

基于自主全向 CPT 原子磁力仪的拖曳式地磁测绘系统

徐强锋^{1,2}, 邓意成^{1,2}, 韩涛宇^{1,2}, 和焕雪^{1,2}, 王学锋^{1,2}

(1. 北京航天控制仪器研究所 北京 100854; 2. 中国航天科技集团有限公司量子工程研究中心 北京 100094)

摘要: 无人机拖曳式地磁测绘技术因其能够有效抑制载体磁干扰, 在高精度航空磁测领域具有重要的应用价值。提出并构建了一种基于相干布居俘获(CPT)原子磁力仪的拖曳式地磁测绘系统, 该系统首次采用单探头架构, 充分发挥CPT原子磁力仪的高灵敏度和全向自主测量特性, 可实现全纬度范围内的高精度地磁测量。为验证系统性能, 在近海区域开展了多次飞行试验, 并提出了一套系统化的数据处理与磁图绘制方法, 集成航向误差补偿、载体磁干扰抑制、地磁日变校准、地磁参考场改正及高分辨率插值制图等关键技术, 以提升测量数据的准确性和可靠性。试验结果表明, 在未经数据处理的情况下, 航磁测量的总精度为2.517 nT(1σ); 经过误差补偿及优化处理后, 总精度提升至0.849 nT(1σ), 有效降低了系统性误差的影响。此外, 为评估系统在不同测量条件下的稳定性, 对两次独立飞行获取的数据进行相同处理, 并对比分析生成的地磁异常图。结果表明, 两次测绘所得地磁异常图的相关系数高达99.8%, 均方根误差(RMSE)为1.149 nT, 表明系统具备卓越的数据一致性和测量重复性。研究结果表明, 所构建的基于CPT原子磁力仪的拖曳式地磁测绘系统不仅有效克服了传统航空磁测系统受载体磁干扰影响较大的问题, 实现了高精度磁场测量, 同时在实际飞行试验中展现出优异的稳定性。

关键词: CPT原子磁力仪; 拖曳式地磁测绘系统; 地磁异常图; 航空磁测; 误差补偿

中图分类号: TH761 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 460.4045

Towable geomagnetic surveying system based on autonomous omnidirectional CPT atomic magnetometer

Xu Qiangfeng^{1,2}, Deng Yicheng^{1,2}, Han Taoyu^{1,2}, He Huanxue^{1,2}, Wang Xuefeng^{1,2}

(1. Beijing Institute of Aerospace Control Devices, Beijing 100854, China; 2. Quantum Engineering Research Center, China Aerospace Science and Technology Corporation, Beijing 100094, China)

Abstract: The unmanned aerial vehicle (UAV)-towed geomagnetic surveying technique provides significant benefits in minimizing platform-induced magnetic interference, making it a highly effective approach for high-precision aeromagnetic surveys. This study introduces a novel towed geomagnetic surveying system based on a Coherent Population Trapping (CPT) atomic magnetometer, which uniquely utilizes a single-probe architecture for the first time. By harnessing the high sensitivity and omnidirectional self-sensing capabilities of the CPT atomic magnetometer, the system facilitates high-precision geomagnetic measurements across all latitudes. To validate the system's performance, multiple flight experiments were conducted in offshore regions. A comprehensive data processing and magnetic mapping methodology was developed, incorporating key techniques such as heading error compensation, suppression of platform magnetic interference, correction of geomagnetic diurnal variations, adjustment of the geomagnetic reference field, and high-resolution interpolation-based mapping, significantly improving the accuracy and reliability of the measurements. Experimental results revealed that before data processing, the total accuracy of airborne magnetic measurements was 2.517 nT (1σ). After applying extensive error compensation and optimization, the accuracy improved markedly to 0.849 nT (1σ), effectively reducing systematic errors. Additionally, to evaluate the system's stability under varying measurement conditions, data from two independent survey flights were processed identically and analyzed for consistency. The results showed a correlation coefficient of 99.8% between the two independently generated geomagnetic anomaly maps, with a root mean square error of 1.149 nT, confirming the system's excellent data consistency and repeatability. These findings demonstrate that the developed CPT atomic magnetometer-based towed geomagnetic surveying system successfully addresses the challenges of platform-induced magnetic interference in conventional aeromagnetic surveys, while achieving

high-precision magnetic field measurements and exceptional stability in real-world flight experiments.

Keywords: CPT atomic magnetometer; towed geomagnetic surveying system; geomagnetic anomaly mapping; aeromagnetic survey; error compensation

0 引言

地磁测绘技术在多个领域中得到了广泛应用,特别是在海洋环境中,已成为海底地质构造解析、矿产资源勘探、油气田开发、水下考古、海洋科学的研究及军事防御等领域的的重要工具^[1-5]。尽管传统海洋地磁测绘方法已取得一定进展,但仍面临诸多挑战,尤其是如何有效减小平台磁干扰对测量精度的影响,以及如何确保设备在全纬度范围内的适应性和稳定性。

目前,海洋地磁测绘主要依赖两种方式:航空磁探测与海洋拖曳磁探测^[6-7]。航空磁探测根据磁力仪安装方式的不同,通常可分为捷联安装和拖曳式安装。捷联安装一般使用经过弱磁设计或改造的固定翼飞机,将磁力仪安装于尾部或机翼尖,适合长时间、大范围飞行,能够高效覆盖广阔海域。然而,低空飞行存在较高风险,且易受平台干扰,可能影响测量精度^[8]。与此不同,航空拖曳磁探测和海洋拖曳磁探测通过将磁力仪安装在旋翼飞机(如直升机、无人机)或船舶的拖曳装置上,有效避免了平台磁源对测量的干扰,从而展示了显著的测量精度优势^[9]。拖曳式系统具有灵活部署、高可靠性和高精度的特点,能够在动态飞行或航行过程中稳定输出数据。因此,在高精度地磁图绘制中,已逐渐成为理想选择。

在海洋地磁测绘中,尤其是在南海等低纬度地区,光泵效应导致传统铯光泵磁力仪常进入盲区,从而影响测量效率^[10]。为此,通常采用多探头组合设计来弥补盲区。例如,加拿大的磁异常探测扩展设备(magnetic anomaly detection-extended role, MAD-XR)通过多光学系统设计,成功消除了方向盲区,显著提高了测量精度和系统适应性。然而,该设计方案的体积、复杂度和成本较高,限制了其在实际应用中的广泛推广^[11]。

