

doi: 10.7690/bgzdh.2026.05.004

基于轮廓匹配改进的地磁匹配算法

程永航, 周 勇

(中国兵器装备集团自动化研究所有限公司无人机事业部, 四川 绵阳 621000)

摘要: 为解决磁轮廓匹配 (magnetic contour matching, MAGCOM) 算法缺乏灵活性等问题, 提出一种迭代改进的轮廓匹配 (iterative contour matching, ICM) 的地磁导航方法。采用粗精结合匹配, 粗匹配阶段, 改进搜索策略, 以平均绝对差 (mean absolute difference, MAD) 为相关度量, 进行粗匹配。在粗匹配结果的基础上, 约束等值线, 迭代缩小搜索域, 抑制惯导误差累积。仿真结果表明: 在一定噪声水平下, 该算法的定位误差控制在 200 m 内。

关键词: 轮廓匹配; 迭代; 等值线约束; MAD; 克里金插值

中图分类号: P318 **文献标志码:** A

Improved Geomagnetic Matching Algorithm Based on Contour Matching

Cheng Yonghang, Zhou Yong

(Department of UAV, Automation Research Institute Co., Ltd. of China South Industries Group Corporation, Mianyang 621000, China)

Abstract: In order to improve the flexibility of the magnetic contour matching (MAGCOM) algorithm, an iteratively improved contour matching (ICM) method is proposed for geomagnetic navigation. In the coarse matching stage, the search strategy is improved, and the mean absolute difference (MAD) is used as the correlation metric for coarse matching. On the basis of the coarse matching results, the contours are constrained, the search domain is reduced iteratively, and the accumulation of ins errors is restrained. The simulation results show that the positioning error of the algorithm is controlled within 200 m under a certain noise level.

Keywords: contour matching; iteration; contour constraint; MAD; Kriging interpolation

0 引言

地磁场是地球基本物理场, 是天然形成的参考坐标系, 可以辅助陆海空域的载体等进行导航定位。随着卫星、惯性等导航定位手段的不断发展成熟, 导航技术手段得到了充分的发展, 在国内外关于未来 PNT 体系发展的调查报告中, 多种 PNT 技术手段融合是关键环节之一^[1]。利用地磁场进行导航具有一定的优势, 地磁导航具有无长时间累计误差的特性, 通常作为辅助手段来提升惯导精度, 且是一种无源、被动导航方式, 不需要接收外部信息, 不易被干扰, 能够在地形特征不明显的地域工作 (沙漠、海洋、平原等)。

近现代利用地磁场进行导航定位的研究可以追溯到 20 世纪 60 年代中期, E-Systems 公司开展了地磁导航与定位技术的研究, 但那时还没有大规模的地磁数据, 直到美国海军利用 Lockheed-P3 探测到了试验场的地磁异常资料^[2], 这一领域的研究才刚刚起步。1976 年, 俄国的 MAGNET 项目试验成功, 利用磁通门传感器采集地磁数据, 开展了以地

磁场作为特征量的等高线匹配制导实验。瑞典在 20 世纪 80 年代也开始了地磁导航技术的研究, 利用地磁异常以及自相关算法在海上进行了测速定位实验^[3-4]。相关资料表明, 2003 年 8 月的美国国防部军事关键技术名单里提到地磁数据参考导航系统^[5], 在国防部的文件里称他们所研制的纯地磁导航系统的导航精度为: 地面和空中定位精度优于 30 m, 水下定位精度优于 500 m。2017 年, 美国空军技术学院利用光泵铯磁力仪, 得到高精度磁图, 结合惯导系统和气压计等, 实现了 13 m 的定位精度^[6]。2020 年, 美国空军在磁基础上进一步研究, 仿真结果显示定位精度可达到 10 m^[7]。2021 年, 美军在内达州爱德华兹空军基地试验场^[8]进行了航空地磁导航实验, 利用最新的地磁传感器及软件搭载到 F-16 飞机上, 在 300 m 高度下达到 59 m 的定位精度。国内的地磁导航研究起步较晚, 到 2004 年才在地磁匹配制导方面进行了初步研究。2009 年, 胡小平等进行了高精度的惯性/地磁组合导航实验, 最终的定位精度达到 100 m 以内。

