

<http://bhxb.buaa.edu.cn> jbuaa@buaa.edu.cn

DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2024.0011

基于自适应圆弧状路径搜索的 地磁感知导航定向方法

李红*, 刘恒宇, 徐晨燕

(西安邮电大学 自动化学院, 西安 710121)

摘要: 水下自主无人潜航器 (AUV) 在海洋探索、军事领域上发挥着巨大的作用。针对水下自主无人潜航器在无先验信息情况下的导航问题, 提出一种圆弧状路径搜索的地磁感知导航定向方法。该方法建立载体的地磁感知导航模型, 将导航过程转化为多目标优化问题; 载体以圆弧状路径, 感知路径空间中目标函数的变化趋势, 从而确定目标方向; 该方法自适应选择不同的搜索间隔以适应不同搜索阶段, 从而实现自主无人潜航器的导航定向任务。通过仿真实验分析, 结果表明: 所提方法能够使水下自主无人潜航器在无先验数据地磁图的情况下到达预设目标地点, 通过与其他搜索算法对比, 验证了所提方法的有效性与高效性。

关键词: 自主导航; 地磁导航; 多目标优化; 水下自主潜航器; 磁趋向性

中图分类号: U666.1; TB18

文献标志码: A

文章编号: 1001-5965(2026)04-1048-07

海洋占据了地球上大多数的面积, 是地球上最大的生态系统之一, 其蕴含了丰富的自然资源。水下自主无人潜航器 (autonomous underwater vehicle, AUV) 作为人类海洋探索主要途径之一^[1], 在军事、救援、海洋勘探等领域发挥着巨大的作用。由于深海环境中电磁波传播受到较大的制约, 也没有固定的基站提供导航服务, 因此, 水下自主无人潜航器导航问题是极具挑战性的问题。面对该问题科学界提出了不同的解决方案, 如利用地球物理场^[2-4]进行导航, 如地磁^[5]、地形^[6]、重力场导航^[7-8]等。

地磁场是地球表面存在的稳定且具有大小和方向的物理场, 并且有多种地磁分量都与地理位置信息有关, 同时地磁场导航对卫星和信号基站等设施没有依赖性, 适用于水下、地下等恶劣环境。通过传感器获取地磁场的地理参数, 从而完成定位导

航任务, 该方法具有较强的隐蔽性、安全性。

地磁场导航根据有无先验信息可划分为有先验地磁图导航和无先验地磁图导航。在有先验地磁图导航提供全局信息的情况下, 主要研究集中在地磁匹配框架下的导航方法, 其需要预先获取该地区的高精度地磁图, 利用实测地磁特征与先验地磁图进行相关匹配, 从而完成定位。Wang等^[9]提出一种基于改进粒子群优化的地磁匹配算法将修正的Metropolis准则应用于粒子群优化, 并将活动思想引入活动算法中, 从而提高传统地磁匹配算法的定位精度。Pang等^[10]提出一种基于导航误差粗略估计和搜索区域自适应的地磁导航方法, 显著减少匹配搜索区域和搜索步长, 以提高匹配精度和时效性。

由于此类导航方法需要先验高精度地磁图, 无法适用于未知区域, 这大大限制了地磁导航的适用

收稿日期: 2024-01-08; 录用日期: 2024-04-09; 网络出版时间: 2024-04-22 19:11

网络出版地址: link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20240419.1038.002

基金项目: 陕西省科技厅自然科学基金基础研究计划 (2024JC-YBMS-549); 西安市先进控制与智能处理重点实验室 (2019220714SYS022CG04); 陕西省重点产业链项目 (2021ZDLGY04-04); 陕西省重点研发计划项目 (2022NY-087); 陕西省社科联/陕西省应急管理厅项目 (2021HZ1121); 西安邮电大学研究生创新基金资助项目 (CXJJZL2023033)

*通信作者. E-mail: lihong@xupt.edu.cn

引用格式: 李红, 刘恒宇, 徐晨燕. 基于自适应圆弧状路径搜索的地磁感知导航定向方法 [J]. 北京航空航天大学学报, 2026, 52(4): 1048-1054. LI H, LIU H Y, XU C Y. Geomagnetic perception navigation orientation method based on adaptive circular path search [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2026, 52(4): 1048-1054 (in Chinese).

