

doi:10.19306/j.cnki.2095-8110.2025.02.001

海洋地磁导航关键技术及发展趋势

邢奥成^{1,2}, 李海兵^{1,2}, 阚宝玺¹, 闵跃军³

(1. 北京航天控制仪器研究所, 北京 100039;

2. 崂山国家实验室, 山东青岛 266237;

3. 中国航天电子技术研究院, 北京 100094)

摘要:海洋地磁导航是水下多源信息融合导航技术体系中的重要组成部分,具有自主性强、隐蔽性高、应用范围广、可全天候及全天候运行等特点。在海洋GNSS拒止的环境下,提供了一种无源自主的导航方式。在深入调研国内外研究现状的基础上,对海洋地磁导航的基本原理和误差进行了分析,并总结了误差补偿方法。对海洋地磁导航的关键技术进行了总结,分析了不同地磁基准图构建方法,并总结了适配性评价指标。通过对比国外地磁数据事后处理方法,阐述了实时测量系统的难点和必要性。对不同匹配导航算法进行了分类阐述,并对其特点及使用范围进行了对比,同时还分析了算法的可改进之处。最后,给出了海洋地磁导航的发展趋势。

关键词:地磁;匹配导航;地磁测量补偿;地磁图;实时测量系统

中图分类号:V19;P318

文献标志码:A

文章编号:2095-8110(2025)02-0001-14

Review of key technologies and development trends in marine geomagnetic navigation

XING Aocheng^{1,2}, LI Haibing^{1,2}, KAN Baoxi¹, MIN Yuejun³

(1. Beijing Institute of Aerospace Control Devices, Beijing 100039, China;

2. Laoshan National Laboratory, Qingdao, Shandong 266237, China;

3. China Academy of Aerospace Electronics Technology, Beijing 100094, China)

Abstract: Marine geomagnetic navigation is an important part of the multi-source information fusion navigation technology system for underwater environments, with the characteristics of strong autonomy, high concealment, wide application range, all-weather and all-day operation. It provides a passive and autonomous navigation method in the marine GNSS-denial environment. Based on an in-depth study of the current research status at home and abroad, the basic principles and errors of marine geomagnetic navigation are analyzed, and the error compensation methods are summarized. The key technologies of marine geomagnetic navigation are summarized, and the methods of constructing geomagnetic reference maps are analyzed, together with a summary of the indicators for assessing adaptability. The difficulties and necessity of real-time measurement systems are described in comparison with foreign geomagnetic data post-processing methods. Classification and description of different matching navigation algorithms are given, and their characteristics and scope of use are compared. In addition, aspects that can be improved in the algorithms are analyzed, and the development trend of marine geomagnetic navigation is presented.

收稿日期:2024-10-11;修订日期:2025-02-13

作者简介:邢奥成(2001—)男,硕士研究生,主要从事水下导航算法方面的研究。

通信作者:李海兵(1979—)男,研究员,主要从事重磁测量及水下导航技术方面的研究。

Key words: Geomagnetic; Matching navigation; Geomagnetic measurement compensation; Geomagnetic map; Real-time measurement system

0 引言

海洋占地球表面积约 71%，蕴含着丰富的石油、天然气及矿产等资源。中国作为海洋大国，大陆海岸线长度约为 18 000 km。随着海洋勘探、工程开发和科学研究的日益频繁以及海洋国防需求的增长，人类对海洋观测与探测技术的研究也不断深化。自主水下航行器 (autonomous underwater vehicle, AUV)、无人水下潜航器 (unmanned underwater vehicle, UUV) 等海洋移动平台的研究也得到快速发展^[1]。海洋移动平台在军事和经济发展中的作用日益突出，大力发展水下潜航器是建设海洋强国的必经之路^[2]。当前，高精度、长航时、自主性强、实时性好且隐蔽性优异的水下自主导航技术是海洋移动平台面临的主要挑战，并代表着未来发展趋势。惯性导航系统 (inertial navigation system, INS) 以其自主性强、隐蔽性好、短期精度高及可提供全天候连续实时导航信息等优点，成为海洋移动平台的主要导航方式。然而，INS 的导航原理是通过测量加速度并进行积分以获取速度和位置信息，这一固有特性决定了其定位误差会随时间累积。因此，INS 仅能在有限的时间内维持较高的定位精度，并不适用于长时间和远距离的水下导航任务。为应对这一挑战，学术界和工业界主要探索了两种改进策略。第一种方法是通过开发具有更高精度的陀螺仪和加速度计等惯性测量单元 (inertial measurement unit, IMU) 组件，以期提升 INS 在长时间运行下的精度。目前，由国防科技大学魏国^[3]研究的双轴旋转激光惯导系统，其 14 天导航最大定位误差优于 0.6 n mile。但这只能保证在有限时间范围内的精度，在海洋移动平台长航时、远距离的航行条件下，INS 的定位误差仍会不断发散。如此高精度的 IMU 大大增加了水下导航的成本，若想继续提升精度则需要付出更大的代价，并不适用于民用 AUV 等低成本水下潜航器^[4]。第二种方法是融合多源信息进行组合导航，对 INS 辅以其他导航手段，利用卡尔曼滤波等算法进行数据融合。借助其他导航手段误差不随时间积累的特性，以校正惯性导航的系统误差，从而提升海洋移动平台的导航定位精度。随着水下自主导航技术的快速发展，目前较为成熟的辅助导

航技术有：全球卫星导航系统 (global navigation satellite system, GNSS) (如中国的北斗三号)、视觉导航、天文导航、多普勒计程仪 (Doppler velocity log, DVL)、水下地形匹配导航及重力匹配导航等。

海水是天然的低通滤波器，卫星的电磁波信号经过海气界面后会迅速衰减，达到 GNSS 拒止的效果，导致海洋移动平台为了接收信号而不得不上升到接近海面的位置，这意味着每接收一次信号就会多一次暴露的风险。对海水有最大透射率的光为蓝绿光，但受水中浮游物等因素的影响，水下能见度极低，因此，视觉导航和天文导航在水下作用很小^[5]。在水下环境中，DVL 和地形匹配导航都依赖声呐系统获取地形信息，但主动声呐发出的声波同样增加了被发现的可能性。DVL 利用多普勒效应可以获得较高精度的载体速度信息，但受海底复杂地形和多路径效应影响，其精度会有所下降^[6]。此外，在地形平坦、特征不明显的水下区域，地形匹配导航的效果并不理想。作为一种被动自主式导航方法，水下重力匹配导航可以满足潜航器所需的隐蔽性。然而，水下重力场特征变化梯度较小，为达到一定的匹配效果，则需要较长的航行轨迹，这无法满足水下潜航器对于高实时响应的需求。为此，开发一种无源、隐蔽性强且精度高的水下惯性辅助导航系统至关重要。

地磁场是地球的固有物理场，蕴含丰富的地磁信息。地球表面的地理坐标与地磁场特征之间存在固定映射关系，地磁场遍布全球且梯度值较大，能够满足海洋移动平台导航所需的基本条件。地磁场包含北向分量、东向分量、垂直分量、水平强度、磁偏角、磁倾角和总强度 7 个要素，根据不同使用环境选取这些特征量并进行有机融合，可以得到高稳定性和实时性的多样地磁导航系统方案。此外，海洋地磁导航技术的优势在于其无源性，无需向外辐射信号，因而具有较高的隐蔽性，不易受到外界干扰，且误差不会随时间累积。同时，随着电子工艺技术的日趋成熟，磁传感器不断向小型化、低功耗方向发展。目前，主流磁力仪传感器有磁通门磁力仪、光泵磁力仪、质子旋进磁力仪及磁阻传感器等。这些特性使得地磁匹配导航成为水下导航系统的重要组成部分，并且可用于辅助 INS，达到校正误差、提升导航精度的效果。随着海洋经济的

