. Mechanism and evolution of the wake magnetic field generated by underwater vehicles. *Ocean Eng*, 2024, 303: 117779
 - 16 Chen M, Ma H X, Yong K N, et al. Review of UAV safety flight control (in Chinese). *Robot*, 2023, 45: 257–270 [陈谋, 马浩翔, 雍可南, 等. 无人机安全飞行控制综述. 机器人, 2023, 45: 257–270]
 - 17 Wang G, Hu Y, Song B F, et al. Electric UAV power system optimization and flight endurance evaluation (in Chinese). *J Aeronaut Astronaut*, 2015, 30: 1834–1840 [王刚, 胡峪, 宋笔锋, 等. 电动无人机动力系统优化设计及航时评估. 航空动力学报, 2015, 30: 1834–1840]
 - 18 Lu Z M. Status and progress of proton membrane fuel cell development (in Chinese). *China Strategic Emerging Ind*, 2017, 4: 71–74 [鲁子鸣. 质子膜燃料电池的研发现状及发展探究. 中国战略新兴产业, 2017, 4: 71–74]
 - 19 Verstraete D, Lehmkuehler K, Gong A, et al. Characterisation of a hybrid, fuel-cell-based propulsion system for small unmanned aircraft. *J Power Sources*, 2014, 250: 204–211
 - 20 None. Chinese UAV maker MMC flies hydrogen fuel cell drone for 4 h. *Fuel Cells Bulletin*, 2016, 2016: 4–5
 - 21 Zhang X H, Liu L, Dai Y L, et al. Fuel-cell UAV power system design and test (in Chinese). *Acta Aeronaut Astronaut Sin*, 2018, 39: 162–171 [张晓辉, 刘莉, 戴月领, 等. 燃料电池无人机动力系统方案设计与试验. 航空学报, 2018, 39: 162–171]
 - 22 Wei Z P, Liu F, Yang S. Development status and key techniques of VTOL fixed-wing UAV (in Chinese). *Aircraft Design*, 2024, 41: 1–10 [韦振鹏, 刘峰, 杨森. 垂直起降固定翼无人机发展现状与技术要点. 飞机设计, 2024, 41: 1–10]
 - 23 Su H W. Spin quantum amplifier based dark matter experiment (in Chinese). Doctor Dissertation. Hefei: University of Science and Technology of China, 2023 [苏昊文. 基于自旋量子放大器的暗物质实验研究. 博士学位论文. 合肥: 中国科学技术大学, 2023]
 - 24 Kastler A. Optical methods of atomic orientation and of magnetic resonance. *J Opt Soc Am*, 1957, 47: 460
 - 25 Krishna V, Lima Simões da Silva E, Døssing A. Experiments on magnetic interference for a portable airborne magnetometry system using a hybrid unmanned aerial vehicle (UAV). *Geosci Instrum Method Data Syst*, 2021, 10: 25–34
 - 26 Xu Q F, Deng Y C, Han T Y, et al. Towed geomagnetic survey system based on omnidirectional CPT atomic magnetometer (in Chinese). *J Instrum*, 2025, 46: 42–51 [徐强锋, 邓意成, 韩涛宇, 等. 基于自主全向CPT原子磁力仪的拖曳式地磁测绘系统. 仪器仪表学报, 2025, 46: 42–51]
 - 27 Shen L, Zhang R, Wu T, et al. Suppression of current source noise with an atomic magnetometer. *Rev Sci Instruments*, 2020, 91: 084701
 - 28 Peng X, Guo H. Technology of optically pumped atomic magnetometers (in Chinese). *Navigat Control*, 2022, 21: 101 [彭翔, 郭弘. 光泵原子磁力仪技术. 导航与控制, 2022, 21: 101]
 - 29 Xu Q F. Compensation method for cesium optically pumped aeromagnetic system on domestic UAV helicopter (in Chinese). *J Naval Aeronaut*