范围。针对无先验地磁图提供全局信息的情况,主要研究集中在贝叶斯滤波框架下^[11],除此之外,Zhang等^[12]提出一种具有控制和状态约束的模型预测控制算法,该算法仅利用地磁场的赤纬分量和倾角分量进行水下导航,无需事先构建地磁图。Zhou等^[13]提出一种基于差分进化算法的仿生导航算法,通过改进进化策略的突变机制,在种群中获得更好的个体。由于进化算法不使用种群中其他个体中包含的信息,随机生成新个体,这使得导航轨迹随机性大、导航过程耗时长,搜索效率低下。为此,本文提出一种圆弧状路径搜索的地磁感知导航定向方法,在无先验信息的条件下,将导航过程归纳为地磁多参量目标的搜索问题,通过圆弧状路径感知地磁信息变化并与自适应搜索步长相结合,完成导航任务。

本文方法首先建立载体地磁感知导航模型,将载体导航问题转换成多地磁参量收敛问题;然后,通过圆弧状路径搜索算法对路径上目标函数值变化大小进行比较,寻找目标函数变化最大的航向角即朝向目标点的方向角;同时,根据目标函数的大小,载体自适应调整搜索间隔,在较短的时间内完成航向角的搜索,从而实现自主无人潜航器的导航任务。

1 问题描述

1.1 地磁参量

地球磁场是一个包含多个分量的混合场,其中,地磁参量是描述某点地磁场大小和方向的物理量。在地球任意一位置的磁场均可以用一组地磁参量来描述:

$$\mathbf{B} = (B_1, B_2, \dots, B_j) \quad (1)$$

目前常用的地磁分量要素共有7个,其位置关系如图1所示。其中,地磁场正北分量为 B_x 、地磁场正东分量为 B_y 、地磁场垂直分量为 B_z 、地磁场总强度为 B_F 、水平磁场强度为 B_H 、地磁偏角为 B_D 、地

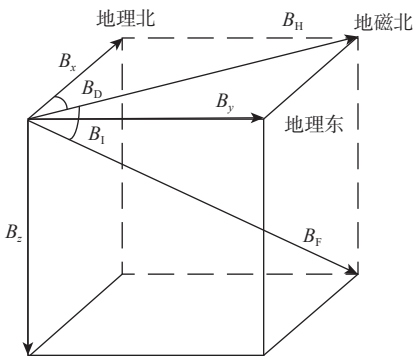


图1 地磁参量图

Fig. 1 Geomagnetic parameters map

磁倾角为 B_1 。

1.2 AUV 运动模型

在AUV导航过程中,可忽略海拔对磁参量的影响,因此,可建立坐标系将AUV地磁感知导航运动模型化为二维平面的导航问题,其运动方程可以表示为

$$\begin{cases} x_{N+1} = x_N + v \cos \theta_N \\ y_{N+1} = y_N + v \sin \theta_N \\ \theta_{N+1} = \theta_N + \Delta \theta_N \end{cases} \quad (2)$$

式中: N 为时间信息; θ_N 为 N 时刻的航向角大小; x_N 为 N 时刻时的经度大小; y_N 为 N 时刻时的纬度大小; $\Delta \theta_N$ 为偏转角的大小; v 为速度。

1.3 地磁感知导航目标函数建立

AUV的航行过程中,已知目标点地磁参量的情况下,通过磁传感器实时测量所在位置的地磁参量,把航行过程转化为一组地磁参量中第 i 个地磁参量 B_i ,由初始点地磁参量 B_i^0 向目标点 T 地磁参量 B_i^T 逐渐收敛的过程为

$$f(B_i) = (B_i^N - B_i^T)^2 \quad (3)$$

式中: B_i^N 为 N 时刻第 i 个地磁参量的值; B_i^T 为第 i 个地磁参量目标点 T 的值; $f(B_i)$ 为在 N 时刻第 i 个地磁参量的目标函数。应用到多个地磁参量,每个地磁参量都收敛至目标点 T 地磁参量值,各个地磁参量的目标函数 $f(B_i)$ 之和趋于0,即可认为到达目标点 T ,即

$$\lim_{N \rightarrow \infty} \sum_{i=0}^j f(B_i^N) = 0 \quad (4)$$

因此,AUV导航的过程可以描述为一个多目标优化问题:

$$\begin{cases} \min F(B, N) = (f_1, f_2, \dots, f_j) \\ \text{s.t. } f_i(S^N, B_i^N, B_i^T) \end{cases} \quad (5)$$

式中: f_i 为约束条件; S^N 为 N 时刻的路径。由于不同的地磁参数纲量不同,因此,需要对各个地磁参量进行归一化处理,多参量的目标函数可以定义为

$$F(B_i^N) = \sum_{i=1}^j \frac{(B_i^N - B_i^T)^2}{(B_i^0 - B_i^T)^2} \quad (6)$$

