

doi:10.19306/j.cnki.2095-8110.2025.02.011

地磁梯度张量测量及匹配导航关键技术研究

肖云^{1,2}, 王舒霏^{2,4}, 王丽兵³, 潘宗鹏^{1,2}, 刘晓刚^{1,2}

- (1. 西安测绘研究所, 西安 710054;
2. 地理信息工程国家重点实验室, 西安 710054;
3. 中科星图空间技术有限公司, 西安 710054;
4. 长安大学地质工程与测绘学院, 西安 710054)

摘要: 系统探讨了地磁导航技术中高精度磁传感器矩阵和磁梯度张量观测技术的发展与应用。阐述了磁梯度和磁梯度张量的基本理论及其导航模型的构建。研究了磁传感器的选择、布局设计、校准和标定, 以及信号处理算法。通过设置多个磁梯度信号测量仪, 全面捕捉由磁异常引起的局部磁场变化, 并讨论了不同磁传感器配置方式及基线长度的选择原则。介绍了利用地磁梯度张量数据生成高分辨率地磁场分布图的技术, 同时结合 ICCP, POMDP 和 NSPSO 算法, 对地磁梯度张量在地磁导航中的应用进行了研究。阐述了地磁导航技术的理论基础、技术实现和应用前景, 强调了其作为一种有效的导航手段的潜力和重要性。

关键词: 地磁导航; 磁梯度张量; 磁传感器矩阵; 磁梯度张量构图; 磁梯度数据匹配

中图分类号: V249.31; U666.7; TP206 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-8110(2025)02-0102-09

Research on key technologies of geomagnetic gradient tensor measurement and matching navigation

XIAO Yun^{1,2}, WANG Shufei^{2,4}, WANG Libing³, PAN Zongpeng^{1,2}, LIU Xiaogang^{1,2}

- (1. Xi'an Research Institute of Surveying and Mapping, Xi'an 710054, China;
2. State Key Laboratory of Geo-information Engineering, Xi'an 710054, China;
3. Geovis Spatial Technology Co., Ltd., Xi'an 710054, China;
4. School of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, China)

Abstract: The development and application of high-precision magnetic sensor arrays and magnetic gradient tensor observation techniques in geomagnetic navigation are systematically studied. The fundamental theories of magnetic gradients and magnetic gradient tensors and the construction of their navigation models are described. The selection, layout design, calibration, and standardization of magnetic sensors and signal processing algorithms are investigated. Local magnetic field variations caused by magnetic anomalies are comprehensively captured by setting up multiple magnetic gradient signal measurement devices. The principles for selecting different magnetic sensor configurations and baseline lengths are discussed. A technique for generating high-resolution geomagnetic field distribution maps using the magnetic gradient tensor data is proposed. Meanwhile, the application of magnetic gradient tensors in geomagnetic navigation is studied by integrating ICCP (iterative closest contour point), POMDP (partially observable Markov decision process) and

收稿日期: 2024-10-17; 修订日期: 2024-12-23

作者简介: 肖云(1975—), 男, 博士, 正高级工程师, 主要从事重磁测量与导航方面的研究。

NSPSO (natural selective particle swarm optimization) algorithms. The theoretical foundations, technical implementation, and application prospects of geomagnetic navigation technology are demonstrated, and its potential and importance as an effective navigation method are highlighted.

Key words: Geomagnetic navigation; Magnetic gradient tensor; Magnetic sensor matrix; Magnetic gradient tensor mapping; Magnetic gradient data matching

0 引言

地磁导航技术作为现代导航领域的重要组成部分,凭借其独特的优势,在越来越多的应用场景中逐渐展现出其不可替代的价值。与传统的卫星导航系统相比,地磁导航技术凭借其不依赖于外部信号源的特点,能够在地下、水下等复杂环境中稳定工作,为军事侦察、资源勘探及紧急救援等领域提供了可靠的定位信息^[1],尤其在全球定位系统(global positioning system, GPS)信号受干扰或屏蔽的状态下,地磁导航技术能够有效填补定位空白,确保导航的连续性和安全性^[2]。