收稿日期: 2024-12-03; 修回日期: 2025-01-04

第一作者: 程永航(2000—), 男, 四川人, 硕士。

近年来,地磁导航技术经过不断地发展,涌现了一大批成果,文献[9]提出一种无需先验地磁图的地磁/INS 组合导航方法,在有地磁图的区域,对匹配结果进行滤波矫正,用于惯性导航系统,在无磁图区域,采用非磁图导航方法将飞机引导到目的地;文献[10]针对传统 ICCP 算法对管道系统的初始定位误差比较敏感的问题,提出了一种基于放射变换的 ICCP 算法,实验结果验证了算法的有效性;文献[11]针对 ICCP 算法对航向误差敏感、在地磁一般特征相似的区域容易失配的问题,提出了一种改进的基于地磁矢量的 ICCP 匹配算法。利用地磁 3 维磁矢量和 Hausdoff 距离作为目标函数进行多次迭代,提高了匹配效率和精度;文献[12]提出了一种改进的基于地磁双分量梯度加权的磁导航方法,用俯仰角和横滚角计算水平和垂直地磁分量。采用梯度权值作为系数,通过机载实验验证了该方法的准确性和有效性。

地球科学理论一般认为,地球上任意点的磁场矢量与其所在位置是对应的,确定一点的磁矢量就能实现全球定位^[13]。受限于磁传感器精度、部分地域位置测量困难,地磁导航往往辅助惯性系统进行导航定位,且是区域性的。常用的地磁辅助方法为:批处理(地磁匹配)和递推滤波^[14]。地磁匹配算法利用区域实测地磁序列与计算机预先存储的地磁数据库中寻找最佳匹配,获得载体在当前时刻的位置或修正位置。

轮廓匹配(MAGCOM)算法的优点在于原理简单、定位精度高等,计算算法仅需要采集匹配区域地磁,而无需对大范围内地磁进行采集,且通过规划载体的运行路线可实现载体的高精度导航,有利于工程实现。针对初始存在较大位置误差时的误匹配导致导航失效的情况和简单的轮廓匹配算法无法抑制惯导误差累积,笔者提出一种迭代改进轮廓匹配的(ICM)地磁匹配算法,通过粗精匹配结合,粗匹配阶段进行相关计算匹配出最佳起始点,缩小了检索范围,精匹配阶段通过对等值线进行约束,抑制惯导误差累积。仿真结果验证了该算法的性能。

1 地磁匹配导航原理

1.1 地磁场模型及定位原理

地磁场是地球基本物理场,当前地磁学理论认为,地磁场的磁场强度由 3 部分构成:

$$B(r, t) = B_m(r, t) + B_c(r) + B_d(r, t) \quad (1)$$

式中: $B_m(r, t)$ 为主磁场,起源于地核,其强度可达 5~7 万 nT,占地球表面观测数据的 95%; $B_c(r)$ 为一种在被磁化的地壳中生成的异常磁场,其强度占据了全部磁场的 4%; $B_d(r, t)$ 为磁场的扰动来源是磁层-电离层,强度在 5~500 nT。

地磁场一般有 7 大要素,是一种由各种因素产生的向量场,用其场强度及各成分来描述地磁场,如图 1 所示。

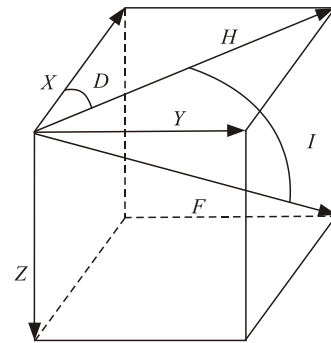


图 1 地磁场要素

设空间中的某点作为起点,水平面上为顶部,地磁场的场强用 F 表示,水平方向的强度用 H 表示, x 轴表示北向场强 X , y 轴表示东向场强 Y , z 轴表示场强 Z ,水平场强和 F 之间的角度表示磁倾角 I ,水平场强对 x 轴场的强度表示磁偏角 D 。