当AUV接近目标点时,式(6)中的分子逐渐减小, $F(B^N)$ 也随之减小,此时测量的地磁参量值无限接近目标点 T 的地磁参量,可描述为

$$|F(B^N)| < \varepsilon \quad (7)$$

式中: ε 为一个无限趋于0的极小值,表示目标函数无限接近于目标值,即可认为到达目标点,在仿真中, ε 的大小决定了导航的精确度, ε 值越小导航精

准确度越高。

在相同步长的情况下,将上一时刻 $N-1$ 的目标函数值与该时刻 N 的目标函数值做差,从而来评判每步的航向角的好坏,可描述为

$$f(N) = F(B^{N-1}) - F(B^N) \quad (8)$$

若 AUV 向目标点方向移动单位步长,则 $f(N)$ 为正值,路径越优, $f(N)$ 值越大;若 AUV 向目标点反方向移动单位步长则为负值。

2 求解方法

2.1 搜索算法

本文方法是一种利用地理磁参量信息进行水下环境感知与交互的地磁感知导航方法。在载体导航过程中,各点地磁参量数值不同目标函数值也不同,因此,每航行一定间隔步长需要重新搜索最佳的航向角以保证载体没有偏航。为寻找使目标函数收敛的航向角,通过载体上安装的地磁传感器实时感知圆弧轨迹上每点的地磁参量,向目标函数减小最大的方向前进使目标函数逐渐收敛,从而引导载体完成导航任务。导航过程示意图如图 2 所示。

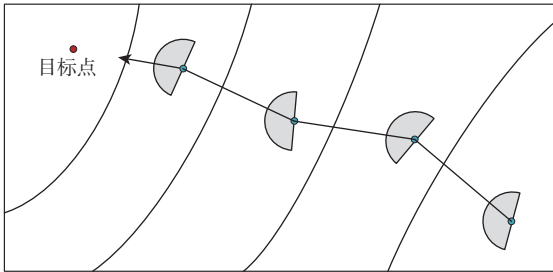


图 2 导航过程示意图

Fig. 2 Schematic diagram of navigation process

本文圆弧状搜索算法具体步骤如下:

步骤 1 初始化。给定起始点地磁参量 B^0 和目标点地磁参量 B^T , 设置载体步长、搜索的方向角, 其中, 每步搜索的偏转角大小为

$$\begin{cases} \Delta\theta_1 = \Delta\theta_2 = \dots = \Delta\theta_j \\ \pi = \sum_{i=1}^j \Delta\theta_i \end{cases} \quad (9)$$

步骤 2 进入圆弧状轨迹。记录圆心处目标函数值 $F_0(B^N)$ 。

步骤 3 沿圆弧轨迹前进单位步长。记录新位置的偏转角 $\Delta\theta_i$, 通过地磁传感器测得该点的地磁参量, 计算目标函数 $F(B_i^N)$ 。

步骤 4 判断该点目标函数是否为极小值点。将该点与圆心处目标函数求差, 即

$$f(N) = F(B_0^N) - F(B_i^N) \quad (10)$$

比较半圆弧上各点目标函数 $F(B_i^N)$ ($i = 1, 2, \dots, j$) 与圆心处目标函数 $F(B_0^N)$ 的差值大小, 寻找目标函数下降最大的位置即 $f(N)_{\max}$ 。若是极小值点则进行步骤 5, 反之重复步骤 3, 搜索过程如图 3 所示。

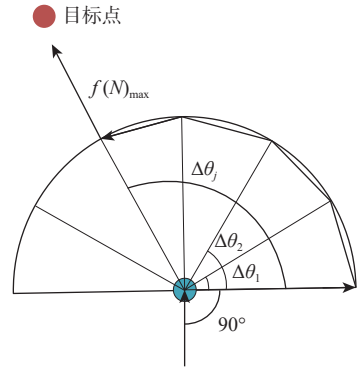


图 3 搜索过程示意图

Fig. 3 Schematic diagram of search process

步骤 5 移动到极小值点位置。以该位置航向角 $\theta_{N+1} = \theta_N + \Delta\theta_j$ 方向前进 α 个步长。

步骤 6 结束搜索。

2.2 自适应搜索间隔

在 AUV 导航的过程即当前地磁参量逐渐趋于目标点地磁参量的过程, 也就是目标函数 $\lim_{N \rightarrow \infty} F(B^N)$ 逐渐趋于 0 的过程, 如图 4 所示, 其中, 数字表示磁场强度, nT。