目前为止,学者们对于张量数据处理方法的研究大多针对的是重力张量数据^[3]。随着对高精度定位需求的不断增长,基于磁梯度张量的地磁导航方法正逐渐受到各方学者的关注。磁梯度张量不仅描述了磁场强度的空间变化率,还能揭示不同方向上磁场变化之间的相关性,因此,相较于单一方向上的磁梯度测量,它能够提供更为全面和准确的磁场特征信息。这一特性对于理解复杂的地质结构、精确定位地下异常体具有重要意义。通过构建高分辨率的地磁梯度张量模型,并结合相应的算法,便可实现精准的定位功能。此外,采用磁梯度张量还能显著提高系统对抗环境噪声的能力,增强导航系统的鲁棒性和可靠性^[4]。

本文将从磁梯度与磁梯度张量的理论、探测方法及其在导航领域的应用等方面进行系统阐述。

1 磁梯度张量探测及导航等技术的发展

重力匹配导航作为惯性导航系统的有效补充,利用地球重力场信息修正惯导累积误差,具有无源、隐蔽及自主等诸多优势^[5]。陈垚宁等^[6]通过对比基于信息熵的单特征分析准则与多属性决策的多特征分析准则,发现后者在评价重力匹配区适配性上更为准确有效。肖云等^[7]进一步应用多属性决策理论对多种重力特征参数进行加权规范化处理,提高了适配区选择的精度和稳定性。这些研究

成果不仅优化了重力辅助导航的性能,同时也为磁力导航技术提供了参考,即可以通过相似方法提升磁梯度张量图适配区的选择准确性。

早在 2000 年初,德国耶拿物理学高技术研究所就在南非对其研发的 LTSSQUID 航空全张量磁梯度仪进行了飞行试验。同年,美国海军开发了用于浅水海域目标探测和分类的超导梯度计/磁强计传感器系统(superconducting gradiometer/magnetometer sensor system, SGMS)^[8]。2004 年,特瑞斯坦技术公司与美国橡树岭国家实验室合作研发的 HTS-SQUID 直升机磁梯度张量系统进行了地面屏蔽室测试。2006 年, Schmidt 等^[9]讨论了地磁张量的性质及特性。此后, Beiki 等^[10]先提出了可以应用于简单地质体的反演磁梯度张量数据解析信号法。之后,又提出了更加完善的向量法对航磁梯度张量数据进行解释^[11]。

我国在梯度张量测量技术方面的研究起步较晚,但随着技术的不断进步,对于磁梯度张量仪的研发也在同步推进。在 2012 年,王明等^[12]提出了 Tilt-Euler 方法,用于对数据进行处理及解释。2013 年,肖雄等^[13]在距离测量中应用了磁梯度张量定位。同年,马国庆^[14]提出了场源深度自动反演的局部波数法,该方法基于磁梯度张量和数据反演,结合了方向信号解析和欧拉反褶积法。自 2014 年起,张英堂教授团队开始进行磁梯度张量理论研究,并成功搭建了十字形磁通门张量系统,开展了系统校正和磁干扰补偿等工作^[15]。此外,吉林大学随阳铁团队于 2013 年研发了带球形反馈线圈的紧凑型磁通门全张量磁梯度仪^[16]。而吉林大学刘光达和王君教授团队又于 2014 年研制了高温超导磁梯度张量仪^[17]。林君和随阳铁教授团队还研发了磁通门梯度张量系统^[18]。李青竹团队于 2022 年提出了基于磁源多目标定位的自适应模糊 C 均值聚类(adaptive fuzzy C-means clustering, AFCM)和张量不变量的方法,该方法对多块小磁铁在实测中的坐标偏差估计在 0.091 m 以下^[19]。2023 年,张樱子等^[20]提出了一种基于二维傅里叶变换的磁梯

度张量探头结构优化方法,通过消除磁梯度计之间的噪声干扰,使系统灵敏度的提升达到了1个数量级。

综上所述,磁梯度张量技术作为一种新兴的地球物理勘探手段,具有广阔的应用前景。国内外学者在该领域的研究成果,为磁梯度张量技术的进一步发展和应用奠定了坚实的基础。

2 磁梯度与磁梯度张量理论

2.1 磁梯度张量

在地球物理学领域,磁梯度张量是一种描述磁场空间变化的重要工具。它不仅对于理解地球内部结构至关重要,而且也是矿产勘探、地质调查及环境监测等领域的基础。

磁梯度张量是一个可以描述磁场强度在三维空间中所有方向上变化率的 3×3 的矩阵^[21]。它包含了磁场强度关于每个空间坐标的二阶偏导数,相较于单一方向上的磁梯度,它能够提供更全面的信息。磁梯度张量的元素可以表示为