7 个地磁要素之间的关系:

$$\left. \begin{aligned} F &= \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2} \\ H &= \sqrt{X^2 + Y^2} \\ D &= \arctan(Y / X) \\ I &= \arctan(Z / \sqrt{X^2 + Y^2}) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

由于地壳异常场具有复杂的空间结构和相对稳定的时间分布特征,其内部蕴含着更为丰富的精细信息,制成的地磁异常图的空间分辨率更高,若应用于特定地区的导航和定位,将会得到更高的精度。

地磁匹配是根据地磁图进行导航和定位的技术,目标是确定载体在空间中的位置,地磁匹配技术是根据实际测得的载体运动轨道、载体轨道上测得的地磁数据和计算机内预存的地磁异常强度轨迹图来确定载体在地理空间中的位置。

滤波方法是根据地磁图导航,须确定系统的位置、姿态、速度以及惯性装置的误差,具有多态特性。匹配可以是离线或实时;而滤波技术对实时性能有很高的要求。通过对地磁匹配的分析,得到的数据可用于对整个导航系统进行全面的定位;同时,一些滤波技巧也可用于匹配问题中,从而为匹

配算法的发展提供新的理论支持。地磁匹配模型：

$$\left. \begin{aligned} e_{t+1} &= f(e_t) + w_t \\ y_t &= h(e_t + x_t) + v_t \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中： e_t 为惯导的定位误差； w_t 为定位噪声值； y_t 为测量地磁异常值； v_t 为噪声值。地磁匹配导航原理如图 2 所示。

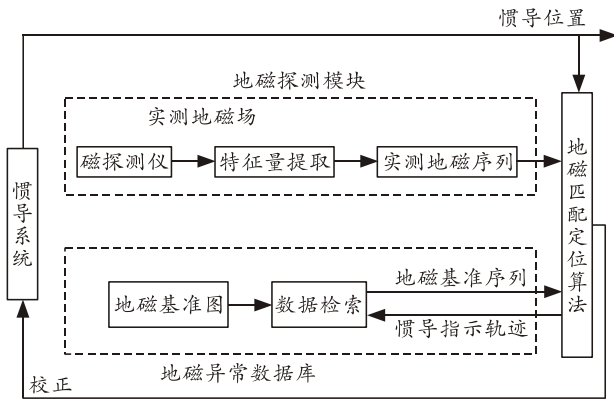


图 2 地磁匹配原理

1.2 局部地磁图构建技术

克里金插值法是一类回归算法，其核心思想是：光滑函数不能完全反映地理空间上的连续变化特性，而随机曲面则能更好地表示地理空间上的连续变化特性。在插值时，充分利用已知数据点的值、已知点和待测点的值之间的关系，使其具有较高的精度，更接近于实际的插值需求。

克里金插值法：

$$Z_K = \sum_{p=1}^n \omega_p Z_p \quad (4)$$

式中： Z_K 为估计值； Z_p 为属性值， ω_p 为权值系数。 ω_p 需要满足：

$$\left. \begin{aligned} \sum_{p=1}^n \omega_p &= 1 \\ \sum_{q=1}^n \omega_p \gamma(h_{pq}) + \lambda &= \gamma(h_{po}), \quad p=1, 2, \dots, n \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中： $\gamma(h_{pq})$ 为已知点 p 和 q 之间的变异函数； $\gamma(h_{po})$ 为已知点 p 和插值点 o 之间的变异函数。

依据空间相关性原理，一般来说，相邻 2 个点之间的特征值越是相近，反之则越是相远。克里金插值的核心内容为变差函数，是一种特殊的地理统计方法，在二阶稳定性假定下具有一定的离散性。变函数的离散形式为：

$$\gamma'(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(X_i) - Z(X_i + h)]^2 \quad (6)$$