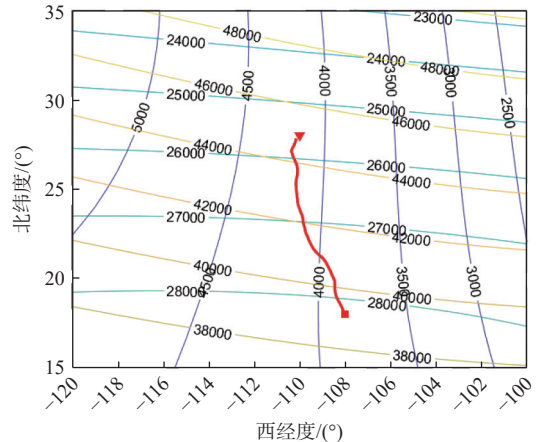


图 4 地磁感知导航过程示意图

Fig. 4 Schematic figure of geomagnetic perception navigation process

图中, 用“■”表示载体的起始点, “▲”表示载体目标地点。在起始点时 $F(B^N)$ 的值为 1, 随着 AUV 逐渐接近目标点, 目标函数 $F(B^N)$ 的值逐渐减小并且趋于 0。通过目标函数的大小可以直观地反映出载体与目标点的距离关系。因此, 可根据目标函数的大小在载体导航过程中自适应的调整合理的搜索间隔。

开始阶段 $F(B^N) \in (\xi_2, 1]$, AUV 需要快速地确定目标点方向的航向角, 需要较高频次的搜索, 因此, 可将每次搜索之间的迭代步数设置为较小的 α_1 。在 AUV 脱离开始阶段时即 $F(B^N) \in (\xi_1, \xi_2]$, 此时可设置较大的搜索间隔以减少搜索次数加快算法的收敛, 因此, 可将每次搜索之间的迭代次数设置为较大的 α_2 。在 AUV 即将抵达目标点时即 $F(B^N) \in (0, \xi_1]$, 较大的搜索间隔容易出现错过目标点、围绕目标点振荡甚至背离目标点等情况, 因此, 应该将搜索间隔设置为较小的 α_3 。导航过程流程图如图 5 所示。

$B_x^T=25\ 066\ \text{nT}$ 、 $B_y^T=4\ 704\ \text{nT}$ 、 $B_z^T=45\ 544\ \text{nT}$ 。

在自适应搜索导航方法中, 不同阶段的搜索间隔对算法的性能有着重要的影响。为选择合适的参数, 在相同的实验条件下进行 9 组独立实验各 100 次, 取平均值来比较本文方法在不同参数设置下的性能如表 1 所示。

表 1 实验结果

Table 1 Experimental results

α_1	α_2	α_3	平均步数
5	33	10	429
5	35	10	433
5	30	10	435
10	33	10	426
12	33	10	425
15	33	10	428
12	33	20	412
12	33	22	410
12	33	25	432

由表 1 可知, 若 α_1 较小则会导致在开始搜索阶段时搜索频率过大导致导航过程迭代次数增加。若 α_2 较小则会使载体在巡航阶段搜索间隔较小, 增加搜索频率。若 α_3 较大则会导致载体错过目标点。因此, 综合考虑将参数设置为 $\alpha_1=12$, $\alpha_2=33$, $\alpha_3=22$ 。在这种情况下, 本文方法能实现较好的性能, 其他实验参数设置如表 2 所示, 其中, ξ_1 、 ξ_2 、 v 为系数。

表 2 实验参数

Table 2 Material parameters of experimental article

ε	ξ_1	ξ_2	j	v	α_1	α_2	α_3
0.001	0.1	0.95	6	0.05	12	33	22

3.2 收敛性分析

为验证本文方法的优越性, 在无先验磁图的情况下, 将本文方法与模拟退火 (simulated annealing, SA) 算法^[15]、Hexpath 算法^[15] 与进化算法 (evolutionary algorithms, EA)^[15] 进行比较, 同时将各算法设置为相同步长。在相同地磁场模型下, 设置相同的起始点与目标点进行 100 次仿真实验, 取最优路径进行比较。4 种算法导航路径如图 6 所示, 目标函数收敛情况如图 7 所示, 所选相关性较小的 3 个地磁分量收敛情况如图 8 所示。

从图 7 和图 8 可以看出, 在设定的区域范围内, 各算法均能收敛至目标值。其中, 本文方法到达目的地的迭代次数最小, 收敛速度最快; 其次为 hexpath 算法、SA 算法与 EA。其中, EA 与本文方法的各参量收敛状态较为一致; Hexpath 算法受初始方向角选取的影响较大, 但正东分量的收敛情况表

