

# 基于地磁特征提取的搜索导航研究

郭娇娇, 杨宾锋, 纪晓琳, 曹海霞, 郭宁宁

(空军工程大学信息与导航学院, 西安, 710077)

**摘要** 现有地磁导航研究所采用的导航参量大多是基于原始地磁参量, 地磁参量的选取会影响导航的效率, 在选择导航参量过程中存在人为性。针对这一问题, 提出一种基于地磁特征提取的搜索导航方法, 利用主成分分析的方法提取出能较为全面地描述该位置磁场信息的地磁特征作为新的导航参量, 结合现有的进化搜索策略和梯度下降法, 充分利用提取出的地磁特征作为新的导航参量, 引导载体不断向目标趋近, 实现导航目的。实验结果表明: 基于原始地磁参量的传统搜索导航方法目标函数迭代步数为 647, 基于提取主成分特征的搜索导航方法目标函数迭代步数为 564, 而文中提出的基于主成分特征的进化梯度导航方法迭代步数为 238, 迭代步数明显下降, 导航效率提高, 并且子目标函数收敛的一致性也更好, 能较好地利用原有磁场信息, 在自主远程导航中具有很好的应用前景。

**关键词** 地磁导航; 特征提取; 主成分分析; 进化梯度搜索

**DOI** 10.3969/j.issn.2097-1915.2025.04.009

**中图分类号** TN96 **文献标志码** A **文章编号** 2097-1915(2025)04-0075-07

## Research on Search Navigation Extraction from Geomagnetic Feature

GUO Jiaojiao, YANG Binfeng, JI Xiaolin, CAO Haixia, GUO Ningning

(Information and Navigation School, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

**Abstract** The navigation parameters used in existing geomagnetic navigation research are most of original geomagnetic parameters-based. The selection of geomagnetic parameters may affect the efficiency of navigation, and there is man-man error in the process of selecting navigation parameters. For the above-mentioned reasons, a search navigation method is proposed based on the geomagnetic feature extraction. The extracted geomagnetic features able to comprehensively describe the magnetic field information of the location are taken as new navigation parameters by the principal component analysis method. In combination with the existing evolutionary search strategies and gradient descent methods, the extracted geomagnetic features are fully utilized for taking as new navigation parameters to guide the carrier to continuously approach the target and achieve navigation objectives. The experimental results show that the traditional search navigation method based on the original geomagnetic parameters has an iteration step of 647 for the objective function, while the search navigation method based on extracting principal component features has an iteration step of 564 for the objective function. However, the evolutionary gradient navigation method based on principal component features proposed in this paper has an iteration step of 238, signifi-

收稿日期: 2024-02-29

基金项目: 国家自然科学基金(42404082)

作者简介: 郭娇娇(1993—), 女, 陕西延安人, 讲师, 硕士, 研究方向为磁导航。E-mail: 18829354306@163.com

通信作者: 纪晓琳(1986—), 女, 河北衡水人, 副教授, 博士, 研究方向为磁导航。E-mail: jixl@chd.edu.cn

**引用格式:** 郭娇娇, 杨宾锋, 纪晓琳, 等. 基于地磁特征提取的搜索导航研究[J]. 空军工程大学学报, 2025, 26(4): 75-81. GUO Jiaojiao, YANG Binfeng, JI Xiaolin, et al. Research on Search Navigation Extraction from Geomagnetic Feature[J]. Journal of Air Force Engineering University, 2025, 26(4): 75-81.

cantly reducing the iteration step number, improving navigation efficiency and the consistency of sub objective function convergence. The original magnetic field information is utilized further in autonomous remote navigation, and there are good prospects.

**Key words** geomagnetic navigation; feature extraction; principal component analysis; evolutionary gradient search

随着移动机器人、无人机以及水下航行器等无人系统的迅速发展,满足长时间、高精度、隐蔽性好等要求的远程自主导航技术的日益重要<sup>[1-2]</sup>。地磁场是地球的固有资源,包含着大量的信息资源可以用于导航。地磁导航技术的无源隐蔽、全地域、全天候以及无累积误差等优点<sup>[3-4]</sup>,使其成为国内外研究的热点。

目前,地磁导航以基于磁图信息的匹配导航方法为主,利用先验地磁图与实测地磁数据进行匹配,从而获取载体位置,例如文献[5~6]的自主水下航行器(autonomous underwater vehicle, AUV)地磁辅助导航系统和车载地磁匹配导航系统等。文献[7]详细介绍了目前主流的地磁滤波、地磁匹配和地磁 SLAM(simultaneous localization and mapping)的原理和技术路线,地磁滤波和地磁匹配需要事先建立精确的地磁图,地磁 SLAM 是在载体运动的过程中实施构建。但是受地磁场时变特性、某些区域地磁特征不明显以及地磁等高线等因素影响,实时的高精度的先验地磁图很难准确获取,会影响地磁匹配导航精度。为了弥补缺乏先验地磁图的不足,文献[8~10]借鉴自然界中生物利用地磁场趋势完成方位运动的现象,提出了基于磁趋势性进行导航的多目标搜索算法。该方法以终点地磁参量为目标值,利用地磁趋势引导载体向目标位置靠近,进而完成导航任务。