式中： $\gamma'(h)$ 为实验变异函数； $N(h)$ 为相距 h 的采样点对数； $Z(X_i)$ 为采样点值。变差函数模型如图 3 所示。

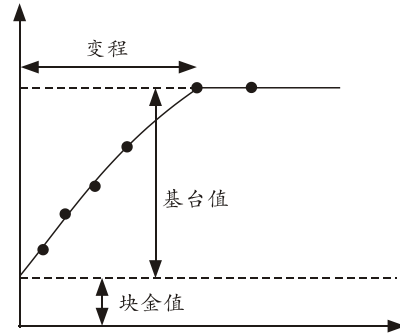


图 3 变差函数模型

克里金插值法的基本思想是：首先，根据已知的样点，对其进行空间结构分析，并对其进行适当尺寸的剖分；然后，计算实验变差函数值，并用理论变差函数值进行拟合，将理论变差函数带入式(5)求取权重系数 ω_p ，将 ω_p 带入式(4)得到待插值点的预测值。

2 地磁匹配方法

地磁匹配技术是典型的数据关联算法，其目的是寻求航迹和真轨迹的关系。该技术通过建立传感器测得信息与数据库信息间的关联，以判断处理的数据来自于同一个公共源，将实际航迹上的实际地磁测量数据与地磁图进行相关运算，通过不同的判定准则找出最大的解，即最大相关解是所求的真值。常见的相关准则如表 1 所示。

表 1 常用的相关性准则

相关算法	公式($i=-m, \dots, m; j=-n, \dots, n$)	最佳匹配
积相关算法 PROD	$PROD_{ij} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N M_{S(i,j)}^k M_M^k$	最大值
归一化积 相关算法 NPROD	$NPROD_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^N M_{S(i,j)}^k M_M^k}{\left[\sum_{k=1}^N M_{S(i,j)}^k \right]^{1/2} \left[\sum_{k=1}^N M_M^k \right]^{1/2}}$	最大值
平均绝对差 算法 MAD	$MAD_{i,j} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N M_{S(i,j)}^k - M_M^k $	最小值
均方差算法 MSD	$MSD_{ij} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (M_{S(i,j)}^k - M_M^k)^2$	最小值

M_M^k 、 M_S^k 分别表示磁传感器测得磁场强度与惯性位置得到磁场强度； N 表示采样点个数； k 代表 k 个采样点； (i, j) 表示每个位置序列的起始点； m 和 n 代表了不确定域的大小。

2.1 MAGCOM 磁轮廓匹配算法

轮廓匹配技术 (contour matching technique, CMT)，是一种相关匹配算法的应用，已被成功应用于重力匹配、地形匹配，在地磁匹配也有应用。笔者希望从分析地磁匹配中轮廓匹配算法的不足出

发, 达到提高地磁匹配算法精度的目的。轮廓匹配算法原理如图 4 所示。

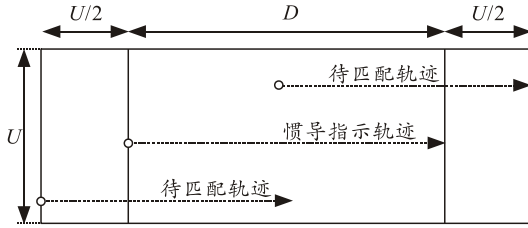


图 4 轮廓匹配原理

测量轨迹的长度记为 D , 匹配不确定区边长记为 U , 根据惯导误差标准差定义为 σ , 以确保真轨迹被包含在不确定区 $(D+U) \times U$ 内。用网格方式离散地存储地磁信息, 构建地磁图。匹配过程中, 测量路径在不确定区格内逐格移动得到所需的待匹配路径。并计算该路径的地磁异常剖面值与实际测量地磁数据相关性, 相关度最高路径即为匹配最优路径。