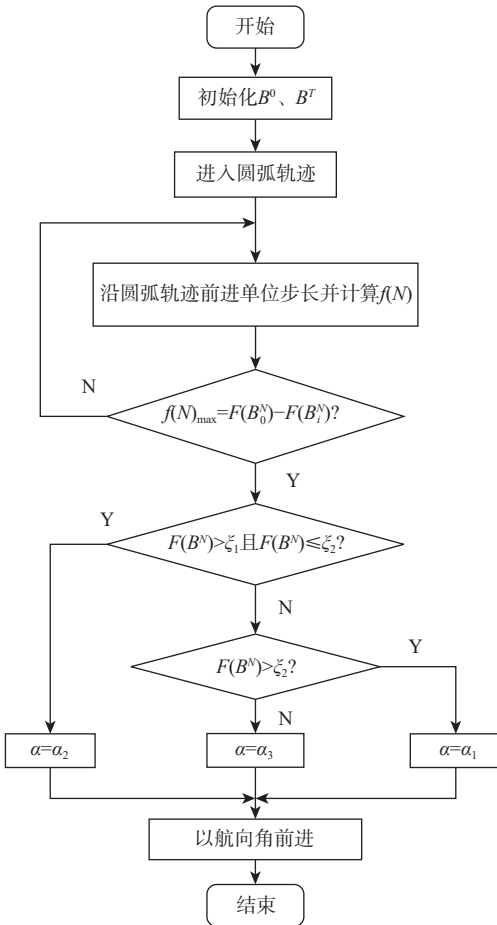


图 5 本文方法流程图

Fig. 5 Flowchart of the proposed method

3 仿真实验

3.1 参数设置

为验证本文方法的可行性, 通过国际地磁模型 (international geomagnetic reference field, IGRF) 模拟载体在航行中实时测得的地磁参量。在载体航行过程中, 从地磁参量中选取相关性^[14] 较小的 3 个地磁分量 (B_x, B_y, B_z) 用作导航。在仿真实验中, 用“■”表示载体的起始点, “▲”表示载体目标地点。设定初始地点的地磁参量 $B_x^0=27\ 971\ \text{nT}$ 、 $B_y^0=2\ 993\ \text{nT}$ 、 $B_z^0=39\ 627\ \text{nT}$ 。目标点 T 的地磁参量

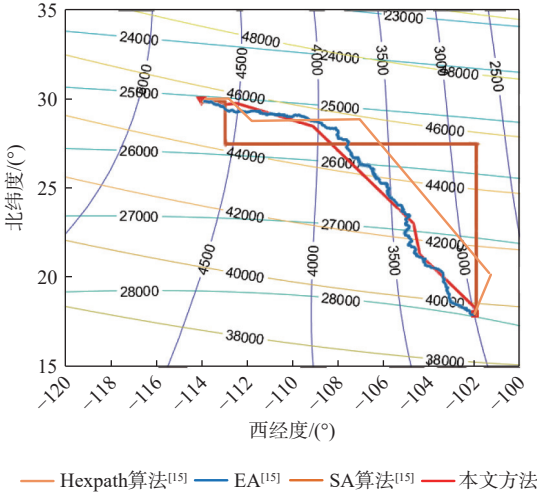


图6 4种不同算法路径
Fig. 6 Four different algorithms path

现为先发散再收敛; SA算法在局部搜索中耗时较长, 导致收敛速度较慢; EA由于方向选择具有随机性, 所以路径较为曲折, 导致迭代步数较大。

3.3 鲁棒性分析

为验证水下机器人在复杂海底环境下遇到沉船、地下矿藏等地磁异常情况和地磁传感器测量观测系统不稳定产生的噪声等干扰对本文方法的成功率和收敛速度等性能指标的影响, 对各地磁参量

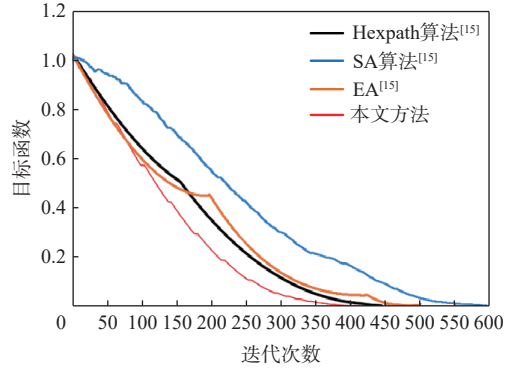


图7 目标函数收敛图

Fig. 7 Convergence figure of objective function

叠加不同强度高斯噪声, 即

$$B_j = A\zeta(t) + \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (11)$$

式中: A 为地磁异常强度; $\zeta(t)$ 为值为0与1的函数; σ 为噪声的标准差; μ 为噪声的时间偏移。一般情况下水下磁异常值在1~5 nT之间, 在相同地磁场模型和起始点与目标点的情况下, 设置50次独立实验, 验证本文方法在水下地磁干扰情况下的导航性能。