快速发展,长航时、高精度的水下潜航器的发展前景也越来越广阔,海洋地磁导航技术的迅猛发展也受到了国内外学者的广泛关注。

国内磁力仪的分辨率等参数已接近或达到国际水平,高测量精度的磁力仪为构建高精度地磁图和实现地磁导航提供了基础。

1 国内外技术现状

1.2 国外地磁导航系统研究现状

1.1 国内外磁力仪发展现状

21 世纪以来,地磁导航技术得到了深入研究并应用于多个领域。2004 年,俄罗斯在“安全-2004”军事演习中采用地磁等值线匹配制导技术,其发射的 SS-19 导弹能够以近水平的角度沿大气边缘飞行,使敌方防御系统难以预测其轨迹^[7-9]。2010 年,Armstrong 等^[10]开发了一种适用于 AUV 的地磁

任何一个学科的发展,首先是观测工具的发展,其次才是观测方法和理论研究的发展。目前常用的磁力仪主要包括光泵磁力仪、质子磁力仪及 Overhauser 式磁力仪。通过表 1 的对比可以发现:

表 1 国内外磁力仪发展状况

Tab. 1 Development of magnetometers at home and abroad

仪器型号	生产公司	性能参数	仪器图片
GSM-19 Overhauser 式磁力仪	加拿大 GEM	分辨率:0.01 nT 测量精度:±0.2 nT 动态范围:20 000~120 000 nT	
PMG-2 质子磁力仪	捷克 SatisGeo	分辨率:0.1 nT 测量精度:±1 nT 动态范围:20 000~100 000 nT	
G-800 光泵磁力仪	美国 Geometrics	分辨率:<0.004 nT 测量精度:<3 nT 动态范围:20 000~100 000 nT	
CS-3 海洋铯光泵磁力仪	加拿大 Scintrex	分辨率:<0.000 6 nT 测量精度:<2.5 nT 动态范围:15 000~105 000 nT	
MG-02 海洋铯光泵磁力仪	中国南京方之奥	分辨率:0.000 6 nT 测量精度:<0.5 nT 动态范围:10 000~105 000 nT	
RS-YGB6A 氦光泵磁力仪	中国杭州瑞声	分辨率:0.005 nT 测量精度:0.01 nT 动态范围:35 000~70 000 nT	

导航技术,通过应用扩展卡尔曼滤波器整合了飞行器上各种传感器的数据,以获得更精确的航向估计,并能够实时地对航向偏差进行学习和调整。2020年,Wardinski等^[11]对地球表面测量和卫星探测的地磁场数据进行结合,构建了1957—2020年地磁场变化连续模型,并在该模型的基础上,利用多元奇异谱分析预测出2020—2025年的地磁参考场。2021年,美国的F-16战斗机搭载了当时最先进的地磁探测传感器进行地磁导航技术验证,采用批量和在线校准相结合的方法,在磁干扰大于地勘飞机2~3个数量级的情况下,实现了在300 m高度下定位精度达到约60 m^[12]。2022年,意大利国家地球物理学及火山学研究所(national institute of geophysics and volcanology, INGV)的Cianchini等^[13]通过观测近4年的Swarm卫星磁信号,预测了扰动风暴时间,并利用神经网络训练出地磁扰动指数预测算法,为后续实验中地磁信号干扰补偿提供了新的途径。2023年,Gill等^[14]通过分析动物的磁感应导航机制进行仿生地磁导航建模,通过调整导航算法参数可以在不同区域实现较好的导航效果,为地磁导航技术开辟了新的思路。2024年,Gidugu等^[15]将人工智能算法应用于AUV导航,对于装配0.1 nT灵敏度磁力仪的AUV,如图1所示,使用先验地磁场数据训练的监督随机回归森林和决策树算法,导航精度可达50 m。



图1 AUV搭载磁力仪

Fig. 1 The AUV equipped with a magnetometer

1.3 国内地磁导航系统研究现状

国内对于地磁导航研究的起步较晚,且初始时仅对地磁导航算法和仿真进行了研究。2004年,李素敏等^[16]通过地磁匹配定位的静态测试,证实了地磁匹配方法应用于导航的可行性。2007年,晏登洋等^[17]对地磁惯性组合导航系统进行了水下测试,结果显示,该导航系统能够显著地校正惯导误差,并使

其达到精度要求。2008年,赵建虎等^[18]在渤海湾30 km×20 km的测区开展了水下地磁测量实验,测量比例尺为1:5 000,采用50 m×50 m的格网化背景场;设定初始INS角度累计偏差为3°,x和y方向位置偏差为2 000 m,通过改进TERCOM算法实现了平面位置精度在100 m以内,角度误差也缩小至0.39°。2010年,北京大学的Lin^[19]建立了地磁基准图,并开展了水下导航实验,实验结果显示定位精度约为400 m。在2007—2014年期间,国防科技大学的穆华等^[20]和吴志添等^[21]研制了地磁辅助INS原型,并进行了海陆空全方位实验。为应对地磁图特征信息的复杂性和选择性问题,国防科技大学的王鹏^[22]采用支持向量机作为分类器,并对输入数据进行了优化处理。通过遗传算法筛选最优样本子集以提高分类性能,将待匹配区域的划分问题视为模式识别问题,并通过仿真实验验证了模糊C均值聚类算法在自适应神经模糊推理系统建模中的有效性。实验结果表明,该方法能够实现较高的建模精度。

2015年,东南大学的朱占龙等^[23]提出了一种基于新息正交性自适应滤波的惯性/地磁组合导航方法用于误差补偿,在量测值存在野值及噪声统计特性发生变化时,该方法能够抑制惯导系统的累积误差,并且得到的标准差指标与标准卡尔曼滤波相比缩减了约3/4,从而提高了组合导航系统的稳定性和适应性。2018年,哈尔滨工程大学的解伟男等^[24]利用仿射参数估计以平衡地磁导航算法的匹配精度和实时性。将地磁匹配问题转化为参数估计问题,并采用Broyden迭代法进行求解,最终实验在耗时20.7 ms下实现匹配精度37.97 m。2019年,武汉大学的杨乐等^[1]在渤海湾某海域进行了地磁辅助INS的综合仿真实验,图2所示为实验磁力仪组装及拖曳式测量现场。实验取得了预期效果,验证了通过匹配区域适配性分析能够有效改善算法的匹配效果,减少误匹配的发生;迭代最近等值线(iterative closest contour point, ICCP)改进算法能有效提高匹配的可靠性及精度,从而进一步提高了整个导航系统的稳健性。

2021年,中北大学的马伟等^[25]研究了偏振光/捷联惯导/北斗卫星/地磁组合导航,采用联邦卡尔曼滤波两层结构的数据融合以提升导航精度。在2.3 km的往返运动实验中,实现了东向误差3.230 5 m,北向误差3.741 9 m的高精度定位。2022年,中国科学院国家空间科学中心的高东等^[26]融合了地磁导航在