- Astronaut Univ, 2020, 35: 141–148 [许庆丰. 一型国产无人机直升机铯光泵航磁系统补偿方法研究和试验. 海军航空工程学院学报, 2020, 35: 141–148]
- 30 Lu Y T, Liu L S, Shi Y Q, et al. A high-sensitivity cesium atomic magnetometer based on a cesium spectral lamp. *Appl Sci*, 2023, 13: 8225
 - 31 Wang Q E. HC-90 helium optically pumped magnetometer (in Chinese). In: 10th Annual Meeting Chinese Geophys Soc, 1994. 391 [王庆粤. HC-90氦(He4)光泵磁力仪. 中国地球物理学会第十届学术年会, 1994. 391]
 - 32 Zou P Y, Luo S R, Gu J S. Comparison of two types of optically pumped magnetometers (in Chinese). *Acoust Electron Eng*, 2008, 2: 35–37 [邹鹏毅, 罗深荣, 顾建松. 两型光泵磁力仪比对试验结果及分析. 声学电子工程, 2008, 2: 35–37]
 - 33 Wu W F, Yuan H. Review of helium optically pumped magnetometer applications (in Chinese). *Acoust Electron Eng*, 2016, 4: 1–5 [吴文福, 袁皓. 氦光泵磁力仪的应用与发展研究综述. 声学电子工程, 2016, 4: 1–5]
 - 34 Guo Y, Wan S, Sun X, et al. Compact, high-sensitivity atomic magnetometer utilizing the light-narrowing effect and in-phase excitation. *Appl Opt*, 2019, 58: 734
 - 35 Wang J, Guo Z Q, Liu J Y. Magnetic compensation model analysis for fixed-wing UAV aeromagnetic detection system (in Chinese). *Acta Aeronaut Astronaut Sin*, 2016, 37: 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. 航空学报, 2016, 37: 3435–3443]
 - 36 Xu Z L, Li J F, Cui Z Q, et al. UAV aeromagnetic survey test in Duobaoshan exploration area (in Chinese). *Geophys Geochem Explor Comput Tech*, 2016, 38: 501–506 [胥值礼, 李军峰, 崔志强, 等. 无人机航空磁测技术在多宝山整装勘查区的应用试验. 物探化探计算技术, 2016, 38: 501–506]
 - 37 Wu T Q, Xu X M, Ren L P, et al. Advances and prospects of UAV marine aeromagnetic measurement technology (in Chinese). *Mar Surv Mapping*, 2017, 37: 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. 海洋测绘, 2017, 37: 17–20]
 - 38 Li Z P. Aeromagnetic measurement in special areas using rotary-wing UAV (in Chinese). *Chin J Geophys*, 2018, 61: 317–326 [李志鹏. 特殊区域旋翼无人机航磁测量研究. 地球物理学报, 2018, 61: 317–326]
 - 39 Cui Z Q. Current status and prospect of UAV airborne geophysical exploration technology (in Chinese). *Geophys Geochem Explor Comput Tech*, 2020, 38: 740–745 [崔志强. 无人机航空物探技术研发应用现状与展望. 物探化探计算技术, 2020, 38: 740–745]
 - 40 Zhou J X, Liu H J. Development and application of CH-4 UAV aeromagnetic system (in Chinese). *Geophys Geochem Explor*, 2016, 44: 265–273 [周坚鑫, 刘浩军. CH-4无人机航磁系统研制与应用. 物探与化探, 2016, 44: 265–273]
 - 41 Kolster M E, Wigh M D, Lima Simões da Silva E, et al. High-speed magnetic surveying for unexploded ordnance using UAV systems. *Remote Sens*, 2022, 14: 1134