如图9所示, 本文方法在磁异常强度为0~2 nT下仍能达到99%成功率, 随着地磁异常强度增加, 本文方法成功率有下降趋势, 总体成功率在92%以

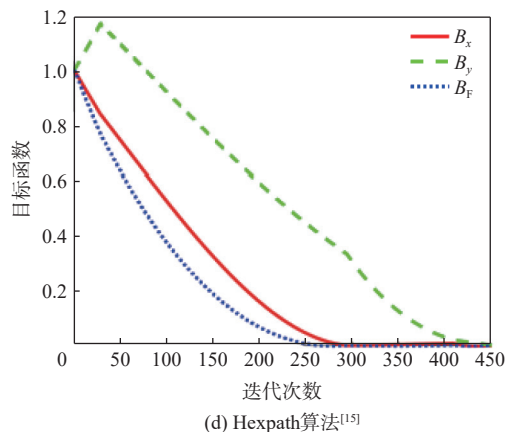
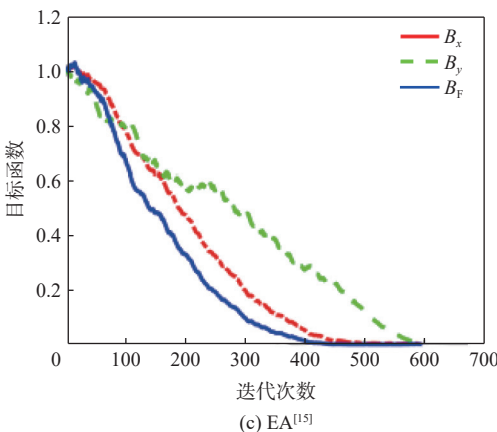
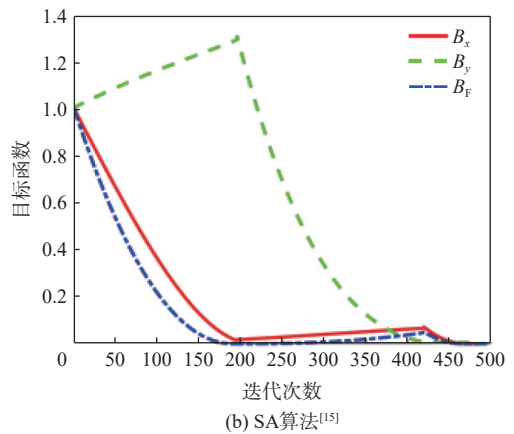
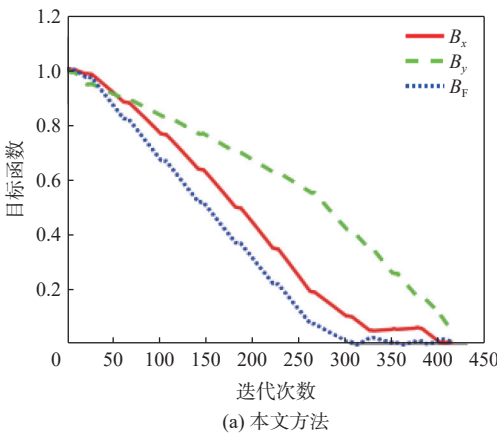


图8 不同算法各分量收敛情况

Fig. 8 Convergence of each component of different algorithms

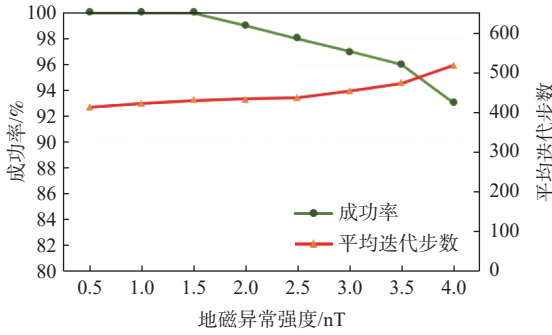


图 9 本文方法的成功率与平均迭代数

Fig. 9 Success rate and average iterations number of the proposed method

上。在 4 nT 较强地磁异常情况下, 相较于理想情况下平均迭代步数仅有小幅度增长。

为验证本文方法在导航路径上遇到大规模地磁异常区域时的导航效果, 在原有 IGRF 国际地磁场模型的基础上对比较容易受到太阳风暴等干扰的水平分量上叠加多峰函数, 模拟地磁场受到干扰。载体导航轨迹如图 10 所示, 三地磁分量收敛图如图 11 所示。