图 2 磁力仪安装及拖曳测量

Fig. 2 Magnetometer installation and towed measurement

高度和纬度确定方面的优势与惯导在精度和纬度保持方面的优点,使导航精度在同等条件下提升了 45.6%。2023 年,崂山国家实验室的付碧波等^[27]在青岛开展了海试,设计了拖曳式海洋地磁三分测量系统,以提高海洋体力测量的稳定性和精度。同时,罗建刚等^[28]在威海开展了海试,通过小型无人艇进行重复测线和交叉测线的实验,结果均达到了标准精度,为后续开展海试积累了宝贵经验。此外,罗建刚等^[29]还提出了一种地磁矢量测量多源误差综合校正方法,使误差改善率较传统方法有了大幅提升。2024 年,张涛等^[30]提出了一种基于神经网络预测模型误差的地磁导航方法,以解决地磁场模型更新慢和误差大引起的精度低问题。利用卫星数据进行仿真实验,最终分别将位置与速度精度由 4.15 km 和 4.38 m/s 提升至 1.34 km 和 1.47 m/s。综上,国内外公开报道的典型地磁导航系统的技术性能如表 2 所示。

表 2 国内外典型地磁导航系统技术性能

Tab. 2 Technical performance of typical geomagnetic navigation systems at home and abroad

	机构	年份	平台类型	定位精度/m
国外	美国空军技术学院	2017	直升机	13
	美国空军	2021	F-16 飞机	60
	印度国家海洋技术研究所	2024	AUV	50
国内	武汉大学	2008	船舶	100
	北京大学	2010	船舶	393.63
	哈尔滨工程大学	2015	船舶	200~500
	中北大学	2021	车辆	3.741 9

2 海洋地磁导航技术基本原理及误差分析

2.1 地磁场基本特征

地磁场是由地球内部的磁性岩石和电流以及地球内外的各种磁场如日变活动等共同作用形成

的。表 3 所示为地磁场的主要组成和基本特征。地磁场可以分为内源场和外源场。内源场包括地核磁场、地壳磁场和感应磁场。其中:地核磁场是主磁场,通常由地核内部流体运动产生;地壳磁场由地壳和上地幔中的磁性岩石产生;而感应磁场是由地球内部对外部变化磁场引起的感应电流产生。外源场主要来自地表以上的空间电流体系,分布在电离层和磁层,具有快速的时间变化特征,包括平静变化磁场和扰动场。综上所述,地磁场主要由地核主磁场、地磁异常场和扰动磁场组成。其中,总磁场和磁异常场用于地磁导航最多,而外源场因其占比极少且变化剧烈,无法满足导航系统对稳定性和精度的要求,因此不适用于地磁导航^[31]。

地磁场任意点的总场强矢量均可用地磁 7 要素 (F, H, X, Y, Z, D, I) 在地理坐标系中表示。图 3 所示为北-东-地坐标系下的地磁要素表示图,其中观测点为坐标原点 O ,取地理北向为 x 轴,记作 X ;东向为 y 轴,记作 Y ;垂直地面向下为 z 轴,记作 Z 。 XOY 面为水平面, HOZ 面为地磁子午面, XOZ 面为地理子午面。 F 为地磁场总强度,其水平分量 H 即地磁场水平强度, X, Y, Z 分别为 F 在北向、东向及垂向的分量;磁偏角 D 是水平分量 H 与地理北向 X 之间的夹角,规定地磁场偏东时 D 为正; I 为磁倾角,是 F 与 XOY 面的夹角,规定地磁场向下为正^[32]。

将地磁要素中 3 个彼此独立的要素称为地磁 3 要素,如 $(F, D, I), (H, D, Z), (F, H, D)$ 。各要素数值间的相互关系为

$$X = F \cos I \cos D \quad (1)$$

$$Y = F \cos I \sin D \quad (2)$$

$$F = \sqrt{H^2 + Z^2} = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2} \quad (3)$$

$$Z = F \sin I = H \tan I = \sqrt{F^2 - H^2} \quad (4)$$

$$H = F \cos I \quad (5)$$

$$I = \arctan(Z/H) = \arccos(H/F) \quad (6)$$

表3 地磁场组成及基本特征

Tab. 3 Composition and basic characteristics of the geomagnetic field

	磁场组分	场源位置	磁场强度/nT	形态特征	时变特征
内源场	1 地核磁场	地球液态外核	50 000~60 000	偶极子场	长期变化千年、磁倒转百万年
	2 地壳磁场	固体外壳中磁性矿物	仅占地球磁场百分之几	表现为地球磁场局部异常	与地壳活动有关,基本稳定不变
	3 感应磁场	地壳、上地幔和海洋	远小于地核磁场和地壳磁场	一般为全球场,不规则	同外源场
外源场	4 平静变换 (Sq,L)	磁层、电离层	Sq:30~200 L:1~10	全球场,白天显著	Sq周期 24 h L周期 24 h 50 m
	5 磁暴	磁层	50~1 000	全球剧烈扰动,磁场 方向变化	几小时到几天,与太阳风 带电粒子有关
	6 亚暴	磁层尾部	100~2 000	高纬度磁场短暂最强	快速增强随后缓慢恢复, 持续几分钟到几小时
	7 脉动	磁层	1~100	地磁场快速振荡,有特定 频率和波形	几秒到几分钟

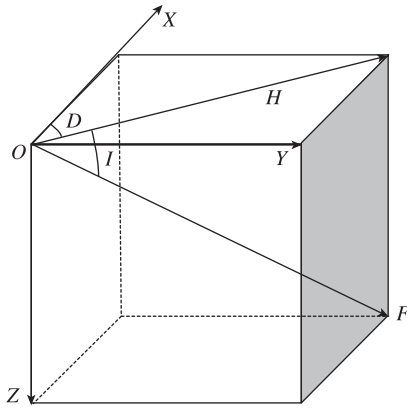


图3 地理坐标系中地磁场要素图

Fig. 3 Map of geomagnetic features in a geographic coordinate system

$$D = \arctan(Y/X) = \arccos(X/H) = \arcsin(Y/H) \quad (7)$$

此外,在地磁测量过程中,采用磁梯度描述磁场的空间分布特征及磁场变化率。在磁场强度为 $\mathbf{B}(x, y, z)$ 的磁场中,可将磁梯度通过矢量微分公式(8)得出

$$\nabla \mathbf{B} = \left(\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial x}, \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial y}, \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial z} \right) \quad (8)$$

其中: ∇ 为梯度算子; $\frac{\partial}{\partial}$ 为偏微分算子。

2.2 海洋地磁导航基本原理

如图4所示,海洋地磁导航技术是一种基于地球磁场特征匹配的导航方法,其基本原理是利用地球磁场的空间分布特征以确定载体的位置。该方法通常与INS相结合,以提高水下导航的精度和可靠性。以

下是海洋地磁导航技术的基本原理和步骤。

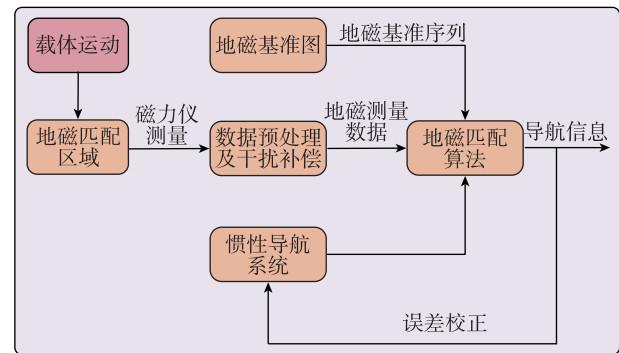


图4 地磁匹配导航的基本原理

Fig. 4 Basic principle of geomagnetically matched navigation

首先,在导航前预先建立载体航行区域的地磁图。当载体进入航行区域时,使用磁力仪实时测量地磁场的特征。接着,对磁力仪测量的数据进行预处理,包括滤波、磁偏角和磁倾角的计算等,以消除噪声和环境干扰,获取准确的地磁特征序列。然后,将实测的地磁特征序列与预先建立的地磁图中的序列进行匹配,具体算法将在后文进行详细介绍。通过匹配算法找到实测地磁序列与地磁图中最相似的区域,从而确定载体的精确位置。再将地磁匹配导航系统得到的定位信息与INS的信息进行融合,通常使用卡尔曼滤波等方法,以削弱INS误差随时间积累的影响。随着载体的持续运动,重复上述步骤,最终实现长时间的连续导航定位。