目前地磁搜索导航在理论上取得了显著的成果,但是在实际应用中存在不足:导航参量的选取受主观因素影响,而各个导航参量之间又不完全独立,有些导航参量可以由其余导航参量计算得到,比如磁场总强可由地磁北向分量、东向分量、垂直分量得到,如果选取的导航参量相关,则会造成重复利用地磁场信息,增加算法解算的复杂度,导航效率较低。文献[11]利用地磁场特征的标准差、粗糙度及地磁熵等指标,结合主成分分析法消除了存在相关性的特征指标,确定了匹配导航区域。文献[12]针对地磁矢量图的适配性问题,提出了一种基于机器学习的地磁矢量图适配性分析方法。从特征选择和参数优化角度出发,将主成分分析法与神经网络结合,将导航区域进行特征选择,一定程度上实现了地磁适配/非适配区域的划分。文献[13]提出了一种基于

并行卷积神经网络的地磁方向适配性方法,该方法可以解决人工提取特征和计算复杂等不足,自动完成地磁方向适配性的分析。但是以上方法提取的地磁特征大都是为了进行地磁导航区域的适配性分析,即判断该区域是否适合用地磁场信息完成匹配导航任务,并未对地磁导航过程进行深入研究。

本文针对以原始地磁数据作为导航参量导致搜索效率低、导航精度差的问题,提出基于主成分分析的方法完成对地磁场的特征提取,并以地磁主成分特征作为新的导航参量,将进化搜索策略和梯度下降法应用于搜索导航过程,从而引导载体不断趋向目标位置的磁场区域,完成导航任务。

## 1 地磁导航问题描述

地磁场是包含多个参量的混合场,近地空间的任何一个位置都可以由该处的地磁参量来描述。 $k$ 时刻载体所处位置的地磁环境为:

$$B^k = \{B_1^k, B_2^k, \dots, B_i^k, \dots, B_n^k\}, i=1, 2, \dots, n \quad (1)$$

式中: $B_i^k$ 为载体所处位置的第 $i$ 个地磁参量; $n$ 为磁场参量的维度,目前所认知的地磁参量为7个(地磁北向分量、东向分量、垂直分量、磁倾角、磁偏角、磁场水平场强和磁场总场强)<sup>[14]</sup>,因此 $n \leq 7$ 。

借鉴生物对地磁趋势敏感的现象,当地磁场参量分布规律未知时,将地磁导航问题归结为地磁多参量向目标位置的地磁值收敛的搜索运动,数学模型可以描述为:

$$\begin{aligned} \min F(B^k) &= (f_1(B_1^k), f_2(B_2^k), \dots, f_n(B_n^k)) \\ \text{s. t. } g_i(S^k, B_i^k, B_i^1), i &= 1, 2, \dots, n \end{aligned} \quad (2)$$

式中: $F(B^k)$ 为地磁多参量的目标函数; $f_i(B_i^k)$ 为第 $i$ 个磁参量的子目标函数,描述当前时刻地磁参量 $B_i^k$ 与目标位置地磁参量 $B_i^1$ 的差异; $g_i$ 为约束条件; $S^k$ 为 $k-1 \sim k$ 时刻载体的导航路径。

通过相邻时刻目标函数的差值递减表示引导载体逐渐接近目标位置,表达式为:

$$|F(B^k) - F(B^{k-1})| < \epsilon \quad (3)$$

当多个地磁参量同时收敛到目标位置的地磁参量时,各个磁参量的目标函数同时趋近于0,可表示为:

$$\lim_{k \rightarrow \infty} f_i(B_i^k) \rightarrow 0 \quad (4)$$

综上,地磁搜索导航的过程可以描述为:载体在运动过程中,借助地磁场趋势,通过当前位置的地磁参量与目标位置的地磁参量间的变化量作为反馈,使载体能实时调整其运动方向,最终逐渐接近目标位置,完成导航任务。

## 2 基于主成分分析的地磁导航方法

### 2.1 主成分分析法提取磁特征

在地磁导航过程中,导航参数的选取是导航效率的关键性因素。一般而言,地磁特征参量选取的种类越多,对该位置的地磁信息统计越全面,但是不同的地磁参量会呈现出相关的特征信息,从而增加了参数的解算难度,降低了导航效率。

针对上述问题,本文将机器学习中的主成分分析法(principal component analysis, PCA)应用于地磁导航中。主成分提取磁特征的具体流程如下:

1)采集当前区域7种地磁参量数据的 $n$ 个样本,得到原始地磁参量的观测数据矩阵,记为:

$$\mathbf{B} = (B_1, B_2, \dots, B_7) = [b_{ij}]_{n \times 7}, i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, 7 \quad (5)$$

2)为了消除7种地磁参量之间量纲和单位不一致的影响<sup>[15]</sup>,将原始地磁参量数据矩阵进行标准化预处理,得到平均值为0、标准差为1的数据参量 $z_{ij}$ 、均值 $\mu_j$ 和均方差 $\sigma_j$ 分别为:

$$\begin{cases} \mu_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n b_{ij} \\ \sigma_j = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (b_{ij} - \mu_j)^2} \end{cases} \Rightarrow z_{ij} = \frac{b_{ij} - \mu_j}{\sigma_j} \quad (6)$$