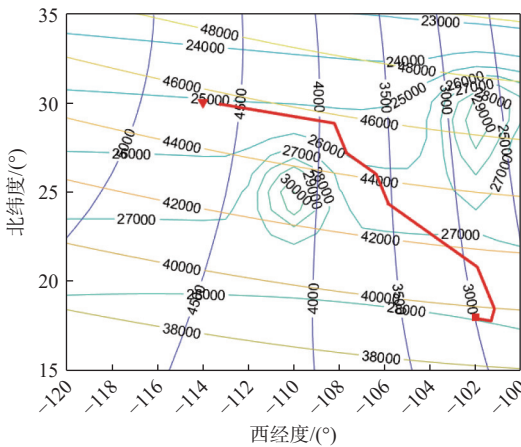


图 10 本文方法路径

Fig. 10 The proposed method path

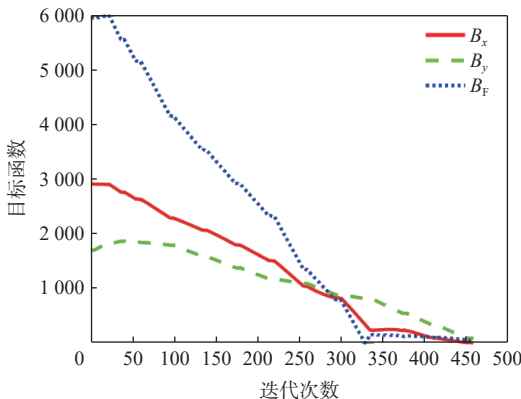


图 11 本文方法地磁分量收敛图

Fig. 11 Convergence figure of geomagnetic components of the proposed method

4 结 论

1) 本文提出一种圆弧状搜索算法的导航定向方法。在不依赖先验信息的情况下, 仅通过地磁传感器感知地磁信息, 从而实现导航任务。同时, 本文方法自适应调整运动步长, 实现较快速收敛至目标点。

2) 在无先验地磁图的情况下, 通过与六边形路径算法、遗传算法、模拟退火算法等进行仿真实验对比, 本文方法能够在较短的步数内到达目标点, 表现出良好的导航效率。

3) 通过仿真实验模拟不同强度的系统噪声及地磁场干扰, 验证了本文方法在 4 nT 地磁干扰强度情况下仍有 92% 的成功率, 表现出良好的鲁棒性。

参考文献 (References)

[1] 宋保维, 潘光, 张立川, 等. 自主水下航行器发展趋势及关键技术 [J]. 中国舰船研究, 2022, 17(5): 27-44.
SONG B W, PAN G, ZHANG L C, et al. Development trend and key technologies of autonomous underwater vehicles[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2022, 17(5): 27-44(in Chinese).

[2] 万晓云, 吴云龙, 郭恒洋, 等. 基于重力场产品的水下匹配导航发展现状及影响因素分析[J]. 武汉大学学报 (信息科学版), 2023, 48(6): 879-890.
WAN X Y, WU Y L, GUO H Y, et al. Development status and influencing factor analysis of underwater matching navigation based on gravity field products[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2023, 48(6): 879-890(in Chinese).

[3] 张涛, 夏茂栋, 张佳宇, 等. 水下导航定位技术综述[J]. 全球定位系统, 2022, 47(4): 1-16.
ZHANG T, XIA M D, ZHANG J Y, et al. Review of underwater navigation and positioning technology[J]. GNSS World of China, 2022, 47(4): 1-16(in Chinese).

[4] 张小跃, 杨功流, 张春熹. 捷联惯导/里程计组合导航方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2013, 39(7): 922-926.
ZHANG X Y, YANG G L, ZHANG C X. Integrated navigation method for SINS and odometer[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2013, 39(7): 922-926(in Chinese).

[5] 赵曦, 赵建虎. 水下地形匹配导航现状及发展趋势[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2023, 44(11): 1927-1936.
ZHAO X, ZHAO J H. Current progress and development trend of underwater terrain-matching navigation[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2023, 44(11): 1927-1936(in Chinese).