相比之下,基于相干布居俘获(coherent population trapping, CPT)原子磁力仪的地磁测绘系统,凭借其全向自主测量、高灵敏度、低噪声以及小型化特点,展现了显著的应用潜力^[12]。CPT原子磁力仪能够提供360°全方位的高精度测量,显著提高了地磁测绘的灵活性和精度,尤其适用于全纬度或动态环境中的任务。结合拖曳式系统进行部署,能够有效减小平台磁干扰,从而进一步提高测量精度。因此,基于CPT原子磁力仪的海洋地磁测绘技术,在提高测量精度和拓展应用范围方面具有重要的研究价值,特别是在低纬度地区的高精度地磁异常探测任务中,展现了巨大的潜力。

提出并构建了一套基于CPT原子磁力仪的拖曳式海洋地磁测绘系统,并成功应用于近海地区的地磁异常图测绘工作。该系统通过实施多项误差修正措施,有效提高了测量精度,显著减少了系统误差,验证了其在实际应用中的可行性和稳定性。本研究将详细阐述该系统的方案设计、技术实现过程及关键技术,包括系统集成方案和误差修正策略,并结合试验数据和现场应用案例,展示该系统在海洋地磁测绘中的实际应用效果。

1 自主全向适应CPT原子磁力仪测量原理

CPT原子磁力仪的工作原理基于CPT效应和塞曼效应^[13]。当外部磁场施加于原子系统时,原子的超精细能级因塞曼效应发生分裂,形成多个Λ型三能级结构。相干光源激发这些Λ型三能级结构中的量子跃迁,从而诱导出CPT信号。CPT信号之间的频率差与外部磁感应强度呈正比关系。图1(a)和(b)分别描绘了87Rb原子D1线的CPT原子磁力仪探头的激光传播方向与磁场方向夹角为0°和90°时的能级跃迁过程,对应产生3个和4个CPT信号。当激光方向与磁场方向之间的夹角为任意值时,原子系统将生成7个CPT信号^[14]。

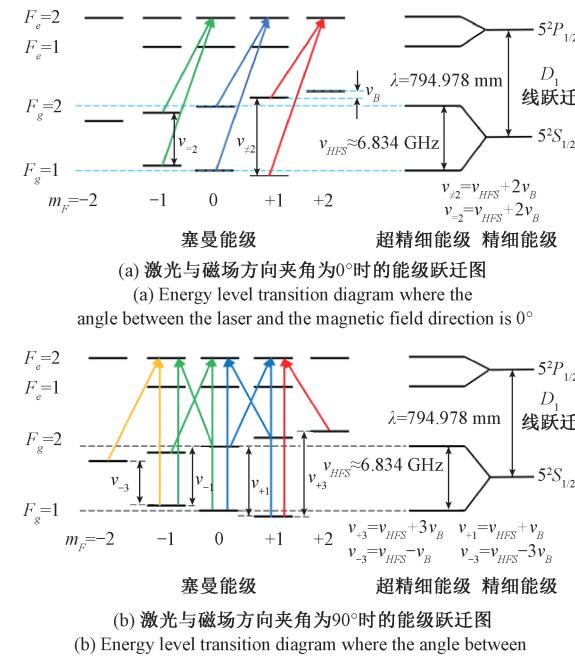


图1 CPT原子磁力仪塞曼能级跃迁图^[14]

Fig. 1 Zeeman energy level transition diagram of the CPT atomic magnetometer

通常情况下,相干光源的产生可通过微波调制激光器的方法实现,其中一种常见方式是利用相干的双边带调制技术。7 个 CPT 信号的微波共振频率可表示为:

$$\nu_n = \nu_0 + \frac{n}{2} \gamma B \quad (1)$$

其中, ν_n 为第 n 个 CPT 信号的微波频率, ν_0 为零磁场下的中心微波频率(约 3.417 GHz), γ 为 87 Rb 的旋磁比(约 7 Hz/nT), B 为待测磁感应强度。当 $n = 0$ 或 $n = \pm 2$ 表示图 1(a)对应的状态;当 $n = \pm 1$ 或 $n = \pm 3$ 表示图 1(b)对应的状态。因此,无论激光传播方向如何变化,CPT 效应仍可在原子系统中稳定产生多个共振信号。这意味着,即使外部磁场方向未知或发生变化,CPT 原子磁力仪仍然能够可靠地测量磁感应强度。通

过测量各个 CPT 信号的峰值微波频率 ν_n , 即可精确计算待测磁感应强度 B 。这一特性使 CPT 原子磁力仪具有全向测量能力,使其在高动态环境下仍能保持高精度的磁场测量。

2 基于 CPT 原子磁力仪的拖曳式地磁测绘系统

通过集成旋翼无人机与基于 CPT 原子磁力仪的拖曳式吊舱,设计了一种高精度、广覆盖的地磁测绘系统,如图 2 所示。该系统以 CPT 原子磁力仪为核心传感元件,主要由旋翼无人机平台、拖曳式吊舱以及地面控制站构成。