 - 42 Dadrass Javan F, Samadzadegan F, Toosi A, et al. Unmanned aerial geophysical remote sensing: a systematic review. *Remote Sens*, 2025, 17: 110
 - 43 Li Y Z, Li J K, Meng X B, et al. Research status and prospect of UAV aeromagnetic measurement technology (in Chinese). *Mineral Explor*, 2025, 16: 857–864 [李艺舟, 李江坤, 孟祥宝, 等. 无人机航磁测量技术研究现状与展望. 矿产勘查, 2025, 16: 857–864]
 - 44 Wang S Y. Status and trend of foreign military UAV development (in Chinese). *Silicon Valley*, 2014, 7: 5–7 [王树源. 国外军用无人机发展现状与趋势. 硅谷, 2014, 7: 5–7]
 - 45 Dong P, Sun Z, Zou N Y, et al. Current status and development of foreign airborne magnetic detection equipment (in Chinese). *Ship Sci Technol*, 2018, 40: 166–168 [董鹏, 孙哲, 邹念洋, 等. 国外磁探潜装现状与发展趋势. 舰船科学技术, 2018, 40: 166–168]
 - 46 Cheng J B, Sun X Y. Review of aeromagnetic anomaly detection technology development (in Chinese). *Acoust Electron Eng*, 2018, 3: 46–49 [成建波, 孙心毅. 航空磁异常探测技术发展综述. 声学电子工程, 2018, 3: 46–49]
 - 47 Ariante G, Del Core G. Unmanned aircraft systems (UASs): current state, emerging technologies, and future trends. *Drones*, 2025, 9: 59
 - 48 Zhang S. Iran captures ScanEagle UAV again (in Chinese). *Ordnance Knowl*, 2013, 2: 54–56 [长山. 伊朗再捕“扫描鹰”. 兵器知识, 2013, 2: 54–56]
 - 49 Wang X K, Liu Z H, Cong Y R, et al. Review and prospect of small fixed-wing UAV swarms (in Chinese). *Acta Aeronaut Astronaut Sin*, 2020, 41: 20–45 [王祥科, 刘志宏, 丛一睿, 等. 小型固定翼无人机集群综述和未来发展. 航空学报, 2020, 41: 20–45]
 - 50 Guo H, Wang M, Yao Y Y, et al. R&D and application study of the CH-4 UAV three-component aeromagnetic measurement system (in Chinese). *Acta Geophys Sin*, 2022, 65: 4485–4494 [郭华, 王明, 姚雨暘, 等. 彩虹-4无人机航磁三分量测量系统研发及应用研究. 地球物理学报, 2022, 65: 4485–4494]
 - 51 Qin J, Zhang C, Zheng Y X, et al. Aeromagnetic compensation system for suppressing geological magnetic interference (in Chinese). *PRC Patent*, 202410427507, 2025-07-18 [秦杰, 张超, 郑垚鑫, 等. 抑制地质磁干扰的航空磁补偿方法及系统. 中国专利, 202410427507, 2025-07-18]
 - 52 Shi H Y, Song X L, Liu J S, et al. Blind-zone-free detection method for helium laser pumped magnetometer based on rotational polarization (in Chinese). *J Instrum*, 2020, 41: 54–62 [时洪宇, 宋晓林, 刘金胜, 等. 基于旋转偏振的氦激光泵浦磁力仪无盲区探测方法研究. 仪器仪表学报, 2020, 41: 54–62]
 - 53 Norton A, Donoghue B, Gavriel P. UA-1 PH2 DECISIVE testing handbook: test methods and benchmarking performance results for sUAS in dense urban environments. 2025, arXiv: 2502.01648