经过标准化预处理后的参量矩阵可以表示为:

$$\mathbf{Z} = [z_{ij}]_{n \times 7} \quad (7)$$

3)计算标准处理后的参量相关系数矩阵 $\mathbf{R}$ 为:

$$\mathbf{R} = [r_{kj}]_{7 \times 7} \quad (8)$$

式中: $r_{kj} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |z_{ik} z_{ij}|$ 。

4)计算相关系数矩阵 $\mathbf{R}$ 的特征值 $\lambda_g$ 和对应点特征向量 $\mathbf{L}_g$ ,进而求出每个主成分表征原始地磁参量的贡献率 $\alpha_g$ ,即:

$$\alpha_g = \lambda_g / \sum_{g=1}^7 \lambda_g \quad (9)$$

5)在原始信息可以充分表征的前提下,为了减少计算量,通过式(10)确定主成分个数 $k$ :

$$\alpha(k) = \sum_{g=1}^k \alpha_g = \sum_{g=1}^k (\lambda_g / \sum_{g=1}^7 \lambda_g) \geq x\% \quad (10)$$

式中: $x\%$ 为主成分选取的阈值准则,即要求前 $k$ 个主成分的累计贡献率 $\alpha(k) \geq x\%$ 。一般情况下,阈

值取90%~95%便能保证表征的信息较为充分<sup>[15]</sup>。

6)通过 $\mathbf{T} = \mathbf{L}\mathbf{B}$ 计算前 $k$ 个主成分表达式:

$$\begin{cases} T_1 = l_{11}B_1 + l_{12}B_2 + \dots + l_{17}B_7 \\ T_2 = l_{21}B_1 + l_{22}B_2 + \dots + l_{27}B_7 \\ \vdots \\ T_k = l_{k1}B_1 + l_{k2}B_2 + \dots + l_{k7}B_7 \end{cases} \quad (11)$$

式中: $\mathbf{L}$ 为前 $k$ 个主成分对应的特征向量组成的矩阵; $\mathbf{T}$ 为所提取的地磁主成分特征。

本节利用主成分分析法将原始地磁参量进行特征提取,消除了原有地磁参量之间的相关性,降低了数据维度。

### 2.2 基于地磁特征提取的搜索导航方法

传统的基于进化算法的地磁导航是一种试错的搜索导航方法,导航耗时长且效率低。本文在实时提取地磁主成分参量的基础上,将进化策略与梯度下降法应用于地磁导航过程,使得载体能够利用地磁趋势更高效、快速地完成导航任务。

基于地磁特征提取的搜索导航方法具体步骤如下:

**步骤1** 地磁参数初始化和航向信息初始化。

地磁参数初始化:利用2.1节中的PCA算法提取起始位置和目标位置的地磁主成分特征,分别记为 $B(x_0, y_0)$ 和 $B(x_t, y_t)$ 。航向信息初始化:导航搜索过程中,对航向角离散采样,其集合表示为:

$$\theta = \{\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_m\} M = \lfloor 2\pi/D_\theta \rfloor \quad (12)$$

式中: $D_\theta$ 为采样间隔。

**步骤2** 导航搜索。在航向角集合中随机选取 $\theta$ ,载体按照设定步长开始运动,同时利用地磁传感器测量地磁数值并进行特征提取,得到当前位置 $(x_k, y_k)$ 的地磁主成分特征 $B(x_{ik}, y_{ik}) (i \in [1, m])$ 。

**步骤3** 判别航向。利用提取的地磁主成分,根据式(2)建立的数学模型,计算各 $\theta_i$ 方向上对应的目标函数为:

$$F(x_{ik}, y_{ik}) = \frac{[B(x_{ik}, y_{ik}) - B(x_t, y_t)]^2}{[B(x_0, y_0) - B(x_t, y_t)]^2} \quad (13)$$

式中: $\{F(x_{1k}, y_{1k}), x_{2k}, y_{2k}), \dots, F(x_{mk}, y_{mk})\}$ 为 $\{\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_m\}$ 对应的目标函数。

借鉴梯度下降法,依靠地磁的趋势性,载体朝着目标函数最小的方向运动时,可以最快地接近目标位置的地磁特征。即将式(13)中最小值对应的角度 $\theta_k$ 作为下一时刻载体的航向角 $\theta_{k+1}$ 。

**步骤4** 评估判决。在二维平面内,将载体视为质点,由式(14)引导载体运动至下一位置 $(x_{k+1}, y_{k+1})$ :

$$\begin{cases} x_{k+1} = x_k + l \cos(\theta_{k+1}) \\ y_{k+1} = y_k + l \sin(\theta_{k+1}) \end{cases} \quad (14)$$

式中:  $l$  为设定的运动步长。

判断当前位置的目标函数  $F_{k+1}$  是否满足:

$$F_{k+1} < \epsilon, \epsilon \rightarrow 0 \tag{15}$$

若满足式(15)条件,表明当前位置的地磁主成分特征接近目标点的地磁特征,说明载体到达目标位置。若不满足,则判断  $F_{k+1}$  是否小于  $F_k$ ,若是,说明该航向符合磁趋势,载体继续沿着该方向运动,若否,返回步骤 2 更新航向角,直至满足式(15)的收敛条件,导航任务完成。