轮廓匹配方法属于批处理算法, 原理简单、定位精度高。但轮廓匹配方法也有不足之处。例如, 在轮廓匹配方法中, 需要在待定位不确定区域中对测量轨迹进行逐步运动得到待匹配的轨迹, 不确定区的长度 D 越大, 不确定的轨迹越多, 匹配计算的量越大, 也就对算法实时性有较大的影响。而轮廓匹配方法不消除匹配过程中的采样误差, 即匹配的长度不能过大。实际的定位中, 地磁图相关度较高, 需要匹配足够的长度以展现出测量轨迹的特征, 避免出现多最优解的情况。笔者对轮廓匹配方法进行改进, 提出了改进的基于轮廓的匹配方法。

2.2 改进轮廓匹配的匹配算法

改进的轮廓匹配算法利用地磁等值线来辅助实现最佳匹配过程, 该过程被划分为粗匹配和精匹配 2 个阶段。

1) 在粗匹配阶段, 主要通过相关性计算来大致估计惯性导航系统的初始定位误差。依据 3σ 原则, 即缩小搜索区域, 以提高匹配的效率。该算法的运算量与需匹配的轨迹数量 $S(i, j)$ 成正比。传统算法通过将测量轨迹平动来生成系列候选轨迹, $S(i, j)$ 中位置序列的数量多少取决于搜索区域内的网格数。当搜索区域较大时, 计算复杂度随之提高。实际观察发现, 相关性高的候选解总落在搜索域内起始等值线附近, 通过等值线约束搜索域, 即可大大降低计算量。选取距离惯性导航指示初始位置最近的等值线上的位置作为搜索中心, 可明显降低后续的匹配工作量, 确保匹配到相应结果。粗匹配过程:

$$\left. \begin{aligned} S(i, j), (i, j) \in \text{contour} \\ \text{mad}_{i,j} = (1/N) \sum_{k=1}^N |M_{S(i,j)}^k - M_M^k| \\ (a, b) = \min(\text{mad}_{i,j}) \\ \hat{M} = S(a, b) \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式中: \hat{M} 为匹配最优; (a, b) 为 \hat{M} 的起点。场磁场是在空间中连续变化的磁场强度, 在考虑测量误差的情况下, 将起始等值线作为一种参考线用来帮助定位及匹配过程, 测量误差的存在会使测得的磁场值不完全等于理论等值线上的磁值, 需要将起始等值线做一定程度的扩大以覆盖可能出现的误差空间。

2) 精匹配: \hat{M} 是由测量航迹平动得到的, 由惯性导航系统解算产生的误差累积仍然存在。精匹配的目标是在粗匹配结果的基础上, 利用等值线约束来限制匹配过程中惯导误差的累积。

每个预报位附近都有多个位置磁场强度与实际定位位置相同, 即分布在相应的等值线上且都有可能为实际的航迹定位位置, 如何甄别哪个是载体的实际位置是一个必须解决的问题。这里采用一种简化的“就近原则”, 即认为与预报位置距离最近的那一点是所要找的位置即实际载体的位置。迭代匹配过程模型为:

$$\left. \begin{aligned} x_{k+1} = \hat{x}_k + u_{k+1} \\ \hat{x}_k = PM(x_k) \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式中: x_k 为预报点; \hat{x}_k 为真实位置的估计值; u_t 为 2 次地磁测量间惯导里程; $PM(\bullet)$ 为精匹配过程。精匹配的步骤描述如图 5 所示。