- 54 Schmidt V, Becken M, Schmalzl J. A UAV-borne magnetic survey for archaeological prospection of a Celtic burial site. *First Break*, 2020, 38: 61–66
- 55 Oh S, Kim B. A review on multirotor UAV-based magnetic surveys for near-surface targets. *J Korean Soc Miner Energy Resour Eng*, 2022, 59: 585–597
- 56 Kolster M E, Døssing A. Scalar magnetic difference inversion applied to UAV-based UXO detection. *Geophys J Int*, 2020, 224: 468–486
- 57 Schmid V, Becken M, Schmalzl J. A UAV-borne magnetic survey for archaeological prospection of a Celtic burial site. In: EAGE Annual Meeting, 2020
- 58 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. *Geo-spatial Inf Sci*, 2018, 21: 67–74
- 59 Han P H, Wang Y G, Shi Y, et al. Magnetic interference testing of multirotor UAV for aeromagnetic measurement (in Chinese). *Prog Geophys*, 2024, 39: 369–378 [韩鹏辉, 王勇刚, 石岩, 等. 用于航磁测量的多旋翼无人机磁干扰测试研究. *地球物理学进展*, 2024, 39: 369–378]
- 60 Zhang W J, Yang S, Guo G, et al. Lightweight UAV aeromagnetic surveying system and its prospect (in Chinese). *Mineral Explor*, 2021, 12: 989–999 [张文杰, 杨生, 郭刚, 等. 轻型无人机航磁调查系统及其在矿产勘查中的应用前景. *矿产勘查*, 2021, 12: 989–999]
- 61 Qiao Z K, Ma G Q, Zhou W N, et al. Comprehensive compensation of system errors in multirotor UAV aeromagnetic survey (in Chinese). *Chin J Geophys*, 2020, 63: 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. *地球物理学报*, 2020, 63: 4604–4612]
- 62 Reeves C V. The Kalahari, Central Southern Africa: a case history of regional gravity and magnetic exploration. *Geophysics*, 1983, 48: 450
- 63 Qin J, Zhou Y, Wang Y. A High dynamic range and ultralow-noise bipolar current source for unshielded SERF atomic magnetometers. *IEEE Trans Instrum Meas*, 2022, 71: 1–8
- 64 Qiu Y X, Zhang Y, Ge Y S, et al. In-flight calibration of the fluxgate magnetometer on Macau Science Satellite-1. *Earth Planet Phys*, 2025, 9: 511–520
- 65 Qiao Z K. Self-compensation methods for multi-parameter data in multirotor UAV aeromagnetic surveys (in Chinese). Doctor Dissertation. Changchun: Jilin University, 2021 [乔中坤. 多旋翼无人机航磁多参量数据的自补偿方法研究. 博士学位论文. 长春: 吉林大学, 2021]
- 66 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. *Leading Edge*, 2017, 36: 552–557
- 67 Zhang S, Lu J, Zhou Y, et al. Zero field optically pumped magnetometer with independent dual-mode operation. *Chin Opt Lett*, 2022, 20: 081202
- 68 Baranowski J, Drabek T, Piątek P, et al. Diagnosis and mitigation of electromagnetic interference generated by a brushless DC motor drive of an electric torque tool. *Energies*, 2021, 14: 2149