3 实验验证及分析

3.1 主成分分析法提取地磁特征验证

为了验证 2.1 节提出的基于主成分分析法提取地磁特征的有效性,通过国际地磁参考模型(international geomagnetic reference field, IGRF)进行实验验证。选择纬度  $20^{\circ} \sim 40^{\circ}$  和经度  $100^{\circ} \sim 120^{\circ}$  作为导航区域。选择相关性最小的地磁场北向分量  $B_x$ 、东向分量  $B_y$  以及磁场总强  $B_F$ ,其地磁特征分布如图 1 所示。

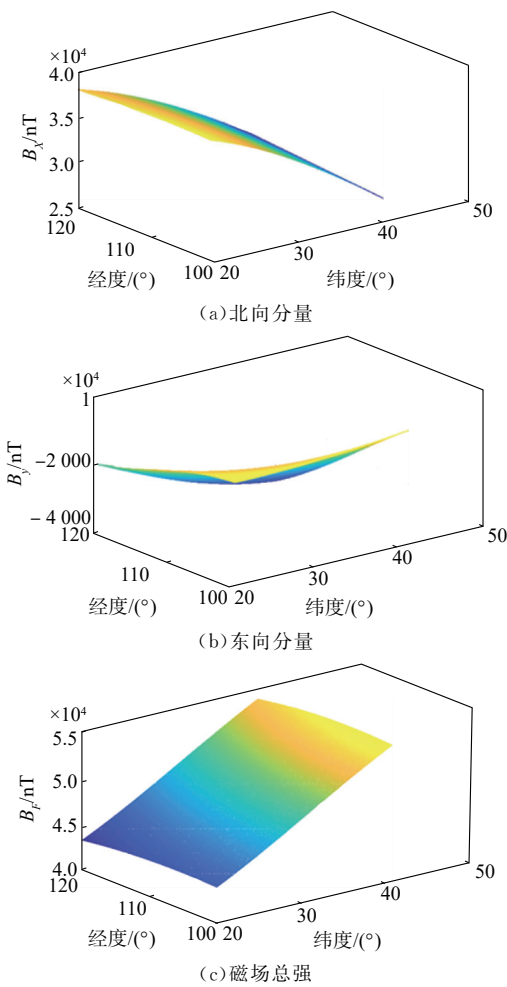


图 1 局部区域原始地磁三参量特征分布  
Fig. 1 Distribution of original geomagnetic three-parameter characteristics in a local area

将 7 个地磁参量作为原始数据,按 2.1 节算法步骤利用主成分分析法进行特征提取,7 个地磁参量成分的贡献率如表 1 所示。

表 1 仿真实验主成分分析结果

Tab. 1 Principal component analysis results of simulation experiments

| 成分 | 贡献率                    | 累积贡献率   |
|----|------------------------|---------|
| 1  | $779.6 \times 10^{-3}$ | 0.779 6 |
| 2  | $214.9 \times 10^{-3}$ | 0.994 5 |
| 3  | $4.3 \times 10^{-3}$   | 0.998 8 |
| 4  | $1.0 \times 10^{-3}$   | 0.999 9 |
| 5  | $0.1 \times 10^{-3}$   | 1.000 0 |
| 6  | $1.3 \times 10^{-6}$   | 1.000 0 |
| 7  | $1.5 \times 10^{-7}$   | 1.000 0 |

由表 1 可知,前 2 个主成分的累积贡献率为 99.45%,符合阈值准则,表明前 2 个主成分已经可以用来表示大部分的原始地磁信息,因此选择前 2 个主成分信息作为新的地磁特征  $T_1$ 、 $T_2$ ,即:

$$\begin{cases} T_1 = 0.423\ 5B_1 + 0.223\ 4B_2 - 0.415\ 6B_3 + 0.422\ 8B_4 + \\ \quad 0.281\ 4B_5 - 0.418\ 5B_6 - 0.406\ 0B_7 \\ T_2 = -0.090\ 8B_1 + 0.694\ 3B_2 + 0.186\ 3B_3 - \\ \quad 0.101\ 8B_4 + 0.612\ 9B_5 + 0.156\ 9B_6 + 0.253\ 8B_7 \end{cases} \tag{16}$$

利用主成分分析法提取的 2 个地磁主成分特征变化趋势如图 2 所示。

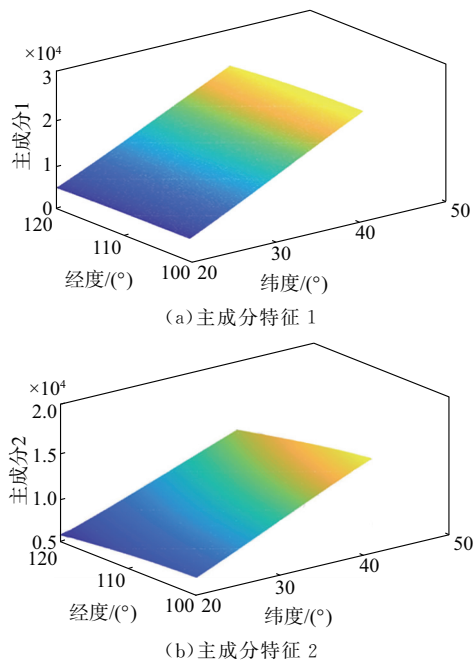


图 2 局部区域地磁主成分特征分布  
Fig. 2 Distribution of geomagnetic principal component characteristics in a local area