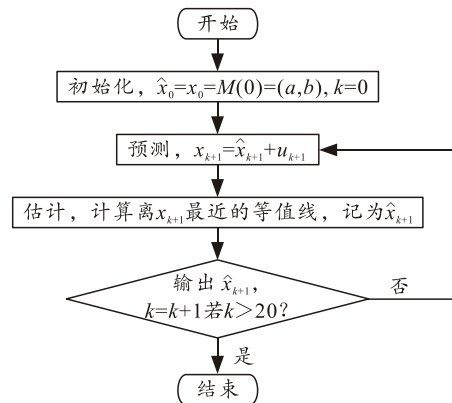
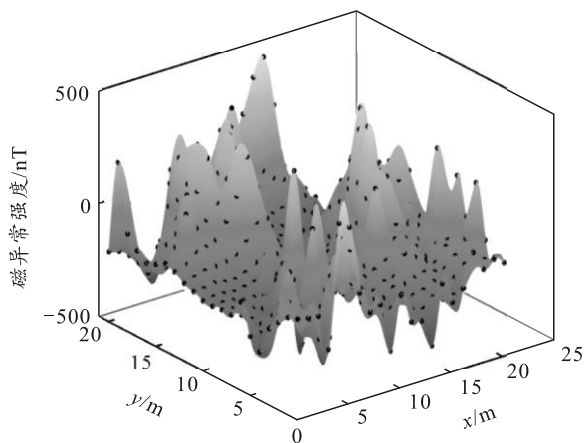


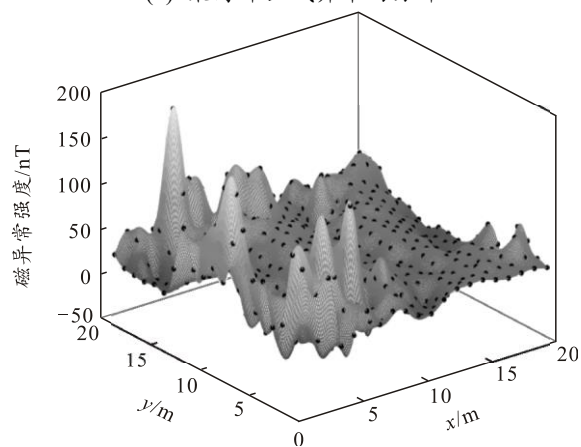
图 5 精匹配过程

3 仿真实验分析

为验证改进算法的性能, 采用 MAD 算法在插值地磁图和实测地磁图上进行了仿真, 结果如图 6 所示。



(a) 某海洋区域异常场分布



(b) 某陆地区域异常场分布

图 6 地磁异常分布

选取地磁异常值作为匹配特征进行匹配，地磁图由某陆地和某海洋区域的地磁异常数据经过克里金插值制成，惯性导航系统数据均由仿真程序生成，匹配长度选择整条轨迹，仿真参数如表 2 所示。

表 2 仿真参数

参数	参数值
陀螺漂移/($^{\circ}$ /h)	0.005
加速度计零偏/(m/s^2)	5×10^{-4}
地磁测量噪声/nT	1
磁图网格间距/m	200
不确定域大小/m	4 000
INS 采样间隔/s	0.01
地磁测量间隔/s	20
相关原则	MAD
定位误差/m	(北向误差, 东向误差)

地磁图为某陆地和海洋区域实测地磁图插值形成的高分辨率地磁图，网格精度为 $200\text{ m} \times 200\text{ m}$ 。图 6 展示了其预测插值表面与原始采样点分布。