- 69 Liu S, Hu X Y, Guo N, et al. Review of UAV aeromagnetic measurement technology (in Chinese). *J Wuhan Univ (Inf Sci Ed)*, 2023, 48: 823–840 [刘双, 胡祥云, 郭宁, 等. 无人机航磁测量技术综述. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2023, 48: 823–840]
- 70 Li L Y, Sun Z Y, Pan D H, et al. Review of near-zero magnetic environment devices (in Chinese). *Trans China Electrotech Soc*, 2015, 30: 136–140 [李立毅, 孙芝茵, 潘东华, 等. 近零磁环境装置现状综述. *电工技术学报*, 2015, 30: 136–140]
- 71 Wang Y, Yang Y X, Sun H P, et al. Deep underground multi-physics field observation at –848 m in Huainan. *Sci China Earth Sci*, 2023, 66: 54–70 [王赟, 杨亚新, 孙和平, 等. 深部地下多物理场观测研究——淮南–848 m深地试验. *中国科学: 地球科学*, 2023, 53: 55–71]
- 72 Ren H, Wang Y, Chen C, et al. Underground laboratories deep underground observation scientific questions—Insights from observations of multi-physic fields in deep underground labs. *Sci China Earth Sci*, 2025, 68: 343–362 [任辉启, 王赟, 陈畅, 等. 地下实验室·深地观测·科学问题——来自深地多物理场观测的启示. *中国科学: 地球科学*, 2025, 55: 348–366]
- 73 Guo L H, Wang B, Song X L, et al. Continuous geomagnetic field observation and temporal characteristics in Huainan deep underground laboratory (in Chinese). *Chin J Geophys*, 2024, 67: 820–828 [郭良辉, 王博, 宋晓林, 等. 淮南深地地磁总场连续观测与时变特征. *地球物理学报*, 2024, 67: 820–828]
- 74 Xie C, Chen C, Liu C, et al. Insights from underground laboratory observations: attenuation-induced suppression of electromagnetic noise. *Eur Phys J Plus*, 2024, 139: 218
- 75 Han M, Guo L, Wang Y, et al. Continuous underground observation of the geomagnetic field in Xuzhou City, North China, and its time-varying characteristics. *Front Earth Sci*, 2025, 12: 1505187
- 76 Gnadt A R, Belarge J, Canciani A, et al. Signal enhancement for magnetic navigation challenge problem. 2020, arXiv: 2007.12158
- 77 Mao N, Chen S, Yang Y Y, et al. Extraction and prediction of long-term geomagnetic variations (in Chinese). *Chin J Geophys*, 2023, 66: 3302–3315 [毛宁, 陈石, 杨永友, 等. 地磁长期变化信号提取和模型预测精度评估. *地球物理学报*, 2023, 66: 3302–3315]
- 78 Alken P, Thébaud E, Beggan C D, et al. International geomagnetic reference field: the thirteenth generation. *Earth Planets Space*, 2021, 73: 49
- 79 Chulliat A, Nair M, Fillion M, et al. Enhanced models and implementations for minimizing uncertainty in external magnetic fields. In: Industry Steering Committee on Wellbore Survey Accuracy (ISCWSA) 60th General Meeting, 2024
- 80 Maus S. An ellipsoidal harmonic representation of Earth's lithospheric magnetic field to degree and order 720. *Geochem Geophys Geosyst*, 2010,