对比图 1 和图 2 可知,原始的地磁特征变化趋势不够明显,不同特征参量量纲也存在较大差异,变

化趋势不一致,不能很好地反映地磁场特点;利用主成分分析法提取的2个地磁主成分特征表现出了明显的趋势变化,可以更好地表征地磁场信息。

### 3.2 基于地磁主成分特征的导航方法验证

为了验证基于地磁主成分特征的进化梯度搜索导航算法的有效性,本节在国际地磁模型 IGRF-13 模拟的地磁环境下完成仿真对比实验,如表 2 所示。

表 2 3 组对比实验

Tab. 2 Three comparative experiment

| 实验    | 导航参量            | 算法       |
|-------|-----------------|----------|
| 第 1 组 | $B_X, B_Y, B_F$ | 传统搜索算法   |
| 第 2 组 | 地磁主成分特征         | 传统搜索算法   |
| 第 3 组 | 地磁主成分特征         | 进化梯度搜索算法 |

传统搜索算法指的是进化搜索算法(evolutionary algorithm, EA),是模拟生物进化过程求解问题的自适应智能算法,是一种迭代过程的搜索算法,根据环境反馈信息指导搜索过程,通过种群搜索的方式获取搜索信息,并将该信息转化为种群样本的概率模型用于指导下一代搜索<sup>[16]</sup>。进化算法作为一种智能搜索算法在解决多目标优化问题方面有着很大优势<sup>[17]</sup>。

进化梯度搜索算法(evolutionary gradient search, EGS)最初应用于气味源搜索中,根据气味的浓度趋势来搜索气味源所在<sup>[18]</sup>。进化梯度搜索算法具有更好的全局性及收敛快速性<sup>[19]</sup>。地磁导航的本质是利用地磁趋势来完成导航任务<sup>[20]</sup>,将进化梯度搜索算法应用于地磁导航中,可将快速收敛的优点与多目标进化算法的全局优化特性结合起来,完成导航任务。

3 组对比实验的仿真结果如图 3~图 5 所示。

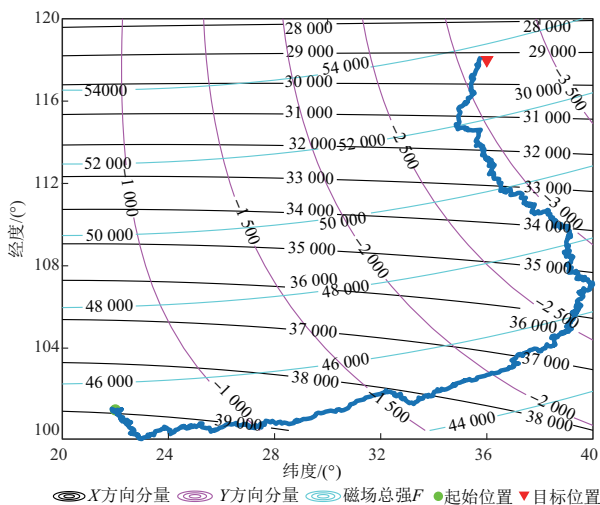


图 3 基于地磁三参量的传统搜索导航轨迹

Fig. 3 Traditional search navigation trajectory based on geomagnetic three parameters

从图 3 所示的导航轨迹可以看出,基于原始地磁 3 个参量的传统搜索导航方法的导航路径上存在很多小的弯曲段,这是因为在导航的过程中,要使 3 个地磁参量不断向目标位置的地磁值逼近,需要大量的搜索,并且传统的搜索导航方法是一种试错的搜索,导航中搜索的时间较长,导致出现较多的搜索过程,导航轨迹也很弯曲,载体不能快速到达目标位置。

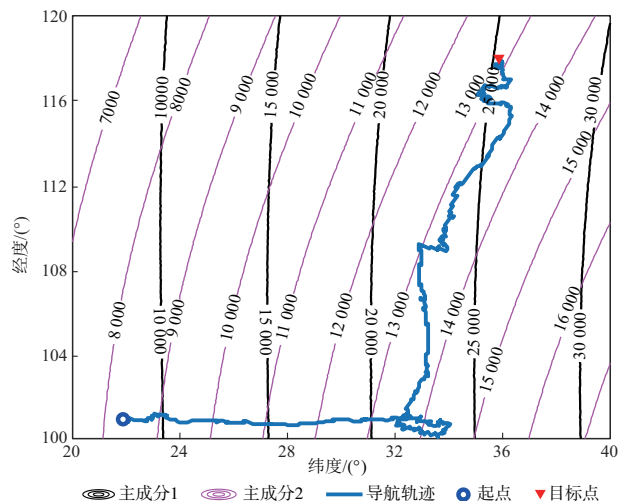


图 4 基于主成分特征的传统搜索导航轨迹

Fig. 4 Traditional search navigation trajectory based on principal component characteristics