海洋地磁匹配导航的优势在于其无源且隐蔽性强,能够在GNSS拒止环境中提供有效的导航支持。此外,地磁场的稳定性使得地磁匹配导航具有

较好的可靠性和重复性。

2.3 海洋地磁匹配导航系统误差分析

2.3.1 地磁矢量测量系统误差

地磁矢量测量系统误差可分为两种,一是直接误差,由磁力仪误差、测量噪声和载体磁干扰误差组成;二是间接误差,包含直接误差校准的剩余误差和非对准误差。

仅考虑直接误差时,可如式(9)建立误差模型

$$\mathbf{B}_m = \mathbf{K}(\mathbf{B}_e + \mathbf{M}\mathbf{B}_e + \mathbf{B}_h) + \mathbf{b}_0 + \boldsymbol{\omega}_0 \quad (9)$$

其中: $\mathbf{B}_m = [\mathbf{B}_{mx}, \mathbf{B}_{my}, \mathbf{B}_{mz}]^T$ 为磁力仪的三分量输出值; $\mathbf{K} = \text{diag}(K_x, K_y, K_z)$ 为三轴标度系数对角

矩阵; $\mathbf{C} = \begin{bmatrix} \cos\alpha \cos\beta & \sin\alpha \cos\beta & \sin\beta \\ 0 & \cos\gamma & \sin\gamma \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ 为磁力仪三

轴非正交误差矩阵, α, β, γ 为磁力仪所在坐标系与正交坐标系间的角度差; $\mathbf{B}_e = [\mathbf{B}_{ex}, \mathbf{B}_{ey}, \mathbf{B}_{ez}]^T$, $\mathbf{B}_h = [\mathbf{B}_{hx}, \mathbf{B}_{hy}, \mathbf{B}_{hz}]^T$ 分别为在正交坐标系下的地磁场

投影值和硬磁干扰; $\mathbf{M} = \begin{bmatrix} M_{xx} & M_{yx} & M_{zx} \\ M_{xy} & M_{yy} & M_{zy} \\ M_{xz} & M_{yz} & M_{zz} \end{bmatrix}$ 为软

磁系数矩阵在正交系下的投影; $\mathbf{b}_0 = [\mathbf{b}_x, \mathbf{b}_y, \mathbf{b}_z]^T$ 为零偏误差矢量; $\boldsymbol{\omega}_0$ 是磁力仪测量噪声。随着磁力仪精度的提高,测量噪声相对于真实数据为极小量。当忽略磁力仪测量噪声时,模型可简化为

$$\mathbf{B}_m = \mathbf{H}\mathbf{B}_e + \mathbf{B}_0 \quad (10)$$

其中: $\mathbf{H} = \mathbf{K}\mathbf{C}(1 + \mathbf{M})$; $\mathbf{B}_0 = \mathbf{K}\mathbf{C}\mathbf{B}_h + \mathbf{b}_0$ 。由此可得出直接测量误差的校正模型如下

$$\mathbf{B}_e = \mathbf{G}(\mathbf{B}_m - \mathbf{B}_0) \quad (11)$$

其中, $\mathbf{G} = \mathbf{H}^{-1}$ 。根据简化模型便可得到正交坐标系下的地磁三分量 \mathbf{B}_e 。

经过直接测量误差校正后,地磁三分量坐标可以任意变换为地理坐标系下的分量。然而在实际情况下,磁力仪坐标系与姿态仪的坐标系无法完全重合,存在非对准误差。因此,需对磁力仪坐标系进行三轴旋转,使其与姿态仪重合。若能求得精确的三轴转动角,则可得到校正间接误差后的地磁矢量。

对于直接和间接误差的校正方法,目前有基于椭球约束的直接测量误差校正,即令地球矢量测量系统在空间转动,并根据空间点到待求椭球面欧式距离最小的理论,求取磁场测量点所在椭球面的最佳拟合;以及基于遗传算法的间接误差校正,这是一种模拟生物进化过程的启发式搜索算法,通过模

拟自然遗传机制(如选择、交叉及变异等),对上述三轴转动角的潜在解进行进化,以期找到或逼近最优解。罗建刚等^[29]对上述方法进行了实验验证,总磁场误差改善率达到 98.4%,3 个方向磁场分量误差改善率超过 91%,效果明显优于传统校正方法。

2.3.2 海洋地磁匹配导航误差分析

海洋地磁匹配导航一般与惯性导航组合,以提升水下导航精度,其组合导航误差特性分析如下。初始阶段海洋移动平台为纯惯性导航模式,将其速度误差表示如下

$$\delta \dot{\mathbf{v}} = [\mathbf{f}^n \times] \boldsymbol{\psi} + \mathbf{C}_0^b \delta \mathbf{f}^b \quad (12)$$

式(12)是在忽略了重力矢量误差以及 Coriolis error 的情况下进行计算^[33]。其中: \mathbf{f}^n 为比力; $\boldsymbol{\psi}$ 为姿态误差; \mathbf{C}_0^b 为载体坐标系到导航坐标系的状态转移矩阵; $\delta \mathbf{f}^b$ 为比力测量误差。

当海洋移动平台进入地磁匹配区域时,磁力仪开始收集地磁匹配数据,此时纯惯导系统的位置、速度及姿态信息均产生偏差。在短时间内,姿态误差积累较少,且海洋地磁匹配导航的主要目的是确定载体位置。因此,忽略姿态对定位的影响,将匹配过程简化为等速误差过程。以进入匹配区为 0 时刻,采样间隔为 Δt ,对惯导位置更新方程进行离散化,最终可得到

$$\hat{\mathbf{p}}_{k+1} = \mathbf{p}_{k+1} + \Delta \mathbf{p}_0 + \Delta \mathbf{v} \cdot (k+1) \cdot \Delta t \quad (13)$$

其中: \mathbf{p}_{k+1} 是下一时刻载体的真实位置;匹配前的系统定位误差 $\Delta \mathbf{p}_0$ 和由速度误差造成的速度增量误差 $\Delta \mathbf{v}$ 构成了最终定位误差。将其与几何变换进行映射可得

$$\mathbf{H} = \mathbf{s} \cdot \mathbf{r} \cdot \mathbf{L} + \Delta \mathbf{p}_0 \quad (14)$$

其中: \mathbf{H} 为 INS 运动轨迹; \mathbf{s} 和 \mathbf{r} 分别为缩放和旋转因子,对应曲线变换中的旋转和缩放; \mathbf{L} 为海洋移动平台的真实运动轨迹; $\Delta \mathbf{p}_0$ 则为匹配前纯惯导系统的定位误差,对应平移变换。因此,对于该误差的校正算法需能满足平移、旋转和缩放变换,而不仅仅是刚性变换。

3 海洋地磁匹配导航关键技术

3.1 地磁基准图的构建

地磁基准图的构建是海洋地磁导航的前提,实现完整的导航算法需要以地磁基准图作为参考进行匹配。地磁基准图为实测数据,高精度和高分辨率的地磁基准图制作是实现精确和稳定导航定位的核心。地磁基准图的精度与其比例尺直接相关,

比例尺越小往往精度越高。目前,用于海洋地磁匹配导航的高精度地磁基准图精度在4~6 nT左右。地磁基准图是通过在地图上用等值线将地磁值相等的点连接,等值线越密集反映了该地区的地磁特征信息越丰富。