$$G_{ij} = \frac{\partial^2 \mathbf{B}}{\partial x_i \partial y_j} \quad (1)$$

其中: $i, j \in \{x, y, z\}$; \mathbf{B} 代表磁场强度矢量;而 x, y, z 是三维坐标系中的3个正交方向。

磁梯度张量除了可以揭示磁场沿特定方向的变化率(即磁梯度),还提供了不同方向上磁场变化之间的相关性。这种信息对于了解复杂地质结构和精确定位地下异常具有极大的作用。

2.2 磁梯度张量导航模型构建

主要通过以下几个步骤构造磁梯度张量导航模型。

1) 数据采集与处理:使用高精度的磁力计或其他设备在特定区域内收集不同点位上的磁场强度值,并计算其各个方向的张量。

2) 建立数学模型:根据所获得的数据集,采用适当的数学方法拟合出可以准确反映该区域内地磁场张量规律的模式。

3) 设计导航算法:基于上述建立的模型,开发适用于实际应用场景的导航算法。

4) 系统集成与测试验证:将设计好的软件或者算法嵌入到平台或硬件中,并对其进行充分的功能性和性能测试,确保其能够在预定条件下稳定工作。

随着技术的发展和应用需求的变化,必须不断地对现有系统进行评估和升级。可以通过引入新

的理论研究成果或者采用更先进的计算工具等方式,以提升系统的整体表现。

3 磁传感器矩阵构建与磁梯度张量观测技术

3.1 研究内容

磁传感器矩阵由多个按特定布局排列的磁传感器组成,它能够同时记录不同位置的磁场数据,为计算磁梯度提供基础。在构建时需选择适合的传感器类型(如霍尔效应、各向异性磁电阻(anisotropic magneto resistance, AMR)、巨磁电阻(giant magneto resistance, GMR)、隧穿磁阻(tunnel magneto resistance, TMR)及磁通门传感器),并优化其布局,确保能够有效捕捉三维空间内的磁场变化。除此之外,在构建过程中,还需精确校准每个传感器以消除误差,并通过合适的信号处理算法去除噪声和提高信噪比,实现数据融合。基于收集的数据,可计算各方向上的磁梯度并形成张量,进而全面解析磁场分布特征。

3.2 多磁传感器矩阵构建方案研究

由于磁异常存在于地磁背景场中,矢量磁力计测得的总磁场 T 由正常的地磁场 T_0 和磁异常场 T_a 组成。地球总磁场的梯度通常约为 10 nT/km ,在大多数情况下,这一梯度远小于磁异常场的变化率。因此,在实际应用中,可以假设磁场梯度张量 \mathbf{G} 主要由磁异常场在3个相互正交坐标轴 X, Y 和 Z 上的空间变化率构成^[22]。这种假设简化了对磁场变化的分析,使得研究人员能够更专注于磁异常引起的局部磁场变化,从而提高探测和解释的精度。

$$\mathbf{G} = - \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} & \frac{\partial^2 U}{\partial x \partial y} & \frac{\partial^2 U}{\partial x \partial z} \\ \frac{\partial^2 U}{\partial y \partial x} & \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} & \frac{\partial^2 U}{\partial y \partial z} \\ \frac{\partial^2 U}{\partial z \partial x} & \frac{\partial^2 U}{\partial z \partial y} & \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial T_x}{\partial x} & \frac{\partial T_x}{\partial y} & \frac{\partial T_x}{\partial z} \\ \frac{\partial T_y}{\partial x} & \frac{\partial T_y}{\partial y} & \frac{\partial T_y}{\partial z} \\ \frac{\partial T_z}{\partial x} & \frac{\partial T_z}{\partial y} & \frac{\partial T_z}{\partial z} \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中: U 表示磁性体的磁位; T_x, T_y 和 T_z 分别表示磁场强度矢量在空间3个正交方向上的分量。

从式(2)可以看出,磁梯度张量是对称的。此外,在无源场中,磁位 U 遵守拉普拉斯方程(Laplace's equation)。磁梯度张量对角线元素的和为0,即 $T_{xx} + T_{yy} + T_{zz} = 0$ 。由此可以看出,在全张量梯度中,只有5个独立的元素^[23]。

全张量梯度仪测量系统将2台磁梯度测量仪分别设置在 X 轴、 Y 轴和 Z 轴上,用于测量这些独立的

磁梯度张量。图 1 所示为磁强计线圈的相对取向和位置。这种配置确保了能够全面捕捉到三维空间内的磁场变化率,从而提供详细的磁场信息。通过这种方式,可以精确地测量和分析由磁异常引起的局部磁场变化。