3.1 ICM 算法在构建的局部海洋地磁图上仿真

仿真结果如图 7-8 所示。改进前后结果对比如表 3 所示。

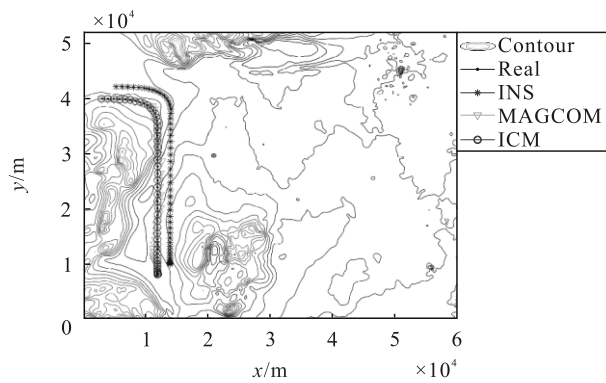
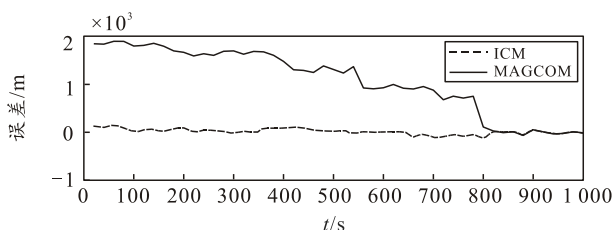
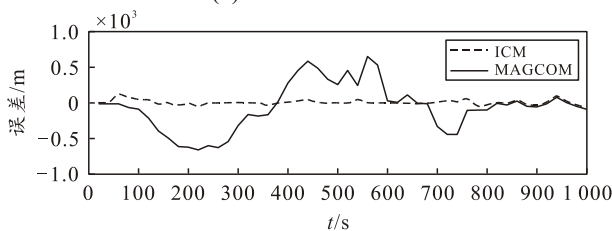


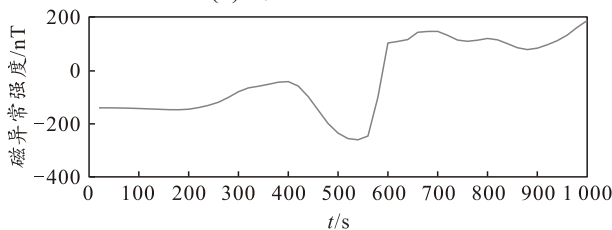
图 7 匹配结果



(a) 北面匹配误差



(b) 东面匹配误差



(c) 地磁剖面曲线

图 8 误差曲线和对应的地磁剖面曲线

表 3 匹配算法改进前后结果

算法	北向平均	东向平均	平均运行
	定位误差/m	定位误差/m	
MAGCOM	373.8	328.3	30.9
ICM	120.3	69.2	7.9

仿真是磁图数据为某海域实测地磁异常数据的匹配结果。从仿真结果可以看出：部分轨迹沿地磁等值线平行，地磁信息稀疏。提出的算法对环境有一定适应性，在地磁场变化幅度有限的区域也能完成匹配，平均定位误差可以控制在 200 m 内，且不随时间累积。

3.2 ICM 算法在构建的局部陆地磁图上仿真

仿真结果如图 9-10 所示。改进前后结果对比如表 4 所示。

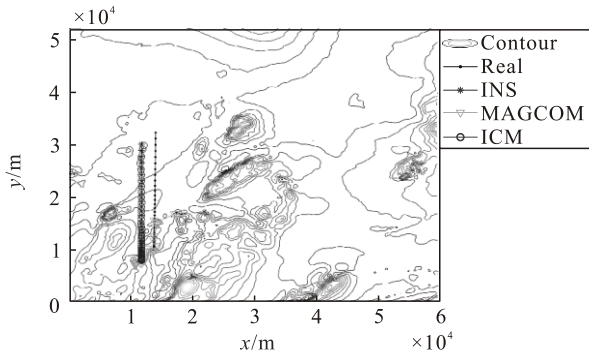
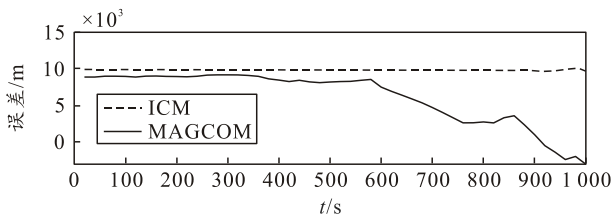
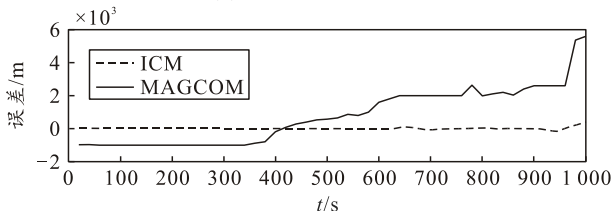