[6] 马腾, 李晔, 赵玉新, 等. AUV 的图优化海底地形同步定位与建图方法[J]. 导航定位与授时, 2020, 7(2): 42-49.
MA T, LI Y, ZHAO Y X, et al. AUV bathymetric simultaneous localization and mapping based on graph optimization method[J]. Navigation Positioning and Timing, 2020, 7(2): 42-49(in Chinese).

[7] 李明, 何继玮, 王一蕾, 等. 基于重力场数据的水下无源导航 [C]//第三届无人系统高峰论坛论文集. 南京: [s. n.], 2023: 1-7.
LI M, HE J W, WANG Y L, et al. Underwater passive navigation based on gravity field data[C]//Proceedings of the 3rd Unmanned

- Systems Summit Forum. Nanjing: [s. n.], 2023: 1-7(in Chinese).
- [8] BOBROV D S. Development of methods and means for creating navigational gravity maps[D]. Mendeleev: All-russian Scientific Research Institute of Physical-Technical and Radio Engineering Measurements, 2020.
- [9] WANG W X, LI S X, GUO C. Particle swarm optimization in geomagnetic matching navigation[C]//Proceedings of the International Conference on Computers, Information Processing and Advanced Education. Piscataway: IEEE Press, 2022: 450-453.
- [10] PANG Y, ZHOU Z, PAN X, et al. An INS/geomagnetic integrated navigation method for coarse estimation of positioning error and search area adaption applied to high-speed aircraft[J]. IEEE Sensors Journal, 2023, 23(7): 7766-7775.
- [11] QUINTAS J, CRUZ J, PASCOAL A, et al. A comparison of nonlinear filters for underwater geomagnetic navigation[C]//Proceedings of the IEEE/OES Autonomous Underwater Vehicles Symposium. Piscataway: IEEE Press, 2020: 1-6.
- [12] ZHANG Y D, LIU X F, LUO M Z, et al. Bio-inspired approach for long-range underwater navigation using model predictive control[J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2021, 51(8): 4286-4297.
- [13] ZHOU Y Q, NIU Y, LIU M Y. Bionic geomagnetic navigation method for AUV based on differential evolution algorithm[C]//Proceedings of the OCEANS 2022, Hampton Roads. Piscataway: IEEE Press, 2022: 1-5.
- [14] LI H, QU J S, JIANG X K, et al. A correlation analysis of geomagnetic field characteristics in geomagnetic perceiving navigation[J]. Frontiers in Neurobotics, 2021, 15: 785563.
- [15] 李红. 基于优化搜索的地磁仿生导航及其在 AUV 中的应用研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2018.
- LI H. Geomagnetic bionic navigation based on optimized search and its application in AUV[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2018(in Chinese).

Geomagnetic perception navigation orientation method based on adaptive circular path search

LI Hong^{*}, LIU Hengyu, XU Chenyan

(School of Automation, Xi'an University of Posts and Telecommunications, Xi'an 710121, China)

Abstract: In both military defense and ocean exploration, autonomous underwater vehicle (AUV) are crucial. To address the navigation issue of underwater autonomous unmanned submersibles in the absence of prior information, a geo-sensory navigation orientation method based on circular arc path search is proposed. By initially creating a geo-sensory navigation model for the car, this technique turns navigation into a multi-objective optimization problem. Secondly, the vehicle follows a circular arc path and perceives the variation trend of the objective function in the path space to determine the target direction. Furthermore, the method achieves the navigation orientation job of autonomous unmanned submersibles by adaptively choosing alternative search intervals to accommodate varied search stages. It is shown through simulated studies that this approach can make it possible for underwater autonomous unmanned submersibles to arrive at the predefined destination area without the need for previous magnetic field maps. By comparing with other search algorithms, the validity and efficiency of the proposed algorithm are validated.

Keywords: autonomous navigation; geomagnetic navigation; multiobjective optimization; autonomous underwater vehicles; magnetotaxis

Received: 2024-01-08; **Accepted:** 2024-04-09; **Published Online:** 2024-04-22 19:11

URL: link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20240419.1038.002

Foundation items: Natural Science Basic Research Program of Shaanxi Provincial Department of Science and Technology (2024JC-YBMS-549); Xi'an key laboratory of advanced control and intelligent process (2019220714SYSO22CG04); Key Industrial Chain Projects of Shaanxi Province (2021ZDLGY04-04); Key Research and Development Projects of Shaanxi Province (2022NY-087); Shaanxi Provincial Federation of Social Sciences/Shaanxi Provincial Department of Emergency Management Project (2021HZ1121); Supported by Graduate Innovation Fund of Xi'an University of Posts and Telecommunications (CXJZL2023033)

*** Corresponding author.** E-mail: lihong@xupt.edu.cn