在图 4 中,将提取出的地磁主成分特征作为新的导航参量,搜索路径较采用原始的地磁三参量减少,并且在导航过程中有一次明显转折,这是因为在导航前期,主成分 1 和主成分 2 的变化比较明显,导航过程中能够利用 2 个主成分特征的变化规律较快进行搜索导航,但后期由于地磁特征变化不明显,出现较多的搜索过程。

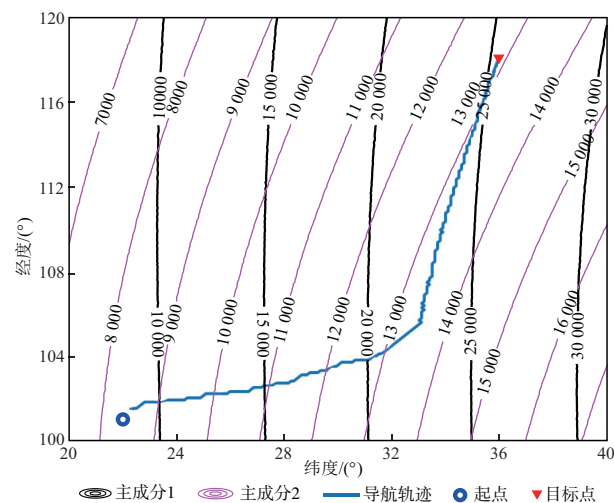


图 5 基于主成分特征的进化梯度搜索导航轨迹

Fig. 5 Evolutionary gradient search navigation trajectory based on principal component characteristics

图 5 中基于主成分特征的进化梯度搜索导航路径较为平直,搜索过程明显较少,这是因为该方法能

够充分利用提取出的 2 个主成分特征的趋势,将进化搜索和度下降结合起来搜索目标函数的极小值,不仅可以保证目标函数最优,而且具有快速收敛性,使得地磁导航过程中载体能够快速不断地向目标位置趋近,因此图中导航轨迹较平直。

对比 3 组实验可以看出,基于地磁主成分特征的进化梯度搜索导航效率最高。为了更直观地反映 3 组实验完成导航任务的耗时情况,将图 3~图 5 所示的导航轨迹所对应的目标函数收敛曲线绘制在图 6 中。由于导航过程中设置的运动速度以及步长是一致的,因此导航中的迭代步数大小可以反映导航过程的耗时情况,3 组实验在导航中的迭代步数如表 3 所示。

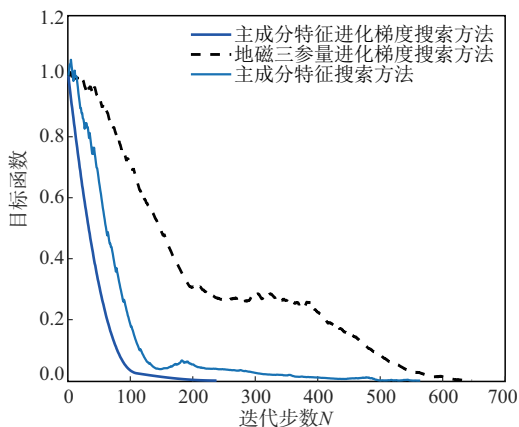


图 6 不同导航方法目标函数收敛曲线

Fig. 6 Convergence curves of objective functions for different navigation methods

表 3 3 组实验迭代步数结果对比

Tab. 3 Comparison of the results of three experimental iteration steps

| 导航参量            | 算法       | 迭代步数 |
|-----------------|----------|------|
| $B_X, B_Y, B_F$ | 传统搜索算法   | 647  |
| 地磁主成分特征         | 传统搜索算法   | 564  |
| 地磁主成分特征         | 进化梯度搜索算法 | 238  |

由图 6 和表 3 可以看出,基于地磁主成分特征的进化梯度搜索导航方法的迭代步数为 238,其他 2 组实验的迭代步数分别为 647 和 564,因此基于地磁主成分特征的进化梯度搜索导航方法导航效率相比较与原始的地磁参量及传统搜索导航方法,提高了 2 倍以上。这是因为地磁主成分特征可以将 7 个原始地磁参量信息重新组合,使得主成分特征能最大程度地表征原始地磁信息,降低了地磁重复特征带来的解算难度,减少了导航搜索时间,从而可以快速收敛至目标位置,完成导航任务。

图 7 和图 8 分别为以地磁三参量和地磁主成分特征为导航参量的子目标函数收敛曲线。可以看

出,基于地磁三参量的 3 个子目标函数由于收敛的一致性较差,迭代步数到 200 以后,3 个子目标函数的变化趋势依旧不一致,迭代步数达到 600 后才逐渐收敛,收敛速度也较慢,导致在导航的过程中需要大量的搜索,这与图 3 中的导航轨迹也是对应的。而对于以地磁主成分特征的 2 个子目标函数,其收敛的一致性较好,迭代步数在 100 之前 2 个目标函数都是同时快速下降,迭代步数到达 200 后逐渐收敛至 0。综合上述对比结果可知,在地磁环境中,基于地磁主成分特征的进化梯度搜索导航算法具有更好的性能。