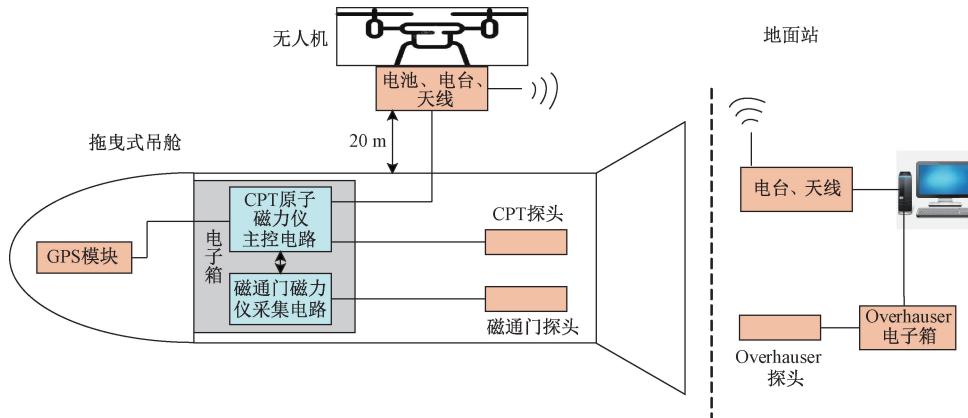


图 2 拖曳式地磁测绘系统方案

Fig. 2 Scheme of the towed geomagnetic mapping system

无人机作为系统的承载平台,提供拖曳系统所需的悬挂、电源和动力支持,并负责实时数据的无线传输。无人机搭载电池模块、电台通信模块和通信天线,通过约 20 m 长的缆绳与拖曳吊舱连接,确保磁传感器远离无人机主体,从而减少磁性部件(如电机和电控单元)对地磁测量的干扰。根据磁感应强度随距离三次方反比的规律,当缆绳长度约为 20 m 时,干扰相较于捷联安装方式(例如距离 4 m)显著降低。为了应对缆绳在工作过程中的拉力,电缆的设计略长于缆绳本身,以确保电路连接的机械稳定性。电池模块通过电缆为拖曳式地磁探测系统提供稳定的电源,同时,电缆将采集到的地磁数据传输至无线通信电台。经处理后,通过通信天线实时传输至地面站,实现高效的数据收集与传输。

拖曳式吊舱是该方案的核心模块,集成了 CPT 原子磁力仪探头、磁通门磁力仪探头、GPS 定位模块以及数据采集与主控电路。CPT 原子磁力仪的主控电路负责控制探头并采集地磁标量数据;采集电路则用于获取磁通门磁力仪的三轴磁场数据。磁通门磁力仪探头的 Y 轴方向

与 CPT 原子磁力仪探头的光轴方向平行,利用其输出的三轴数据,可以精确计算探头光轴与磁场方向之间的夹角及地磁方位角。这些数据对于航向误差补偿和航磁补偿至关重要,能够显著提高探测数据的精确性和可靠性。GPS 定位模块提供高精度的地理位置信息,确保测量数据与空间位置的精准对应,为后续地磁异常图的绘制和分析奠定基础。

地面站是系统的数据处理与分析中心,负责实时接收来自无人机端的无线数据流,并通过计算机对数据进行优化处理。在地面站,Overhauser 磁力仪对 CPT 原子磁力仪传输的数据进行地磁日变分析与校正,从而提高数据的准确性。同时,数据处理计算机负责数据存储、可视化展示以及深度分析。

根据图 2 所示的方案,完成了系统的集成。CPT 原子磁力仪具有 $8 \text{ pT/Hz}^{1/2}$ 的灵敏度,非线性度仅为 1.3 ppm,并具备自主全向适应能力,能够在复杂地磁环境中保持稳定的测量性能。磁通门磁力仪选用了 Bartington 公司生产的 Mag690-FL100 型号,其正交误

差 $<0.5^\circ$,具备矢量磁场测量能力。GPS模块采用了北天公司BE-280型号,水平定位精度为2 m,为拖曳式磁探测系统提供了可靠的定位支持。吊舱内的磁测量传感器如图3所示。



图3 地磁测量传感器

Fig. 3 Geomagnetic measurement sensor

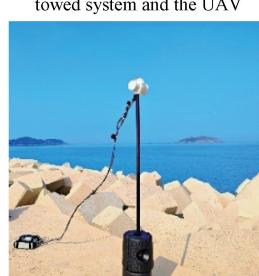
在地面部署方面,绝对磁场测量采用了加拿大GEM公司生产的GSM-19型Overhauser磁力仪,具备 ± 0.1 nT的绝对精度,确保地磁数据的高准确性。集成的地磁测绘系统全面部署后,实物连接效果如图4所示。



(a) 拖曳系统与无人机的连接
(a) Connection between the towed system and the UAV



(c) 空中无人机与拖曳式测绘系统
(c) Aerial UAV and towed mapping system



(b) 地面部署Overhauser磁力仪
(b) Ground deployment of the Overhauser magnetometer

图4 拖曳式地磁测绘系统实物

Fig. 4 Physical implementation of the towed geomagnetic mapping system

图4展示了拖曳式测绘系统在不同工作状态下的实物连接,包括地面准备、地面监测和空中作业3个阶段。图4(a)为拖曳系统与无人机连接完成,系统处于待起飞状态。图4(b)为地面部署的Overhauser磁力仪监测站。图4(c)则表示,随着无人机进入作业状态,拖曳系统被

提升至设定高度并开始工作。在飞行过程中,无人机沿预定航线飞行,拖曳系统在目标区域内执行地磁测绘与实时数据记录。整个飞行过程中,拖曳系统与地面站之间保持稳定的数据传输链路,确保采集的地磁数据能够实时监控并可靠保存。

3 磁数据处理方法

3.1 数据处理流程

提出了一套基于CPT原子磁力仪的拖曳式地磁测绘系统数据处理流程,涵盖数据采集、预处理、校准与补偿以及插值绘图等多个步骤,如图5所示。

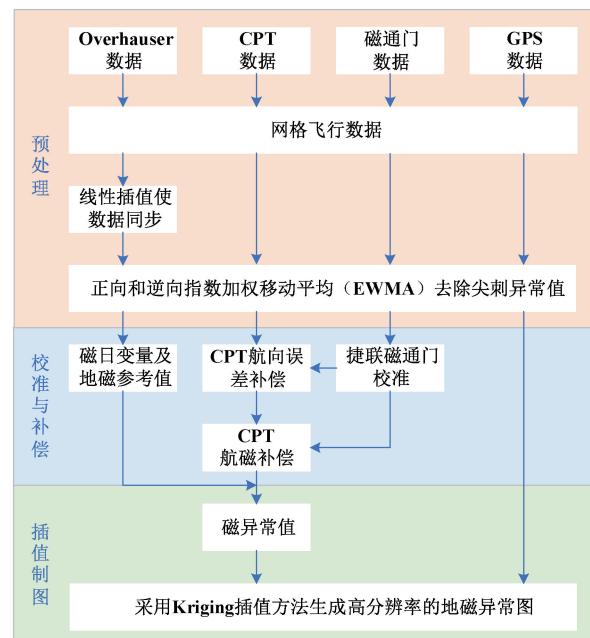


图5 数据处理流程

Fig. 5 Block of the data processing workflow

具体数据处理流程为:

首先,数据来源包括Overhauser磁力仪、CPT原子磁力仪、磁通门磁力仪和GPS模块。在网格飞行过程中,这些设备协同工作以实现磁场数据的高效采集。CPT原子磁力仪、磁通门磁力仪和GPS模块集成于拖曳式吊舱内,确保数据采集的同步性,且采样率高达50 Hz。而Overhauser磁力仪独立运作,采样率为5 Hz。为了保证多设备数据的一致性,在数据预处理阶段采用线性插值方法对不同设备采集的数据进行时间同步处理,消除了因时间偏差引入的测量误差。

在数据采集过程中,常会出现瞬时异常信号,通常表现为尖刺状波动,这些信号可能由吊舱内电子箱的电磁干扰引起。如果不加以处理,这些异常信号会干扰后续

的磁异常分析。因此,引入了正向和逆向指数加权移动平均(exponentially weighted moving average,EWMA)方法进行数据平滑处理。该方法通过加权平均赋予最近数据点更大的权重,结合正向和逆向滤波,有效去除尖刺状异常信号,同时保留了原始信号的波形特征^[15]。给定时间序列 x_t ($t = 1, 2, 3 \dots, N$), EWMA 的计算公式如式(2)所示。

$$EWMA_t = \alpha x_t + (1 - \alpha) EWMA_{t-1} \quad (2)$$

其中, α 为平滑因子, 控制新数据权重, $EWMA_{t-1}$ 是前一个时间步的指数加权平均值。

在数据校准与补偿阶段,首先采用 CPT 原子磁力仪的标量数据对磁通门磁力仪进行校准,获得更加稳定和精确的磁场值,为补偿 CPT 原子磁力仪的航向误差及拖曳吊舱的磁场干扰提供重要依据^[16-19]。磁通门磁力仪校准可以表述为优化问题,即:

$$\begin{aligned} \min \sum_{k=1}^N & \| \mathbf{B}_{Fk} - \mathbf{T}_{ek} \mathbf{m}_{ek} - \mathbf{b} \|^2 \\ \text{s. t. } & \mathbf{T}_{ek} = \mathbf{B}_{cptk} \cdot \mathbf{T}, \|\mathbf{m}_{ek}\| = 1, k = 1, \dots, N \end{aligned} \quad (3)$$

其中, \mathbf{B}_{Fk} 、 \mathbf{B}_{cptk} 分别表示为 k 时刻磁通门磁力仪和 CPT 原子磁力仪测得的磁场数据。 \mathbf{T} 为 3×3 变换矩阵, \mathbf{b} 为偏置项, \mathbf{m}_{ek} 为经过校准后三轴方向余弦向量。

CPT 原子磁力仪的航向误差是其固有特性之一,主要由探头光轴与地磁场方向之间的夹角变化引起,这可能导致测量结果偏移。为消除这一偏差,通过校准后的磁通门磁力仪数据计算 CPT 探头光轴与地磁场方向的夹角信息,并结合插值算法进行航向误差补偿^[20]。

设 $\{\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n\}$ 、 $\{B_{ip(1)}, B_{ip(2)}, \dots, B_{ip(n)}\}$ 分别表示预先标定的 n 个航向误差点横坐标和纵坐标的集合,在每个子区间 $[\theta_l, \theta_{l+1}]$ ($l = 1, \dots, n-1$) 内,均能得到与之对应的 4 个三次样条曲线的系数 $\{a_l, b_l, c_l, d_l\}$ 。如果磁通门磁力仪 k 时刻获取的探头 Y 轴与磁感应强度之间的角度 φ_k 在子区间 $[\theta_l, \theta_{l+1}]$ 内,则航向误差补偿模型为:

$$B_h(\varphi_k) = a_l + b_l(\varphi_k - \theta_l) + c_l(\varphi_k - \theta_l)^2 + d_l(\varphi_k - \theta_l)^3 \quad (4)$$

航向误差补偿完成后,下一步是建立拖曳吊舱的磁场干扰补偿模型,以消除拖曳吊舱等平台部件产生的磁场干扰^[21]。该补偿模型基于平台的磁场耦合特性,综合考虑涡流磁场、感应磁场及偏置磁场等主要干扰因素,并采用 18 维线性方程组进行系统建模与参数估计。为提高补偿模型的鲁棒性和实测适应性,引入带通滤波技术以提取特定频段内的磁干扰信号,抑制环境噪声及低频漂移效应。

$$(\mathbf{A}_{N \times 18})_f \boldsymbol{\beta} = (\mathbf{B}_{cpt} - \mathbf{B}_h)_f \quad (5)$$

$$\mathbf{B}_{int} = \mathbf{A}_{N \times 18} \boldsymbol{\beta} \quad (6)$$

其中, \mathbf{B}_{cpt} 、 \mathbf{B}_h 分别表示 CPT 原子磁力仪测量值向

量和航向误差向量, $\mathbf{A}_{N \times 18}$ 为常系数矩阵,其元素由磁通门测量数据计算得到的正余弦分量构成, $\boldsymbol{\beta}$ 为磁干扰系数向量, $(\cdot)_f$ 表示带通滤波算子, \mathbf{B}_{int} 表示航磁干扰项。

地磁日变化量和地磁参考值可通过 Overhauser 磁力仪提供的测量数据进行获取。其中,磁力仪测得的长时间尺度均值可用于表征地磁参考值,即研究区域在无显著短期扰动条件下的稳定地磁场背景。而磁场随时间的变化趋势,则反映了地磁日变化量,其主要受太阳活动、电离层电流及地球内部感应电流等因素影响。

经过校准与补偿,CPT 原子磁力仪的数据可以表示为:

$$\mathbf{B}'_{cpt} = \mathbf{B}_{cpt} - \mathbf{B}_h - \mathbf{B}_{int} - \mathbf{B}_{ovh} \quad (7)$$