目前,海洋地磁测量方法主要有卫星测磁、航空测磁、无人潜航器测磁和船载测磁等。卫星测磁是通过卫星搭载磁力仪在地球轨道上进行测量,可以覆盖全球,获取地球磁场的大尺度特征。但这也导致空间分辨率相对较低,难以捕捉到局部小尺度的磁场异常,且卫星信号在海水介质中衰减很快,因此不适用于海上地磁测量。航空测磁是利用飞机携带磁力仪进行测量,可以在较短的时间内覆盖较大的区域。但其成本相对较高,对飞行条件有较高要求,且可能受到飞行器磁场干扰的影响,需要进行复杂的数据补偿处理。目前,常用的海洋地磁数据采集方式包括无人机、水下潜航器及无人船等。张绍华等^[34]利用大疆六旋翼无人机搭载三轴磁通门传感器及相应的数据采集子系统进行了飞行实验,可有效完成低空磁场探测和磁矩计算,但受无人机飞行时长影响限制,利用无人机进行地磁数据采集仅适用于小范围区域。常用水下航行器如AUV等,可搭载重磁传感器、声学传感器及惯导系统等载荷,实现海洋地球物理场抵近探测和自主高分辨率海图构建^[35]。但受海水阻隔,水下航行器长航时定位精度无法保证,从而影响海洋地磁数据探测的准确性和时间一致性。因此,需要通过多源信息融合并提升算法性能,以提高点位匹配精度。小型无人船携带磁力仪常采用拖曳式测量,这种方法易受海流和风浪的影响,数据质量可能受到拖曳系统动力学特性的影响。因此,拖体尾翼常采用比例-积分-微分(proportion integration differentiation, PID)控制舵机,以保持拖体稳定。

以小型无人艇对目标海域进行地磁数据采集为例,如图5所示,通过一根长1.5 m的无磁支撑杆将质子磁力仪固定于无人艇前端。一方面可以减少无人艇内部电子设备产生的干扰磁场,同时支撑杆不宜过长,否则随着无人艇在海面行驶,磁力仪会产生大幅度晃动,从而对磁力仪信号质量的稳定性产生影响^[36]。补偿系统通过惯导等系统测量无人艇的姿态信息和载体坐标系下的磁场信息,将这些信息用于补偿地磁总磁场信息中的载体磁干扰分量。GNSS天线用于定位和授时,将地磁信息

与时间位置等信息传输至数据终端进行匹配处理。最终,通过上位机对采集数据进行实时显示和储存,并控制整个系统。

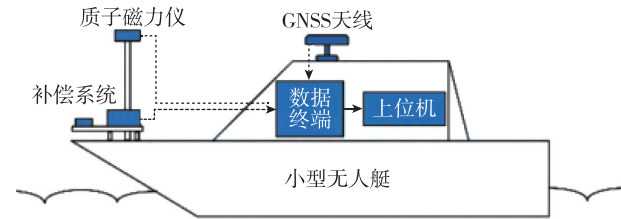


图5 地磁采集设备安装示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the installation of geomagnetic acquisition equipment

当无人艇在海上进行数据采集时,为扩大数据覆盖范围且便于数据的处理和分析,往往选择与地磁梯度变化近似的长方形或正方形测量网,并采用纵横相交的测线。如图6所示,以东西和南北走向测线为例,在某海域设置南北向5条主测线和东西向4条检查测线,且主测线和检查线各包含一条重复测线,形成了30个测试交叉点。这样可有效检验测量结果,并降低误差影响。

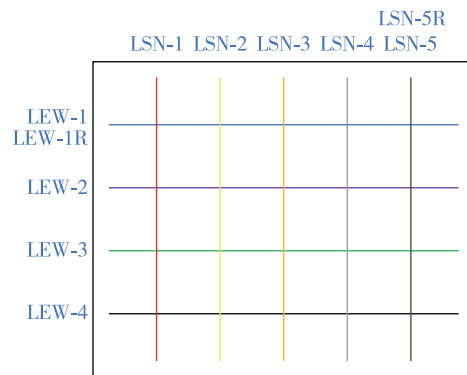


图6 测线分布图

Fig. 6 Distribution map of survey lines

接着,对数据进行预处理,构图时的处理方法与进行实时匹配导航时的数据预处理方法一致。随后,对预处理后的数据进行建模或插值,生成该区域的地磁基准图。常见的地磁场模型包括世界地磁模型(world geomagnetic model, WGM)和国际地磁参考模型(international geomagnetic reference field, IGRF)^[37],适用范围较广,适合于大范围的地磁基准图制作,但其无法满足高精度导航定位的需求,因其反映了地磁场中的主磁场部分,而未能充分体现地磁异常场中的细节。因此,在地磁导航海试之前

需要预先进行实地测量,以完成地磁基准图。

因此,将实测数据经过预处理并通过一系列建模或插值方法,可以制作出高精度和高分辨率的地磁基准图。将这些基准图以网格形式预先存储在实时测量系统中,可供后续匹配导航使用。地磁基准图常用的构建方法如图 7 所示。

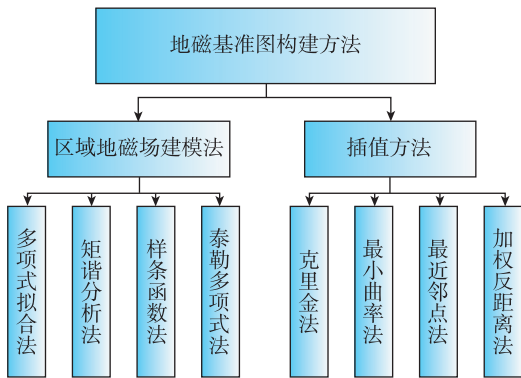


图 7 地磁基准图的构建方法

Fig. 7 Construction methods of the geomagnetic reference field

现今应用最广泛的是克里金插值法。克里金插值法是一种基于统计学的空间插值方法,该方法以变异函数理论和结构分析为基础,对区域化变量进行无偏最优估计。其过程包括数据收集、变异函数分析、模型拟合、权重计算、插值预测和结果验证。克里金插值法的优点包括高精度度、考虑空间自相关性及高灵活性,并且能提供误差估计,尤其是在数据稀疏或分布不均的情况下更具优势。它通过考虑空间自相关性和数据点的权重,能够生成更为准确的空间预测模型。此外,该方法还能够提供估计值的误差,有助于评估插值结果的可靠性。

在构建地磁基准图的同时,构建磁梯度图用于分析探测区域的磁场空间变化率。目前常用的方法包括磁梯度张量解析信号分析法、均衡边界识别法和深度成像技术等。其优缺点对比如表 4 所示。

3.2 地磁基准图适配性分析

地磁基准图适配性分析是建图完成后必不可少的检验环节,它直接关系到地磁匹配导航的有效性。地磁特征明显的区域为地磁基准图适配区。为了提高地磁基准图的适配性,研究者提出了多种分析方法。

其中一种方法是利用模糊决策理论进行地磁图适配性分析。这种方法通过采用地磁标准差、粗

表 4 磁梯度图构建方法对比

Tab. 4 Comparison of magnetic gradient map construction methods

方法	优点	缺点
磁梯度张量解析信号分析法	提供更高分辨率异常信息,准确反映地质体边界位置,并减少噪声干扰	需归一化处理,计算较为复杂
均衡边界识别法	可以均衡不同深度地质体的响应,提高对较深地质体的分辨率	对倾斜磁化的干扰较为敏感
深度成像技术	根据相关系数给定地质体深度联合反演多参数数据,提高反演结果的准确性	需要较大的数据量进行联合反演