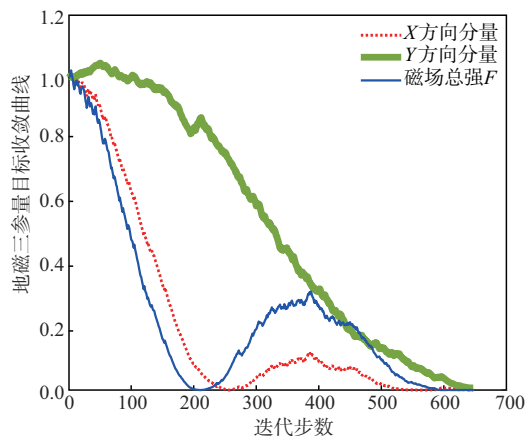


图 7 地磁三参量的子目标函数收敛曲线

Fig. 7 Convergence curves of sub-objective functions for geomagnetic three parameters

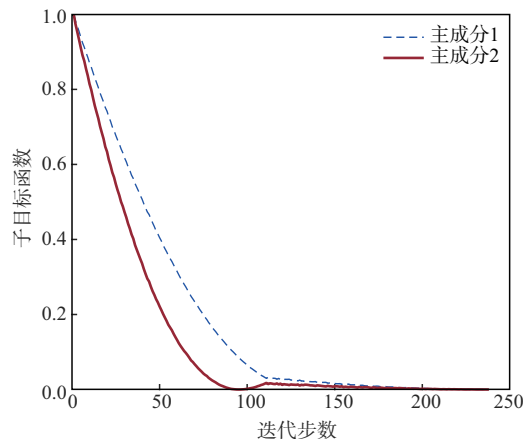


图 8 主成分特征导航参量的子目标函数变化

Fig. 8 Changes in sub-objective functions with principal component characteristics as navigation parameters

## 4 结语

本文针对远程自主导航中,以原始地磁数据作为导航参量所存在的利用度不足、传统搜索导航方法耗时长等缺陷,提出了一种基于地磁主成分特征的进化梯度搜索导航方法,通过主成分分析法提取

地磁场特征作为导航参量,将进化策略和梯度下降法用于导航过程,从而利用地磁趋势性完成导航任务。仿真结果表明,本文提出的基于地磁主成分的导航方法在导航效率上优于基于原始地磁数据的导航方法,进一步说明了所提出算法的有效性。本文目前的研究是基于仿真环境进行实验,后续的实验验证可以考虑采用无人机、无人水下航向器等载体,在复杂条件下进行。

## 参考文献

- [1] 胡小平. 水下地磁导航技术[M]. 北京:国防工业出版社,2013.  
HU X P. Technologies on Underwater Geomagnetic Field Navigation[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2013. (in Chinese)
- [2] 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)
- [3] 孙晓洁,寇军,张笑楠,等. 地磁导航技术研究进展[J]. 导航与控制, 2016, 15(6): 1-6.  
SUN X J, KOU J, ZHANG X N, et al. Research Progress in Geomagnetic Navigation[J]. Navigation and Control, 2016, 15(6): 1-6. (in Chinese)
- [4] CANCIANI A, RAQUET J. Airborne Magnetic Anomaly Navigation[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2017, 53(1): 67-80.
- [5] ARMSTRONG B, WOLBRECHT E, EDWARDS D B. AUV Navigation in the Presence of a Magnetic Disturbance with an Extended Kalman Filter [C]//OCEANS'10 IEEE SYDNEY. Sydney: IEEE, 2010: 1-6.
- [6] RYOO Y J, PARK J H. Design and Development of Magnetic Position Sensor for Magnetic Guidance System of Automated Ground Vehicle[C]//2012 12th International Conference on Control, Automation and Systems. Jeju: IEEE, 2012: 988-991.
- [7] 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.  
LU Y, WEI D Y, JI X C, et al. Review of Geomagnetic Positioning Method [J]. Navigation Positioning and Timing, 2022, 9(2): 118-130. (in Chinese)
- [8] GUO J J, LIU M Y, WANG M F, et al. Bio-Inspired Geomagnetic Navigation Algorithm Based on Segmented Search for AUV [C]//2018 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO). Kuala Lumpur: IEEE, 2018: 100-105.
- [9] LI H, LIU M Y, LIU K. Bio-Inspired Geomagnetic Navigation Method for Autonomous Underwater Vehicle[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2017, 28(6): 1203-1209.
- [10] LIU K, LIU M Y, ZHANG X J, et al. A Bio-Inspired Geomagnetic Navigation Model Based on Course Constraint Strategy under Anomalies Field Disturbing for AUV [C]//OCEANS 2016. Shanghai: IEEE, 2016: 1-5.
- [11] 黄婧丽,谭学者,张翔宇. 基于主成分分析法的地磁导航适配区域选择[J]. 海军航空工程学院学报, 2018, 33(2): 194-200.  
HUANG J L, TAN X Z, ZHANG X Y. Selection of Adaptive Area in Geomagnetic Navigation Based on the Principal Component Analysis[J]. Journal of Naval Aeronautical and Astronautical University, 2018, 33(2): 194-200. (in Chinese)
- [12] 朱灿林,潘孟春,张琦,等. 基于机器学习的地磁矢量图适配性研究[J]. 传感器与微系统, 2022, 41(8): 21-24, 28.  
ZHU C L, PAN M C, ZHANG Q, et al. Research on Matching Suitability of Geomagnetic Vector Map Based on Machine Learning[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2022, 41(8): 21-24, 28. (in Chinese)
- [13] 肖晶,齐晓慧,段修生,等. 基于并行卷积神经网络的地磁方向适配性分析[J]. 中国惯性技术学报, 2017, 25(3): 349-355.  
XIAO J, QI X H, DUAN X S, et al. Direction Navigability Analysis for Geomagnetic Navigation Based on Parallel Convolutional Neural Networks[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2017, 25(3): 349-355. (in Chinese)
- [14] 张晓明. 地磁导航理论与实践[M]. 北京:国防工业出版社, 2016.  
ZHANG X M. Geomagnetic Navigation Theory and Practice [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2016. (in Chinese)
- [15] 张艳. 主成分分析和因子分析方法及其在综合评价中的应用研究[D]. 南京:河海大学, 2008.  
ZHANG Y. Principal Component Analysis and Factor Analysis Methods and Their Application in Comprehensive Evaluation [D]. Nanjing: Hohai University, 2008. (in Chinese)
- [16] 刘坤. 基于磁趋性搜索的远程地磁仿生导航研究[D]. 西安:西北工业大学, 2019.  
LIU K. Research on Long-Distance Geomagnetic Navigation Based on Magnetotactic Search [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2019. (in Chinese)