其中, \mathbf{B}_{ovh} 为 Overhauser 磁力仪测量数据,用于提供地磁参考值以及地磁日变化量, \mathbf{B}'_{cpt} 表示 CPT 原子磁力仪测量的地磁异常值。

最后,结合经纬度信息与磁异常数据,采用克里金插值法对磁异常值进行空间插值,从而生成高分辨率地磁异常图^[22]。克里金插值作为一种基于统计学的最优无偏空间估计方法,能够充分利用磁异常值的空间相关性与变异结构,在抑制随机噪声的同时,最大程度保留磁场异常的真实分布特征^[23-24]。在插值计算过程中,需将所有测量数据归一至相同参考高度,以消除因高度差异导致的异常变化,可采用向上延拓或向下延拓技术进行标准化处理。

3.2 精度评估与误差分析方法

航空磁测的总精度受磁力仪系统的测量误差、定位误差以及校正不足或不准确所引起的误差的综合影响。在完成航向误差补偿、航磁补偿、地磁日变校正及地磁参考处理后,航空磁测的总精度通常可以通过计算航线交叉点磁场差值的均方根来进行评估^[25]。

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n \delta_i^2} \quad (8)$$

其中, δ_i 表示东西航线与南北航线交叉点磁感应强度误差, n 表示计算的交叉点个数。

磁异常图的相关性分析主要用于量化不同磁异常图在空间分布上的一致性,从而评估其相似程度。这一分析在数据校验、异常检测及磁异常模型验证等方面具有重要作用。通过相关性评估,可有效检测不同飞行次数或测量方法所获取数据之间的差异,从而优化数据分析算法,提高数据解释的可靠性。磁异常图的相关性通常采用皮尔逊相关系数量化,其定义为:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (A_i - \bar{A})(B_i - \bar{B})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (A_i - \bar{A})^2 \sum_{i=1}^n (B_i - \bar{B})^2}} \quad (9)$$

其中, A_i, B_i 分别表示两幅磁异常图在位置 i 处的磁异常值, \bar{A}, \bar{B} 为对应数据的均值, n 为空间采样点的总数。

均方根误差(root mean square error, RMSE)是衡量两幅磁异常图之间绝对误差分布的重要指标。该指标通过计算对应空间位置上磁异常值差异的平方均值,从整体上量化误差大小,能够有效评估测量数据的精度以及系统在不同时间段磁测数据的一致性。RMSE 值越小,表明两幅磁异常图的整体误差越低,数据拟合度越高,从而反映出测量或建模的准确性。其定义为:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (A_i - \bar{A})^2} \quad (10)$$

其中, A_i, B_i 分别表示两幅磁异常图在第 i 个位置的磁异常值, n 是总的采样点数。

经过上述数据处理流程,可进一步推导出 CPT 原子磁力仪的系统误差模型,即:

$$\Delta B_{\text{总}} = \sqrt{(|\Delta B_h| + |\Delta B_{int}|)^2 + \Delta B_{GPS}^2 + \Delta B_{ovh}^2 + \Delta B_{CPT}^2} \quad (11)$$

其中, ΔB_h 为航向补偿的误差,其主要受磁通门磁力仪提供的角度数据及其标定精度影响; ΔB_{int} 表示磁干扰补偿的误差,与环境磁噪声及补偿模型的精确性密切相关。这 2 项误差均受磁通门磁力仪的角度测量精度影响。 ΔB_{GPS} 表示 GPS 定位的误差引入的不确定性, ΔB_{ovh} 表示地磁日变矫正的误差,其受地磁场时空变化特性及建模方法的影响; ΔB_{CPT} 包含 CPT 原子磁力仪本征噪声、非线性响应误差等。

4 试验与结果分析

4.1 试验航线轨迹规划

飞行测试在威海近海地区(经纬度约 $122^{\circ}\text{E}, 37^{\circ}\text{N}$)进行,测试区域覆盖了图 6 所示的网格飞行区域。无人机从南北方向起飞,沿一系列东西方向和南北方向交替的“S”型航线飞行,最终返回终点,形成一个网格结构。整个测试区域的尺寸约为 $400\text{ m} \times 300\text{ m}$ 。图中黑色实心点表示南北和东西航线的交叉点,这些交叉点分布在在整个网格中,并按顺序编号,从 1~34。交叉点处的磁感应强度误差可作为航磁总精度的评价指标。

根据世界大地测量系统(world geodetic system, WGS),该区域位于通用横轴墨卡托投影(universal transverse mercator, UTM)的 51 N 带区。通过使用此坐标系统, GPS 获取的经纬度坐标被转换为以“m”为单位的 UTM 坐标^[26]。对于较小的飞行区域,采用 51 N 带区的坐标系统能够有效简化数据处理,并提升数据的空间可视化效果,便于后续的数据分析与处理。

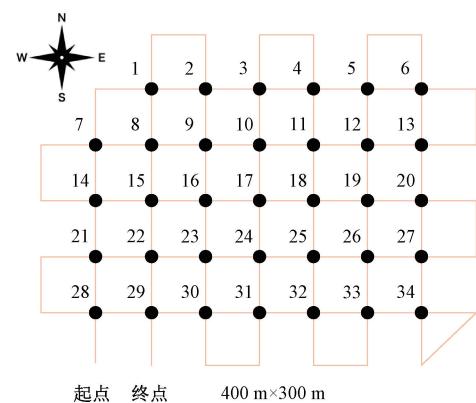


图 6 网格飞行航线布局

Fig. 6 Layout of the grid flight path

4.2 试验数据处理与结果分析

图 7 为某次航线飞行中获取的实测磁场数据。测量结果表明,该飞行区域的磁感应强度范围为 $52\ 425 \sim 52\ 580\text{ nT}$ 。由于拖曳吊舱在飞行过程中受到惯性效应与空气动力学影响,姿态控制难以保持完全稳定,导致实际航线出现一定程度的弯曲与变形。然而,这种轨迹偏差对磁场数据整体分析的影响较为有限。最终的磁异常图通过插值方法计算得到,将离散的测量数据转换为规则网格,从而有效减小个别航段轨迹偏移对磁场分布的影响。因此,即便在飞行过程中存在局部轨迹偏移,所生成的磁异常图仍能够较为准确地反映目标区域的磁场特征。