11: Q0601

- 81 Maus S. Magnetic field model MF7. Geomag, 2010. <https://geomag.org/models/MF7.html>
- 82 Maus S. Enhanced magnetic model EMM2017. NOAA, 2017. <https://www.ncei.noaa.gov/products/enhanced-magnetic-model>
- 83 Kloss C, Finlay C C, Olsen N, et al. The CHAOS-8 geomagnetic field model. *Earth Planets Space*, 2026, 78: 21
- 84 Finlay C C, Kloss C, Olsen N, et al. The CHAOS-7 geomagnetic field model and observed changes in the South Atlantic Anomaly. *Earth Planets Space*, 2020, 72: 156
- 85 Sabaka T J, Toffner-Clausen L, Olsen N, et al. CM6: a comprehensive geomagnetic field model derived from both CHAMP and Swarm satellite observations. *Earth Planets Space*, 2020, 72: 80
- 86 Nair M, Woods A, Chulliat A, et al. A real-time magnetic disturbance model to improve drilling accuracy in low and mid latitudes of the Earth. In: Industry Steering Committee on Wellbore Survey Accuracy (ISCWSA) 42nd Meeting, 2015
- 87 Nair M, Chulliat A, Woods A, et al. Next generation high-definition geomagnetic model for wellbore positioning. In: International Offshore Technology Conference, 2021
- 88 Jiang Y. Lithosphere magnetic field modeling in China continent by combining satellite and aeromagnetic data (in Chinese). Doctor Dissertation. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology, 2020 [姜乙. 联合全球卫星模型和航磁数据的中国大陆地区岩石圈磁场建模研究. 博士学位论文. 南京: 南京信息工程大学, 2020]
- 89 Gerhards C. Multiscale modeling of the geomagnetic field and ionospheric currents. In: Freeden W, Nashed M, Sonar T, eds. Handbook of Geomathematics. Berlin, Heidelberg: Springer, 2014. 1–37
- 90 Constable C, Constable S. A grand spectrum of the geomagnetic field. *Phys Earth Planet Inter*, 2023, 344: 107090
- 91 Hammer M D, Cox G A, Brown W J, et al. Geomagnetic Virtual Observatories: monitoring geomagnetic secular variation with the Swarm satellites. *Earth Planets Space*, 2021, 73: 54
- 92 Min J, Grayver A. A decade of the fast-varying ionospheric and magnetospheric magnetic fields from ground and multisatellite observations. *Geophys J Int*, 2025, 241: 797–825
- 93 Tolles W E, Lawson J D. Magnetic compensation of MAD equipped aircraft. Airborne Instruments Labs, 1950, 20: 201
- 94 Bickel S H. Small signal compensation of magnetic fields resulting from aircraft maneuvers. *IEEE Trans Aerosp Electron Syst*, 1979, AES-15: 518–525
- 95 He J L. History, status and trends of aircraft magnetic compensation (in Chinese). *Geosci Instrum*, 1991, 10: 1–7 [何敬礼. 飞机磁补偿的历史、现状及发展趋势. 地学仪器, 1991, 10: 1–7]
- 96 Meng Q K, Zhou D W, Gao W, et al. History and development of aeromagnetic compensation technology (in Chinese). *Geophys Geochem Explor*, 2017, 41: 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. 物探与化探, 2017, 41: 694–699]
- 97 Cui S Y, Zhang L L, Shan Z C, et al. Development status and trend analysis of UAV aeromagnetic compensation technology (in Chinese). *Surv Mapping Technol Equip*, 2025, 27: 113–117 [崔双月, 张磊磊, 单志超, 等. 无人机航磁补偿技术发展现状及趋势浅析. 测绘技术装备, 2025, 27: 113–117]
- 98 Ge J, Liu L, Dong X, et al. A trajectory optimization method for reducing magnetic disturbance of an internal combustion engine powered unmanned aerial vehicle. *Aerospace Sci Tech*, 2021, 116: 106885
- 99 Ge J, Liu L. Electromagnetic interference modeling and elimination for a solar/hydrogen hybrid powered small-scale UAV. *Chin J Aeron*, 2023, 36: 293–308
- 100 Fulginei F R, Salvini A. Softcomputing for the identification of the Jiles-Atherton model parameters. *IEEE Trans Magn*, 2005, 41: 1100–1108
- 101 Xia S, Zhou G, Wu K, et al. Numerical simulation and model-scale experiment verification of magnetic evolution in ship degaussing based on equivalent magnetic domains (in Chinese). *Chine J Ship Res*, 2026, 21: 297–304 [夏帅, 周国华, 吴轲娜, 等. 基于等效磁畴的船舶消磁磁性演变规律数值模拟及船模实验验证. 中国舰船研究, 2026, 21: 297–304]
- 102 Toledo-Redondo S, Salinas A, Portí J, et al. Study of Schumann resonances based on magnetotelluric records from the western Mediterranean and Antarctica. *J Geophys Res*, 2010, 115: D22
- 103 Song Z, Pei Y, Zhang S, et al. Noise compensation of a mobile LTS SQUID planar gradiometer for aeromagnetic detection. *IEEE Trans Appl Supercond*, 2019, 29: 1–5
- 104 Dahlen F A, Sailor R V. Rotational and elliptical splitting of the free oscillations of the Earth. *Geophys J Int*, 1979, 58: 609–623
- 105 Widmer R, Masters G, Gilbert F. Observably split multiplets-data analysis and interpretation in terms of large-scale aspherical structure. *Geophys J Int*, 1992, 111: 559–576
- 106 Naticchioni L, Boschi V, Calloni E, et al. Characterization of the Sos Enattos site for the Einstein Telescope. *J Phys-Conf Ser*, 2020, 1468: 012242
- 107 Naticchioni L, Perciballi M, Ricci F, et al. Microseismic studies of an underground site for a new interferometric gravitational wave detector. *Class Quantum Grav*, 2014, 31: 105016

- 108 Gnadt A R. Machine learning-enhanced magnetic calibration for airborne magnetic anomaly navigation. In: AIAA Science and Technology Forum and Exposition, AIAA SciTech Forum 2022, 2022
- 109 Zhai Z M, Moradi M, Kong L W, et al. Detecting weak physical signal from noise: a machine-learning approach with applications to magnetic-anomaly-guided navigation. *Phys Rev Appl*, 2023, 19: 034030
- 110 Nerrise F, Sosanya A, Neary P. Physics-informed calibration of aeromagnetic compensation in magnetic navigation systems using liquid time-constant networks. 2024, arXiv: [2401.09631](#)