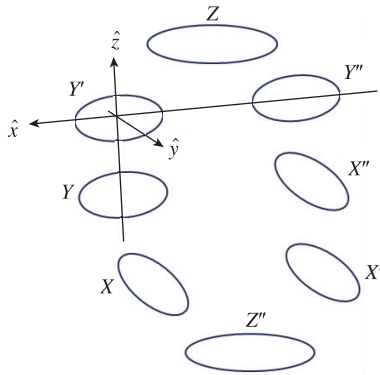


图 1 地磁梯度仪测量原理

Fig. 1 Principle of geomagnetic gradient measurement

如式(3)所示,各地磁梯度分量可以表示为

$$\begin{aligned}
 T_{xx} &= \frac{T_{x1} - T_{x2}}{\Delta x} \\
 T_{xy} = T_{yx} &= \frac{T_{x1} - T_{x2}}{\Delta y} \\
 T_{yy} &= \frac{T_{y1} - T_{y2}}{\Delta y} \\
 T_{yz} = T_{zy} &= \frac{T_{y1} - T_{y2}}{\Delta z} \\
 T_{zz} &= \frac{T_{z1} - T_{z2}}{\Delta z} \\
 T_{xz} = T_{zx} &= \frac{T_{z1} - T_{z2}}{\Delta x} \quad (3)
 \end{aligned}$$

其中, $\Delta x, \Delta y$ 和 Δz 分别表示每个轴向上 2 个梯度仪之间的相对距离。

磁传感器矩阵的构建是指将多个磁传感器按照特定的几何布局进行排列组合,形成一个二维或三维的阵列结构^[24]。这种矩阵能够同时在不同的位置上获取磁场数据。通过合理的设计,可以使传感器矩阵具备高灵敏度、宽动态范围及低噪声等特性,并且能够覆盖较大的空间区域。利用磁传感器矩阵可以获得多点同步的磁场数据,这对于准确地估计局部区域内的磁梯度张量非常有利,可以有效地提高磁梯度张量的测量精度。

其传感器配置方式通常分为十单轴、八单轴和七单轴 3 种类型^[25],各传感器配置方式如图 2~图 4 所示。

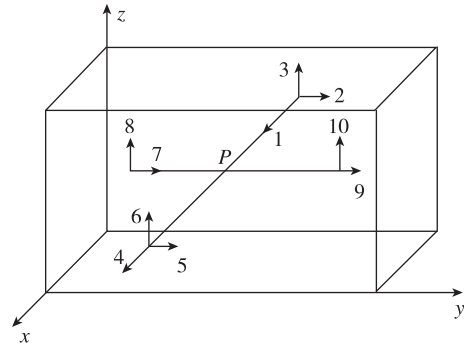


图 2 十单轴磁传感器配置方式

Fig. 2 Configuration method of ten single-axis magnetic sensors

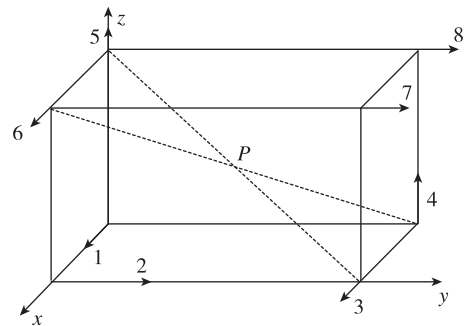


图 3 八单轴磁传感器配置方式

Fig. 3 Configuration method of eight single-axis magnetic sensors

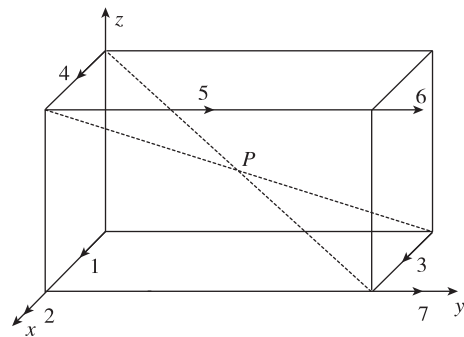


图 4 七单轴磁传感器配置方式

Fig. 4 Configuration method of seven single-axis magnetic sensors

3.3 地磁梯度张量测量基线最优长度选择

在图 2~图 4 所示的不同磁传感器配置中,地磁梯度张量的测量精度与基线长度 $\Delta x, \Delta y$ 和 Δz 密切相关。为了确保测量的准确性,基线长度的选择需要综合考虑特定磁传感器的噪声水平及磁性目标的强度等因素。理想的基线长度应根据具体的应用场景和要求进行优化确定,并不是越小或越