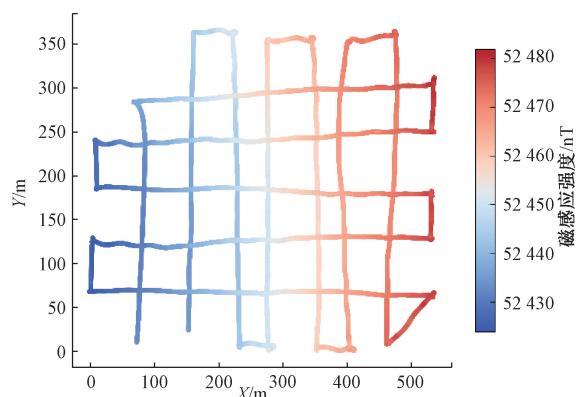


图 7 网格航线飞行的磁感应强度分布

Fig. 7 Magnetic induction intensity distribution of the grid flight path

图 8 为航线飞行中 CPT 原子磁力仪航向误差的补偿结果。图 8 中,右向箭头所指的曲线表示 CPT 原子磁力仪探头光轴与地磁场方向之间的夹角,该角度数据由经式(3)校准的磁通门磁力仪提供。从图 8 中可以看出,该夹角在 $20^{\circ} \sim 40^{\circ}$ 之间波动。然而,在航线飞行阶段,该角度波动较为剧烈,表明拖曳系统在空中姿态不稳定,这与图 7 所示的航线弯曲变形现象相符。左向箭头所指的

曲线表示航向误差补偿前后的结果,经式(4)模型计算,该航向误差范围为 $-0.771 \sim -0.567$ nT。由于航向误差符号一致,故补偿后的曲线表现为整体的向上偏移。

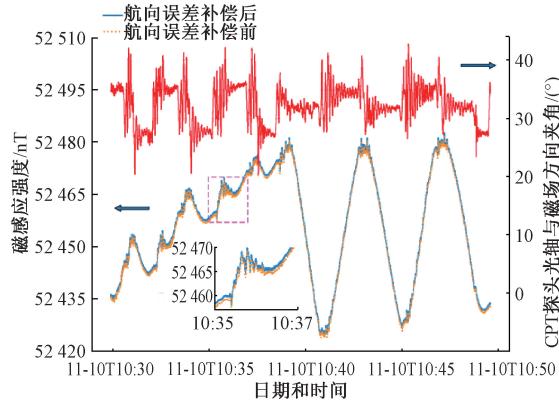


图 8 飞行数据的航向误差补偿

Fig. 8 Heading error compensation of flight data

图 9 为航线飞行中 CPT 原子磁力仪的航磁补偿结果。补偿前,磁场数据在转弯处由于载体的机动操作产生了明显的扰动,而补偿后,整体曲线在这些区域变得更加平滑。经式(5)、(6)计算可得,补偿后的剩磁标准差为 0.151 nT,表明载体机动所引入的磁干扰已得到有效抑制,从而使得系统对地磁信号的响应更加稳定。

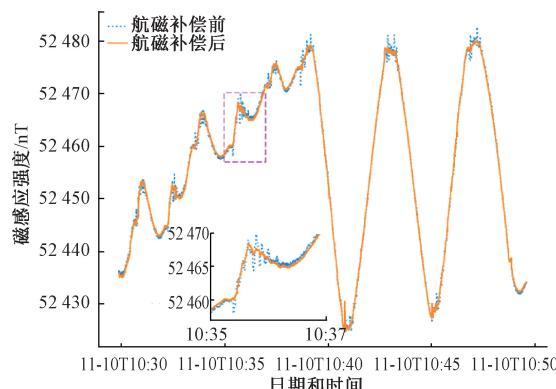


图 9 飞行数据的航磁补偿

Fig. 9 Aeromagnetic compensation of flight data

图 10 为东西航线与南北航线交叉点的磁场误差数据。根据式(8),未进行误差补偿和地磁日变校正时,航空磁测的总精度为 2.517 nT(1σ);而在进行误差补偿和地磁日变校正后,总精度提高至 1.085 nT(1σ)。进一步分析表明,若排除误差 $>3\sigma$ 的交叉点(如 5 和 12 号),航空磁测的总精度可进一步提升至 0.849 nT。

当前使用的 GPS 集成在电子箱中,定位精度较低,且吊舱外壳对天线信号存在遮挡,导致少数交叉点存在较大误差。未来将采用厘米级精度的 RTK 定位系统,并改进吊舱设计,使天线在吊舱外部,从而进一步提升定位精度和测量精度。

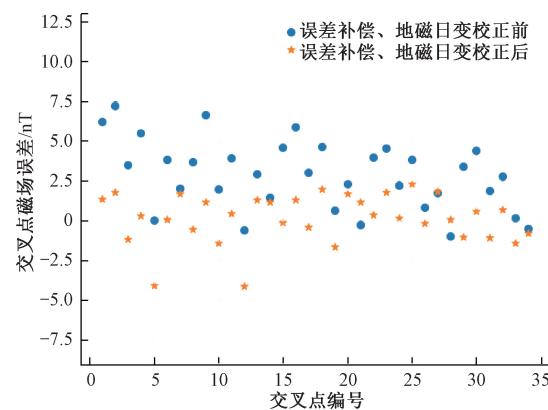
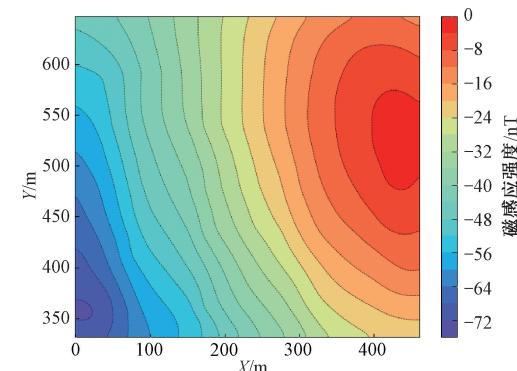