- Frequency Offset Estimation for MIMO Single-Carrier FDMA System in Wireless Communication[J]. Alexandria Engineering Journal, 2022, 61(9): 6907-6917.
- [15] 付博炜, 李明齐. 基于 PN 序列互相关同步低复杂度实现方法[J]. 计算机仿真, 2021, 38(10): 237-240.
- FU B W, LI M Q. Low Complexity Implementation Method Based on PN Sequence Cross-Correlation Synchronization[J]. Computer Simulation, 2021, 38(10): 237-240. (in Chinese)
- [16] 吕子豪, 张涛, 任文成. 一种适用于散射通信的联合帧同步和频偏估计算法研究[J]. 计算机测量与控制, 2024, 32(1): 185-191.
- LÜ Z H, ZHANG T, REN W C. Research on a Joint Frame Synchronization and Frequency Offset Estimation Algorithm for Scattering Communication [J]. Computer Measurement and Control, 2024, 32(1): 185-191. (in Chinese)
- [17] ZHANG J, LIU Y. Research of Time-Frequency Synchronization Technology Based on OFDM System [C]//2023 4th International Symposium on Computer Engineering and Intelligent Communications (ISCE-IC). Nanjing: IEEE, 2023: 538-541.
- [18] KAVADI R, GANGAPATNAM V B, SWAMI-NATHAN M. Design and Evaluation of Space-Time Coded Multiple Input Multiple Output-Orthogonal Frequency Division Multiplexing Physical Layer[J]. International Journal of Communication Systems, 2023, 37: 5645-5657.
- [19] RANDY L D, SEBASTIÁN B P J, ENRIQUE S M H. Time Synchronization Technique Hardware Implementation for OFDM Systems with Hermitian Symmetry for VLC Applications[J]. IEEE Access, 2023, 11: 42222-42233.
- [20] SUYOTO S, SUGIHARTONO S, ISKANDAR I, et al. Robust Time Synchronization for NC-OFDM Cognitive Radio Systems[J]. Computer and Information Sciences, 2021, 34: 5734-5745.
- [21] 郑小敏. 基于 SC-FDE 的矿井无线通信系统设计与 SDR 实现[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2021.
- ZHENG X M. Design and SDR Implementation of Mine Wireless Communication System Based on SC-FDE[D]. Xi'an: Xidian University, 2021. (in Chinese)
- [22] 张涛, 刘莹, 孙柏昶, 等. 对流层散射通信及其应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2020.
- ZHANG T, LIU Y, SUN B C, et al. Tropospheric Scattering Communication and Its Applications[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2020. (in Chinese)

(编辑: 徐楠楠)

#### (上接第 81 页)

- [17] 崔逊学. 多目标进化算法及其应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006.
- CUI X X. Multiobjective Evolutionary Algorithms and Their Applications[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2006. (in Chinese)
- [18] SALOMON R. Evolutionary Algorithms and Gradient Search: Similarities and Differences[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 1998, 2(2): 45-55.
- [19] 刘皓阳, 祁荣宾. 基于进化梯度搜索的多目标混合优化算法[J]. 计算机与应用化学, 2016, 33(11): 1197-1202.
- LIU H Y, QI R B. Multi-Objective Hybrid Optimization Algorithm Based on Evolutionary Gradient Search [J]. Computers and Applied Chemistry, 2016, 33(11): 1197-1202. (in Chinese)
- [20] 郭娇娇, 刘明雍, 刘坤, 等. 基于进化梯度搜索的 AUV 地磁仿生导航研究[J]. 西北工业大学学报, 2019, 37(5): 865-870.
- GUO J J, LIU M Y, LIU K, et al. Research of Bio-Inspired Geomagnetic Navigation for AUV Based on Evolutionary Gradient Search[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2019, 37(5): 865-870. (in Chinese)

(编辑: 徐楠楠)