糙度、相关系数、坡度标准差及地磁信息熵等 5 个主要特征参数作为模糊指标进行加权分析,得到综合评价值以评定候选区的适配性。

另外,基于稀疏表示和字典学习的地磁基准图构建方法也是一个研究热点。该方法首先通过矩谱分析进行稀疏字典的初始化,然后使用 K 奇异值分解(K-singular value decomposition, K-SVD)算法对稀疏字典进行训练。最终,利用低分辨率和高分辨率基准图具有相同稀疏系数的特点,重建高分辨率地磁基准图。实验结果表明,该方法在峰值信噪比、结构相似度和均方根误差等评价指标上优于传统的克里金插值法。

此外,深度学习技术也被应用于地磁导航方向适配性分析中。例如,采用一种基于深度卷积神经网络的方法,首先利用滤波器建立适配特征图;然后,设计卷积神经网络提取深层次的方向适配特征,并通过混合粒子群算法优化训练参数。这种方法能够有效避免人工特征提取的盲目性,实现地磁导航方向适配性分析的自动化,其准确率高于传统的反向传播(back propagation, BP)网络和支持向量机。

图 8 所示为一种常用的地磁基准图适配性分析流程。

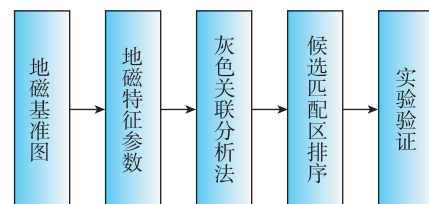


图 8 地磁适配性分析流程

Fig. 8 Flow of geomagnetic adaptability analysis

3.3 实时测量系统

相较于重力匹配、地形匹配等导航技术,海洋地磁导航技术的缺点主要在于实时地磁测量信号极易受干扰。在海洋地磁导航实时测量周围磁场的过程中,尽管采用建立误差补偿模型等方法对地磁测量误差进行补偿,仍无法完全消除干扰磁场,地磁测量仍存在较大噪声。此外,通过上文对地球磁场的分析可知,外源场也会给地磁测量结果带来较大的误差。由于日变、磁暴、亚暴及脉动等现象的发生具有随机性,其产生的磁场亦叠加在地磁测量信号中,使地磁信号的成分更加复杂,导致实时处理信号的难度更大。因此,磁测量补偿成为实时测量系统的重要组成部分。国外的公司,如荷兰的Fugro、加拿大的Marine Magnetics等,通常在数据收集后进行数据处理,包括去除日变影响、航向偏差校正及滞后校正等,以提高数据的准确性和可靠性。但海洋地磁匹配导航对于系统的实时性要求较高,因此,要在海洋移动平台上实时处理测量数据并进行匹配导航。3.4节将对常用算法的实时性等特点进行分析。

3.4 海洋地磁导航算法

地磁导航算法是一种利用地磁测量数据确定航行器位置的方法,是地磁导航系统的核心。高效的地磁匹配导航算法可以有效提升海洋地磁导航系统的实时性和定位精度。地磁匹配导航算法受启发于地形匹配,但二者在应用时有明显区别。地磁数据通常以一维形式逐点获取,与地形的二维数据采集方式不同,因此,地磁定位往往依赖于序列化的点对点匹配。地磁定位可分为两大类:一是地磁滤波,常用于地磁惯性导航组合系统中,即通过卡尔曼滤波等方式建立磁场测量位置与INS间的数学模型,以及时校正惯性导航误差,防止系统发散;二是地磁匹配,即通过实测数据与地磁基准图进行对比,获取位置误差并进行修正。综上,基本操作流程是在航行器行进过程中,周期性采集地磁数据点,结合不同手段和信息与地磁基准图进行对比,并借助INS为这些数据提供大致的路径估计。在地磁数据和INS提供的位置信息的共同作用下,定位算法将搜索一个最优化的匹配路径,作为最终的定位结果。目前,主流的地磁定位技术特点及对比如表5所示。

表5 3种匹配算法的对比

算法	优点	缺点
MAGCOM	原理简单,计算量小,执行速度快	航向偏差较大时精度低,复杂磁环境性能低
SIMAN	稳定性和实时性好,能处理较大误差数据	计算复杂,受限于平台性能
ICCP	机动性较好,精度较高	对数据要求精度高,对噪声容忍度低

地磁等值线匹配(geomagnetic contour matching, MAGCOM)算法属于地磁匹配法。MAGCOM来源于地形轮廓匹配(terrain contour matching, TERCOM)算法,适用于对实时性和精度要求不是特别高的场合^[38]。通过地磁传感器收集地磁场数据,以一段时间积累的轨迹信息进行磁图序列匹配,并遍历所有网格点。结合惯导系统提供的参考轨迹,进行地磁信息匹配计算,通过计算待匹配磁图区域与实测序列的相关性准则找出最佳匹配位置。

桑迪亚惯性地磁辅助导航系统(Sandia inertial magnetic-aided navigation, SIMAN)属于地磁滤波法^[39]。SIMAN是一种典型的以卡尔曼滤波为核心的地磁导航技术,目前研究正朝着粒子滤波方向发展,受启发于1970年代的桑迪亚惯性地形辅助导航系统。它通过卡尔曼滤波技术辅助惯导系统进行定位,利用地形基准图和惯导输出的位置信息计算航行器与海底的相对距离,以此作为卡尔曼滤波的测量值,不断校正惯导系统,从而减少导航系统误差并提高导航精度。

ICCP算法是基于图像匹配中的迭代最近点(iterative closest point, ICP)算法发展而来的,属于地磁匹配法。它通过迭代寻找地磁测量数据与基准等值线之间的最佳匹配。该算法首先确定地磁等值线上与测量点最近的点,然后通过最小化欧氏距离的平方和进行刚性变换,不断迭代优化轨迹,最终输出最准确的航迹,以减少INS的累积误差。ICCP算法能够计算平移和旋转变量,但对初始位置和航向误差不敏感。根据前文组合导航误差分析,ICCP算法对于海洋地磁匹配导航误差中的缩放变换无法校正。罗诗途等^[40]在ICCP算法的基础上加入了仿射变换进行尺度误差的求解,改进后的ICCP算法对于误差校正具有更好的效果。

2022年,微惯性仪器与先进导航技术重点实验室提出了一种 PSO-ICCP 地磁匹配算法,利用粒子群优化(particle swarm optimization, PSO)算法的全局搜索能力,以解决 ICCP 算法对初始误差敏感的问题,同时采用基于滑动窗口和四叉树的粒子初始化策略以提高 PSO 性能^[41]。Cuenca 等^[42]在 2023 年的实验中发现,采用粒子滤波器代替传统卡尔曼滤波优化的 ICCP 算法在相同航向误差下,地磁匹配的误差仅有惯导的 1/2。2024 年,哈尔滨工程大学的王丹等^[43]将 ICCP-PSO 应用于 AUV 进行实验,同时创新性地加入人工蜂群(artificial bee colony, ABC)算法和自适应粒子群优化(adaptive particle swarm optimization, APSO)算法,并将 ICCP 的欧式距离替换为马氏距离,以减轻系统误差对匹配精度的影响。首先,通过 ABC 和 APSO 算法进行粗匹配以减小初始位置误差。然后,通过 ICCP 算法执行精匹配。最终,通过实验可以将匹配误差缩小至 89.3 m。

4 发展趋势

作为不依赖于 GNSS 卫星导航的自主导航方式,海洋地磁导航因其隐蔽性好、精度高等优势,成为水下自主导航的重要组成部分。结合海洋地磁导航关键技术,其发展趋势可以归纳为以下 5 点。