补充材料

- 表S1 国内外主要的量子磁力仪研发团队和产品性能参数
- 表S2 美国军方使用的固定翼无人机磁探测系统
- 表S3 国内主要的固定翼和复合翼无人机磁探测系统
- 表S4 国外的主流多旋翼无人机磁探测系统
- 表S5 国际代表性全球地磁场模型
- 表S6 航磁补偿模型对比表
- 图S1 不同飞行高度有人机高空航磁(a)与无人机低空航磁(b)对比
- 图S2 新疆某地多旋翼无人机光泵磁力仪测量的磁异常
- 图S3 磁性体感应磁化效应
- 图S4 已建成的泰山深地实验室无磁房(a)与建设中的深地零磁空间设计概念图(b)
- 图S5 无磁滑轨移动模拟系统(a)与立体pT级磁感知阵列(b)设计图
- 图S6 中国地区不同地磁场模型(CHAOS-6、LCS-1、MF7和NGDC)计算的岩石圈磁异常对比
- 图S7 地磁场时空结构的复杂性
- 图S8 地磁场频谱的复杂性

本文以上补充材料见网络版csb.scichina.com. 补充材料为作者提供的原始数据, 作者对其学术质量和内容负责.

Summary for “pT级多旋翼无人机量子磁测的优势与挑战”

Advantages and challenges of pT-level quantum magnetic surveying mounted on multi-rotor UAVs

Yun Wang^{1*}, Yufeng Shi², Qi Han³, Yanzhang Wang⁴, Guiying Zhang⁵, Lianghui Guo¹, Changli Yao¹, Hao Qing⁶, Guoqing Ma⁴, Xiaoquan Zhou⁷, Jiadong Dai^{1*}, Zongxu Liu¹ & Guangjie Wang⁸

¹ State Key Laboratory of Deep Earth Exploration and Imaging, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China

² Shandong Institute of Space Electronic Technology, Yantai 264000, China

³ Faculty of Computing, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China

⁴ State Key Laboratory of Deep Earth Exploration and Imaging, Jilin University, Changchun 130021, China

⁵ School of Physics, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China

⁶ Gik (Shenzhen) Technology Co., Ltd., Shenzhen 518100, China

⁷ Beijing Eusci Earth Technologies Ltd., Beijing 100043, China

⁸ Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

* Corresponding authors, E-mail: yunwang@mail.iggcas.ac.cn; djd4306@163.com

A comprehensive review of the current state of aeromagnetic technology reveals that the real accuracy of quantum aeromagnetic survey mounted on multi-rotor drones remains at the nano-Tesla (nT) level, far lower than the theoretical expectation of pico-Tesla (pT) accuracy, while the fixed-wing and composite-wing drones achieve accuracies ranging around tens of pTs by utilizing large wingspans to mitigate magnetic interference from the drone itself; The primary causes of degraded performance in multi-rotor UAV quantum magnetic measurement are due to the extremely complex Earth's magnetic field and magnetic disturbances which affect magnetometers, UAVs, and their integrated systems under static and moving conditions, and due to the lack of optimized matching hardware and software, along with compensation techniques. Essentially, the degraded performance of quantum magnetic survey mounted on multi-rotor UAVs' should be attributed to unknown coupling mechanisms between the Earth's endogenous and exogenous fields, secondary induction fields, the material magnetic disturbances of magnetometer itself, the UAVs and its components mounted, the interactions of their induced magnetic fields and the electromagnetic eddy current under dynamic conditions, which generate complex spatiotemporal interferences under multi-source, multi-scale of geomagnetic field. And that inabilities of the traditional system optimization and software compensation techniques further degrade the performance, especially as the traditional techniques of daily variation correction and normal field correction only achieve nT-level precision. Further analysis suggests that artificial intelligence (AI) technology can overcome the limitations of the T-L model and other technical bottlenecks in multi-rotor UAV quantum magnetic surveying, only by utilizing mobile simulation systems in large zero-magnetic or stable-magnetic room, combined with ultra-high-sensitivity magnetic sensor arrays, and simultaneously conducting comprehensive static and moving experiments on multi-rotor drones, quantum magnetometers and their composite systems so as to accumulate extensive machine learning samples and achieve to disruptive sub-nT or pT-level magnetic measurements.

aeromagnetic surveying, UAV, multi-rotor, quantum magnetometer, performance degradation, pT-level

doi: [10.1360/CSB-2025-5877](https://doi.org/10.1360/CSB-2025-5877)