图 10 交叉点磁异常误差分布

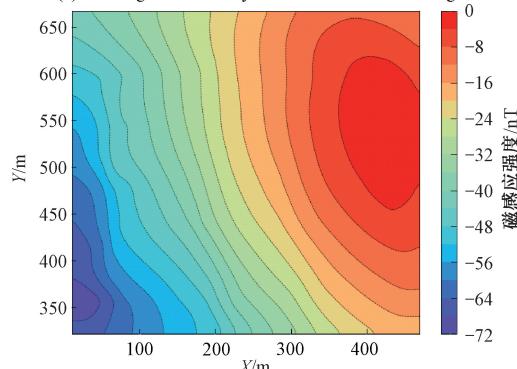
Fig. 10 Distribution of magnetic anomaly errors at crossover points

此外,选取两次覆盖相同飞行区域的航磁数据,按照统一的数据处理流程进行处理,并利用克里金插值法生成相应的地磁异常图。在插值过程中,网格点间距设定为 0.8 m。较小的网格间距有助于提高图像的空间分辨率,但同时也会显著增加计算负担。因此,网格间距的选择需在测量精度与计算效率之间进行权衡。图 11 为两次航线飞行获取的地磁异常图。



(a) 第1次飞行的地磁异常分布

(a) Geomagnetic anomaly distribution of the first flight



(b) 第2次飞行的地磁异常分布

(b) Geomagnetic anomaly distribution of the second flight

图 11 两次飞行数据处理生成的地磁异常分布

Fig. 11 Geomagnetic anomaly distribution generated from the processing of two flight datasets

从图11中可以看出,两次飞行所获得的磁异常分布在变化趋势上高度一致,整体特征保持相似。图12为两次地磁异常图公共区域之间的差异,绝大多数重叠区域的磁异常差异在1.5 nT以内,表明测量数据具有较高的一致性。为进一步定量评估两次飞行所获取地磁异常图的相似度,采用式(9)相关系数和式(10)均方根误差作为评估指标,并针对两图的公共区域进行计算。结果表明,两次飞行生成的磁异常图的相关系数高达99.8%,均方根误差为1.149 nT,这表明在不同航次飞行条件下,CPT原子磁力仪能够稳定地探测地磁异常,具有较高的重复性。

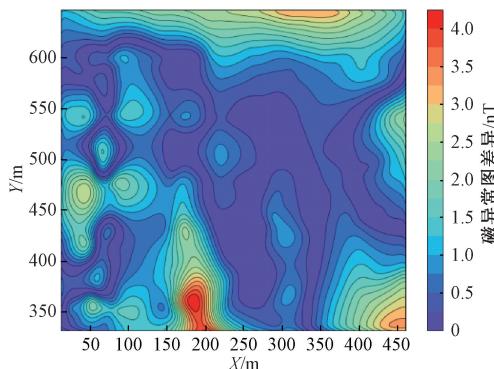


图12 两次生成的地磁异常图差异分布

Fig.12 Distribution of differences between the geomagnetic anomaly maps generated from two instances

综上所述,基于CPT原子磁力仪的拖曳式测绘系统在地磁异常图绘制任务中展现出卓越的稳定性。通过航向误差补偿、航磁补偿、地磁日变校正以及地磁参考处理,航磁测量的总精度得到显著提升。在两次覆盖相同区域的飞行测试中,获取的地磁数据表现出高度一致性,进一步验证了该系统优异的稳定性和高测量精度。

5 结 论

这项工作中,提出并实现了一种基于单探头CPT原子磁力仪的拖曳式地磁测绘系统方案和磁图绘制方法,并首次将其应用于高精度地磁异常图的测绘任务中。该系统充分利用了CPT原子磁力仪的高精度测量能力及其全向自主适应特性,同时通过拖曳式设计有效降低了平台自身磁源对测量结果的干扰。近海地区的实际飞行试验结果显示,航磁测量的总精度达到0.849 nT,验证了该系统在误差校正方面的有效性与精确性。进一步地,通过对比分析两次独立飞行生成的地磁异常图的重叠区域,相关系数高达99.8%,均方根误差为1.149 nT,充分证实了该系统在重复测量中的一致性。试验结果表明,基于CPT原子磁力仪的拖曳式地磁测绘系统不仅具备

高精度的磁场测量能力,还在实际试验中展现出优异的稳定性。

参考文献

- VILLARROEL N T, ROBLES P, JELDRES R I. Seabed mineral resources, an alternative for the future of renewable energy: A critical review [J]. *Ore Geology Reviews*, 2020, 126: 103699.
- KLYUEV M, SCHREIDER A, RAKITIN I. Technical means for underwater archaeology [J]. *Technical Means for Underwater Archaeology*, 2023.
- LIU Y F, ZHANG N, XU L, et al. A glimpse of research on underwater target intelligent detection technology [C]. *2022 IEEE International Conference on Electrical Engineering, Big Data and Algorithms*, 2022: 400-404.
- JANG J S. A review on the change in submarine roles in naval warfare: Based on warfare paradigm [J]. *Strategy* 21, 2020, 46: 89-122.
- 居海华,张乐,夏忠,等.基于铯光泵磁力仪的地震地磁矢量测量系统[J].*仪器仪表学报*,2023,44(9):111-120.
- JU H H, ZHANG L, XIA ZH, et al. A seismic geomagnetic vector measurement system based on cesium optically pumped magnetometer [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2023, 44(9):111-120.
- 张朝阳,刘济民,杨林.磁探潜关键技术现状及发展趋势[J].*科学技术与工程*,2022, 22(1): 18-27.
- ZHANG CH Y, LIU J M, YANG L. Current status and development trends of key technologies in magnetic submarine detection [J]. *Science Technology and Engineering*, 2022, 22(1): 18-27.
- LI M X. Exploration and application of marine magnetic field information based on ocean measurement technology [C]. *Artificial Intelligence, Medical Engineering and Education: Proceedings of the 7th International Conference*, 2024: 447-454.
- 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.
- LIU SH, HU X Y, GUO N, et al. A review of UAV-based aeromagnetic measurement techniques [J]. *Journal of Wuhan University (Information Science Edition)*, 2023, 48(6):823-840.
- ZHANG J L, XIANG X B, LI W J. Advances in marine