1)高精度地磁数据采集与基准图建立。目前,地磁传感器精度基本能够满足匹配导航要求,要重点发展和提升海洋地磁实时测量的精度,进行与运动相关的误差源分析和补偿技术研究,提升实际应用的适应性。地磁基准图是地磁匹配导航的基础,目前存在的主要问题包括:模型空间分辨率不高、精度不足,局部地区的误差较大;海域的海洋和航空磁测数据不足,许多地区为调查盲区;卫星数据距离场源较远,小尺度磁异常被削弱。因此,需要在重点适配区补充高质量的海域磁测资料,增加海域地磁场矢量测量数据的约束,并积极开展多源数据融合的技术方法研究,以构建多重格网嵌套、精度适配的地磁场模型体系。

2)测量系统实时性提升。实时测量系统在实际应用中面临着许多挑战,如磁场的线性化处理。对于强非线性的磁场,线性化将带来较大误差,导致滤波发散。通过对滤波方式进行扩展,设计更优的惯性/地磁紧组合导航系统,从而使结果更精确且计算时间更短,加快滤波的收敛速度。此外,实时测量系统的发展还需优化磁场特征的提取和利

用。目前,神经网络在图像处理领域的应用较为成熟,以图像化磁场特征作为输入的神经网络应用模式也是未来的重要发展方向。

3)地磁导航算法鲁棒性和精确度提升。不同导航算法的实时性、精确度等指标不同,具有不同的优缺点和适用范围。现有的 ICCP 等算法在真实航迹平行或垂直地磁等值线时匹配效果不太理想。目前,可通过多种算法相结合的方式提升算法的响应速度和匹配精度。此外,可以进一步研究基于地磁矢量、地磁梯度及磁偏角等多种特征量的最优路径判别方法。近年来,随着人工智能技术的发展,遗传算法、PSO 算法等智能优化算法被广泛应用于地磁导航算法中,通过神经网络进行地磁导航模型预测可有效提升导航的精度。未来的海洋地磁导航技术将融合多种算法与技术,朝着强鲁棒性、高精度、高实时性的方向发展。

4)水下应用实验平台的实验与精度评估。国内对于海洋地磁导航的研究大多处于算法和仿真研究阶段,应加快对水下应用实验平台的实验及精度评估的研究。重点应与不同类型潜航器相结合,开展深入的分析和实验验证,以进一步提高工程化应用能力。

5)海洋多传感融合导航技术。水下多传感器集成、数据融合是水下导航十分重要的环节。需要突破水下导航定位装备的标定技术,形成国家自主多源传感器导航定位装备与数据处理平台。多源导航传感器应具备高度集成化、小型化,多源信息应具备兼容与互操作前提,多源导航定位信息要具备自适应融合和智能化服务功能。

参考文献

- [1] 杨乐. 稳健水下地磁匹配导航关键技术研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2019.
YANG Le. Research on key technologies of robust underwater geomagnetic matching navigation [D]. Wuhan: Wuhan University, 2019 (in Chinese).
- [2] ALLOTTA B, CAITI A, COSTANZI R, et al. A new AUV navigation system exploiting unscented Kalman filter[J]. Ocean Engineering, 2016, 113: 121-132.
- [3] 魏国. 二频机抖激光陀螺双轴旋转惯性导航系统若干关键技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2013.
WEI Guo. Research on some key technologies for double-axis rotation inertial navigation system with mechanically dithered ring laser gyroscope[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2013(in Chi-

- nese).
- [4] 王汝鹏, 李晔, 马腾, 等. AUV地形匹配导航快速收敛滤波[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2018, 46(7): 94-97.
WANG Rupeng, LI Ye, MA Teng, et al. Terrain reference navigation fast convergence filtering of AUV[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2018, 46(7): 94-97(in Chinese).
- [5] WU Y H, TA X X, XIAO R C, et al. Survey of underwater robot positioning navigation[J]. Applied Ocean Research, 2019, 90: 101845.
- [6] 王巍, 邢朝洋, 冯文帅. 自主导航技术发展现状与趋势[J]. 航空学报, 2021, 42(11): 18-36.
WANG Wei, XING Chaoyang, FENG Wenshuai. State of the art and perspectives of autonomous navigation technology[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2021, 42(11): 18-36(in Chinese).
- [7] 肖枫. 地磁匹配导航中地磁场时空特性分析[D]. 西安: 长安大学, 2023.
XIAO Feng. Analysis of spatiotemporal characteristics of geomagnetic field in geomagnetic matching navigation [D]. Xi'an: Changan University, 2023(in Chinese).
- [8] TYRÉN C. Magnetic anomalies as a reference for ground-speed and map-matching navigation[J]. Journal of Navigation, 1982, 35(2): 242-254.
- [9] 蔡兆云, 魏海平, 任治新. 水下地磁导航技术研究综述[J]. 国防科技, 2007(3): 28-29.
CAI Zhaoyun, WEI Haiping, REN Zhixin. A review of underwater geomagnetic navigation technology[J]. National Defense Science & Technology, 2007(3): 28-29(in Chinese).
- [10] ARMSTRONG B, WOLBRECHT E, EDWARDS D B. AUV navigation in the presence of a magnetic disturbance with an extended Kalman filter[C]// Proceedings of OCEANS'10 IEEE SYDNEY. Sydney: IEEE, 2010: 1-6.
- [11] WARDINSKI I, SATURNINO D, AMIT H, et al. Geomagnetic core field models and secular variation forecasts for the 13th international geomagnetic reference field (IGRF-13)[J]. Earth, Planets and Space, 2020, 72(1): 1-22.
- [12] CANCIANI A J. Magnetic navigation on an F-16 aircraft using online calibration[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2021, 58(1): 420-434.
- [13] CIANCHINI G, PISCINI A, DE SANTIS A, et al. Fast Dst computation by applying deep learning to Swarm satellite magnetic data[J]. Advances in Space Research, 2022, 69(2): 837-855.
- [14] GILL J P, TAYLOR B K. Navigation by magnetic signatures in a realistic model of Earth's magnetic field[J]. Bioinspiration & Biomimetics, 2024, 19(3): 036006.
- [15] GIDUGU A R, VANDAVASI B N J, NARAYANASWAMY V. Bio-inspired machine-learning aided geo-magnetic field based AUV navigation system[J]. Scientific Reports, 2024, 14(1): 17912.
- [16] 李素敏, 张万清. 地磁场资源在匹配制导中的应用研究[J]. 制导与引信, 2004, 25(3): 21-23.
LI Sumin, ZHANG Wanqing. Study on the application of geomagnetic field contour in matching guidance[J]. Guidance & Fuze, 2004, 25(3): 21-23(in Chinese).
- [17] 晏登洋, 任建新, 宋永军. 惯性/地磁组合导航技术研究[J]. 机械与电子, 2007, 25(1): 19-22.
YAN Dengyang, REN Jianxin, SONG Yongjun. Investigation on INS/GNS integrated navigation system [J]. Mechanical and Electronic, 2007, 25(1): 19-22(in Chinese).
- [18] 赵建虎, 王胜平, 王爱学. 一种改进型 TERCOM 水下地磁匹配算法[J]. 武汉大学学报, 2009, 34(11): 1320-1323.
ZHAO Jianhu, WANG Shengping, WANG Aixue. An improved TERCOM algorithm for underwater geomagnetic matching[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2009, 34(11): 1320-1323(in Chinese).
- [19] LIN Y. Hausdorff-based RC and IESIL combined positioning algorithm for underwater geomagnetic navigation[J]. EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, 2010(4): 593238.
- [20] 穆华, 吴志添, 吴美平. 水下地磁/惯性组合导航试验分析[J]. 中国惯性技术学报, 2013, 21(3): 386-391.
MU Hua, WU Zhitian, WU Meiping. Experimental analysis of underwater geomagnetic field/inertial integrated navigation [J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2013, 21(3): 386-391(in Chinese).
- [21] WU Z, HU X, WU M, et al. An experimental evaluation of autonomous underwater vehicle localization on geomagnetic map[J]. Applied Physics Letters, 2013, 103(10): 104102.
- [22] 王鹏. 水下地磁导航适配性研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2014.
WANG Peng. Research on matching suitability for underwater geomagnetic navigation[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2014(in Chinese).