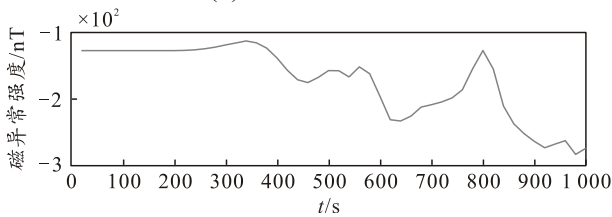
图 9 匹配结果



(a) 北面匹配误差



(b) 东面匹配误差



(c) 地磁剖面曲线

图 10 误差曲线和对应的地磁剖面曲线

表 4 匹配算法改进前后结果

算法	北向平均 定位误差/m	东向平均 定位误差/m	平均运行 时间/s
MAGCOM	517.8	339.5	28.40
ICM	95.7	69.6	7.91

在仿真中，对不确定域进行了约束，轮廓匹配算法实效，ICM 算法的平均定位精度达到 100 m 左右，改进的算法表现与陆地区域趋于一致。改进的算法精度相对传统算法有很大提高。

4 结束语

笔者通过对轮廓匹配算法加以改进，使得在一

定噪声水平的仿真环境下，地磁匹配定位误差控制在 200 m 内，取得较好的匹配结果。

参考文献：

- [1] 陆一, 魏东岩, 纪新春, 等. 地磁定位方法综述[J]. 导航定位与授时, 2022, 9(2): 118-130.
- [2] GOLDENBERG F. Geomagnetic Navigation beyond Megnetic Compass[C]//2006 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium.USA: San Diego, California, 2006: 684-694.
- [3] TYRÉN C. Magnetic Anomalica as a Reference for Ground-speed and Map-matching Navigation[J]. Navigation, 1982, 35(2): 242-254.
- [4] TYRÉN C. Magnetic Terrain Navigation[C]// Symp on Unmanned Untethered Submerible Technology. Marine Systems Engineering Laboratory, University of New Hampshire, 1987: 245-256.
- [5] 王勇, 范荣双, 贺亚杰. 改进粒子群优化算法在地磁匹配中的应用[J]. 测绘科学, 2021, 46(5): 51-57.
- [6] CANSANI A, RAQUET J. Airborne Magnetic Anomaly Navigation[J]. Aerospace and Electronic Systems, 2017, 53(1): 67-80.
- [7] GNADT R, BELARGE J, CANSANI A, et al. Signal enhancement for magnetic navigation challenge problem[J]. ArXiv, 2020(7): 315-327.
- [8] CANSANI A J. Magnetic Navigation on an F-16 Aircraft Using Online Calibration[J]. Aerospace and Electronic Systems, 2022, 58(1): 420-434.
- [9] WANG Q, ZHENG C, WU P, et al. Geomagnetic/inertial navigation integrated matching navigation method[J]. Heliyon, 2022, 8(11): 11249.
- [10] ZHANG H M, YANG L, LI M L. Improved ICCP Algorithm Considering Scale Error for Underwater Geomagnetic Aided Inertial Navigation[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2019, 1527940: 9.
- [11] REN Y, WANG L, LIN K, et al. Improved Iterative Closest Contour Point Matching Navigation Algorithm Based on Geomagnetic Vector[J]. Electronics, 2022, 11(5): 796.
- [12] ZHUO CHEN Z, Z LIU Z, ZHANG Q, et al. An Improved Geomagnetic Navigation Method Based on Two-Component Gradient Weighting[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2022(99): 21.
- [13] 林沂, 孙晶京, 闫旭. 地磁导航定位技术原理与方法综述[J]. 全球定位系统, 2023, 48(6): 32-41.
- [14] 付希禹, 孙永荣, 李荣冰. 基于 MSD 和 ICCP 改进的地磁联合匹配算法[J]. 南京航空航天大学学报, 2021, 53(6): 928-933.