- intelligent electromagnetic detection system, technology, and applications: A review [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2021, 23(5): 4312-4326.
- [10] 彭翔, 郭弘. 光泵原子磁力仪技术 [J]. *导航与控制*, 2022, 21(5): 101-121, 198.
- PENG X, GUO H. Technology of optically pumped atomic magnetometers [J]. *Navigation and Control*, 2022, 21(5): 101-121, 198.
- [11] JAVAN F D, SAMADZADEGAN F, TOOSI A, et al. Unmanned aerial geophysical remote sensing: A Survey [J]. *Remote Sensors*, 2025, 17(1): 110.
- [12] 王学锋, 邓意成, 徐强锋, 等. 宇航用原子磁力仪研究与应用进展 [J]. *前瞻科技*, 2022, 1(1): 159-168.
- WANG X F, DENG Y CH, XU Q F, et al. Research and application progress of atomic magnetometers for aerospace [J]. *Science and Technology Foresight*, 2022, 1(1): 159-168.
- [13] JIN G X. Improving the sensitivity of a dark-resonance atomic magnetometer [J]. *Sensors*, 2025, 25(4): 1229.
- [14] 王学锋, 邓意成, 卢向东, 等. 四峰跟踪自主全向适应 CPT 原子磁力仪 [J]. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2024, 54(11): 38-47.
- WANG X F, DENG Y CH, LU X D, et al. Four-peak tracking autonomous omni-directional CPT atomic magnetometer [J]. *Scientia Sinica Physica, Mechanica & Astronomica*, 2024, 54(11): 38-47.
- [15] PATEL A K, DIVECHA J. Modified exponentially weighted moving average (EWMA) control chart for an analytical process data [J]. *Journal of Chemical Engineering and Materials Science*, 2011, 2(1): 12-20.
- [16] MERAYO J M G, BRAUER P, PRIMDAHL F, et al. Scalar calibration of vector magnetometers [J]. *Measurement Science And Technology*, 2000, 11(2): 120-132.
- [17] VASCONCELOS J F, ELKAIM G, SILVESTRE C, et al. Geometric approach to strapdown magnetometer calibration in sensor frame [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic systems*, 2011, 47(2): 1293-1306.
- [18] 龙礼, 黄家才. 基于递推最小二乘法的地磁测量误差校正方法 [J]. *仪器仪表学报*, 2017, 38(6): 1440-1446.
- LONG L, HUANG J C. A geomagnetic measurement error correction method based on recursive least squares [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2017, 38(6): 1440-1446.
- [19] 陈卓琳, 胡星星, 滕云田, 等. 大动态范围磁通门磁力仪及其在定向误差校正中的应用 [J]. *仪器仪表学报*, 2024, 45(1): 81-89.
- CHEN ZH L, HU X X, TENG Y T, et al. A large dynamic range fluxgate magnetometer and its application in orientation error correction [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2024, 45(1): 81-89.
- [20] 徐强锋, 王学锋, 邓意成, 等. CPT 原子磁力仪转向差及其标定补偿 [J]. *空间科学与试验学报*, 2024, 1(1): 95-101.
- XU Q F, WANG X F, DENG Y CH, et al. Heading error calibration and compensation of CPT atomic magnetometer [J]. *Journal of Space Science and Experiment*, 2024, 1(1): 95-101.
- [21] LI H, GE J, DONG H B, et al. Aeromagnetic compensation of rotor UAV based on least squares [C]. 2018 37th Chinese Control Conference, 2018: 10248-10253.
- [22] OLIVER M A, WEBSTER R. Kriging: A method of interpolation for geographical information systems [J]. *International Journal of Geographical Information System*, 1990, 4(3): 313-332.
- [23] SONG ZH ZH, LIU ZH, ZHANG H Y, et al. An improved sufficient dimension reduction-based Kriging modeling method for high-dimensional evaluation-expensive problems [J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2024, 418: 116544.
- [24] 张聪聪, 王新珩, 董育宁. 基于地磁场的室内定位和地图构建 [J]. *仪器仪表学报*, 2015, 36(1): 181-186.
- ZHANG C C, WANG X H, DONG Y N. Indoor positioning and map building based on geomagnetic field [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2015, 36(1): 181-186.
- [25] 中华人民共和国国土资源部, 航空磁测技术规范: DZ/T 0142—2010 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2010. Ministry of Land and Resources of the People's Republic of China. Technical Specifications for Aeromagnetic Surveys: DZ/T 0142—2010 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2010.
- [26] GOJKOVIC Z, RADOJICIS M, VULOVIC N. Application for coordinate transformation between Gaus-Kruger projection-Bessel ellipsoid and UTM projection-WGS84 ellipsoid [J]. *Podzemni Radovi*, 2017(30): 29-45.
- LONG L, HUANG J C. A geomagnetic measurement error correction method based on recursive least

作者简介



徐强锋,2017年于中国石油大学(华东)获得学士学位,2020年中国运载火箭技术研究院获得硕士学位,现为中国运载火箭技术研究院博士研究生,主要研究方向为基于CPT原子磁力仪地磁测绘系统的误差分析与数据处理。

E-mail:xqfcasc13@163.com

XU Qiangfeng received his B. Sc. degree from China University of Petroleum (East China) in 2017 and his M. Sc. degree from China Academy of Launch Vehicle Technology in 2020. He is currently a Ph. D. candidate at China Academy of Launch Vehicle Technology. His primary research is error analysis and data processing for geomagnetic mapping systems based on CPT atomic magnetometers.

邓意成,2013年毕业于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,现为北京航天控制仪器研究所研究员,主要研究方向为原子磁力仪和原子陀螺仪。

E-mail:kevin_dyc@163.com



Deng Yicheng received his Ph. D. degree from the Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences in 2013. Now he is a researcher at the Beijing Institute of Aerospace Control Devices. His main research interests include atomic magnetometers and atomic gyroscopes.



王学锋(通信作者),1997年于武汉测绘科技大学获得学士学位,2002年于中国科学院上海光学精密机械研究所获得博士学位。主要从事光学传感和量子精密测量技术研究。

E-mail:xuefeng_wang@sina.cn

Wang Xuefeng (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Wuhan Technical University of Surveying and Mapping in 1997 and his Ph. D. degree from Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Science in 2002. His primary research interests include optical sensing and quantum measurement.