- [23] 朱占龙, 单友东, 杨翼, 等. 基于新息正交性自适应滤波的惯性/地磁组合导航方法[J]. 中国惯性技术学报, 2015, 23(1): 66-70.
ZHU Zhanlong, SHAN Youdong, YANG Yi, et al. INS/GNS integrated method based on innovation orthogonality adaptive Kalman filter[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2015, 23(1): 66-70 (in Chinese).
- [24] 解伟男, 李清华, 奚伯齐, 等. 基于仿射参数估计的地磁匹配导航算法[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2018, 39(8): 1363-1368, 1388.
XIE Weinan, LI Qinghua, XI Boqi, et al. Geomagnetic matching algorithm based on affine parameter estimation [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2018, 39(8): 1363-1368, 1388(in Chinese).
- [25] 马伟, 李沅, 康健, 等. 基于联邦滤波的偏振光/SINS/BDS/地磁组合导航算法[J]. 传感器与微系统, 2022, 41(2): 136-139.
MA Wei, LI Yuan, KANG Jian, et al. Polarized light/SINS/BDS/geomagnetic integrated navigation algorithm based on federated filtering[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2022, 41(2): 136-139(in Chinese).
- [26] 高东, 朱明慧, 韩鹏. 一种地磁/惯性深度融合导航方法[J]. 中国惯性技术学报, 2022, 30(4): 437-444.
GAO Dong, ZHU Minghui, HAN Peng. A geomagnetic/inertial depth fusion navigation method [J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2022, 30(4): 437-444(in Chinese).
- [27] 付碧波, 李海兵, 罗建刚, 等. 拖曳式海洋地磁三分量测量系统的设计与试验[J]. 海洋测绘, 2023, 43(4): 15-18.
FU Bibo, LI Haibing, LUO Jiangang, et al. Design and experiment of a towed oceanic geomagnetic three-component measurement system[J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2023, 43(4): 15-18(in Chinese).
- [28] 罗建刚, 李海兵, 刘静晓, 等. 基于小型无人艇的海洋磁力测量精度评价[J]. 海洋测绘, 2022, 42(1): 25-29.
LUO Jiangang, LI Haibing, LIU Jingxiao, et al. Evaluation of marine magnetic measurement accuracy based on small unmanned boats[J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2022, 42(1): 25-29(in Chinese).
- [29] 罗建刚, 李海兵, 罗聘, 等. 一种地磁矢量测量多源误差校正方法[J]. 中国惯性技术学报, 2021, 29(2): 208-213, 220.
LUO Jiangang, LI Haibing, LUO Cheng, et al. A multi-source error correction method for geomagnetic vector measurement[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2021, 29(2): 208-213, 220(in Chinese).
- [30] 张涛, 张文博, 高东, 等. 一种神经网络预测模型误差的地磁导航方法[J]. 航天控制, 2024, 42(1): 37-42.
ZHANG Tao, ZHANG Wenbo, GAO Dong, et al. A geomagnetic navigation method based on neural network prediction model error[J]. Aerospace Control, 2024, 42(1): 37-42(in Chinese).
- [31] 常宜峰. 局域海洋地磁场模型及磁力异常数据探测方法研究[D]. 郑州: 解放军信息工程大学, 2012.
CHANG Yifeng. Research on local marine geomagnetic field model and detecting of geomagnetic abnormal datas [D]. Zhengzhou: The PLA Information Engineering University, 2012(in Chinese).
- [32] 马伟, 李沅, 康健, 等. 基于联邦滤波的偏振光/SINS/BDS/地磁组合导航算法[J]. 传感器与微系统, 2022, 41(2): 136-139.
MA Wei, LI Yuan, KANG Jian, et al. Polarized light/SINS/BDS/geomagnetic integrated navigation algorithm based on federated filtering[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2022, 41(2): 136-139(in Chinese).
- [33] TITTERTON D H, WESTON J L. Strapdown inertial navigation technology [J]. Aerospace & Electronic Systems Magazine IEEE, 2004, 20(7): 33-34.
- [34] 张绍华, 徐超群, 易忠, 等. 基于旋翼无人机技术的近地磁测系统[J]. 航天器环境工程, 2021, 38(5): 563-568.
ZHANG Shaohua, XU Chaoqun, YI Zhong, et al. A near-Earth magnetic surveying system based on rotor UAV technology[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2021, 38(5): 563-568(in Chinese).
- [35] 俞泽天. AUV 海洋地球物理场探测与定位方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2023.
YU Zetian. Research on detection and positioning methods of marine geophysical field using AUV[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2023 (in Chinese).
- [36] 王志博. 海洋拖曳系统动力学与设计[M]. 北京: 国防工业出版社, 2019: 22-35.
WANG Zhibo. Dynamics and design of ocean towed systems [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2019: 22-35(in Chinese).
- [37] 李宏, 魏毅博, 邹维宝, 等. 基于 IGRF13 和 WM-

- M2020 模型的地磁匹配特征量的选择[J]. 地球物理学进展, 2022, 37(4): 1414-1421.
- LI Hong, WEI Yibo, ZOU Weibao, et al. Selection of geomagnetic matching feature elements based on IGRF13 and WMM2020 models[J]. Progress in Geophysics, 2022, 37(4): 1414-1421(in Chinese).
- [38] 陈棣湘, 陈卓, 张琦, 等. 航空平台地磁矢量匹配导航算法研究进展[J]. 中国测试, 2024, 50(5): 1-10. CHEN Dixiang, CHEN Zhuo, ZHANG Qi, et al. Research progress on geomagnetic vector matching navigation algorithms for aviation platforms[J]. China Measurement & Test, 2024, 50(5): 1-10 (in Chinese).
- [39] 马明珠. 水下地磁辅助导航匹配算法研究[D]. 南京: 东南大学, 2019. MA Mingzhu. Research on underwater geomagnetic assisted navigation matching algorithm[D]. Nanjing: Southeast University, 2019(in Chinese).
- [40] 罗诗途, 任治新. 基于仿射模型变换的地磁匹配导航算法[J]. 中国惯性技术学报, 2010, 18(4): 462-465. LUO Shitu, REN Zhixin. Geomagnetic matching algorithms based on affine model[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2010, 18(4): 462-465(in Chinese).
- [41] XU N H, WANG L H, WU T, et al. An innovative PSO-ICCP matching algorithm for geomagnetic navigation[J]. Measurement, 2022, 193: 110958.
- [42] CUENCA A, MONCAYO H. Geomagnetic aided navigation using rao blackwellized particle filter[C]// Proceedings of AIAA SciTech 2023 Forum. National Harbor: AIAA, 2023.
- [43] WANG D, LIU L Q, BEN Y Y, et al. Underwater terrain-matching algorithm based on improved iterative closest contour point algorithm[J]. Measurement & Control, 2024, 57(7): 893-902.

(编辑:黄利华)