大就越好。通过合理选择基线长度,可以在提高测量精度的同时,有效减少噪声的影响,从而更准确地捕捉到由磁异常引起的磁场变化。

3.4 地磁梯度张量测量流程

结合上述内容,通过多磁传感器测量地磁梯度张量可以归纳为图5所示步骤。

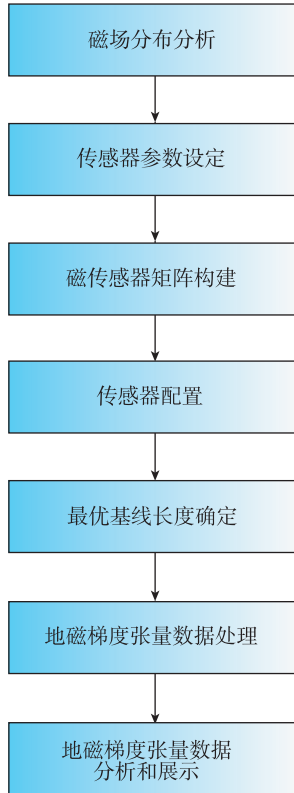


图5 多磁传感器地磁梯度张量测量流程

Fig. 5 Flow of geomagnetic gradient tensor measurement using multiple magnetic sensors

4 基于地磁梯度张量构图与智能匹配技术

4.1 研究内容

地磁梯度张量构图技术是指利用地磁梯度张量数据,进而生成高分辨率地磁场分布图,从而提供比传统标量测量更丰富的信息。当与智能匹配技术结合时,运用先进算法或人工智能将这些数据与已知模型或数据库进行匹配,实现自动化分析解释。二者的有效结合不仅能够提高数据精度和特征提取能力,还支持实时处理与多源数据融合,适用领域广泛。

4.2 算法原理

(1) 地磁梯度张量场建模方法

地磁梯度张量场建模方法主要有4种,分别为数值模型、数学模型、数学物理模型与物理模型。

数值模型通常基于规则分布的网格节点及其对应的磁场梯度张量值进行构建。

数学模型包括多种多项式模型,如泰勒多项式、勒让德多项式和样条函数等。这些模型主要用于拟合和插值数据,而不具备任何关于磁场的物理含义。与数值模型类似,数学模型主要关注的是数据的数学表示和处理,而不是磁场本身的物理特性。

数学物理模型包括球谐分析(spherical harmonic analysis,SHA)、矩谐分析(rectangular harmonic analysis,RHA)、球冠谐分析(spherical cap harmonic analysis,SCHA)、修正球冠谐分析(revised spherical cap harmonic analysis,R-SCHA)、球面小波分析(spherical wavelet analysis,SWA)及球面 Slepian 函数(spherical Slepian function,SSF)等,此类模型包含了磁场的位场性质,是磁场建模精度较高的方法。

物理模型主要指等效源(equivalent source,ES)方法建模,是一种能够拟合已知观测数据的场源模型。虽然该模型并非真实场源,但有着建模精度高的优点。然而,该模型计算量较大,且对于不同的观测数据、观测平台及研究目标,其等效条件即最佳等效源可能不一样。

(2) 地磁梯度张量测量数据对位置的敏感性和适配区域分析

研究分析和统计区域的地磁梯度张量数据,主要是研究均值、标准差和粗糙度等特征参数。均值提供地磁梯度张量的整体水平;标准差衡量数据离散程度,其值越大表示磁场变化越复杂;粗糙度则反映了地磁梯度张量的平均光滑度,粗糙度高意味着更剧烈的变化与更大的波动性。

丰富的变化特征能够提供明确标识,利于不同数据集间的精准匹配。较大特征参数值意味着地磁信息较为丰富,能够包含更多细节与变化,有助于提升匹配算法的性能。

对梯度张量数据的变化率 T_{zx} , T_{zy} 和 T_{zz} 进行计算和统计分析,可进一步分析其对匹配导航精度的影响。

$$\begin{cases} \delta x = \frac{\delta T_{zx}}{|T_{zzx}|} \\ \delta y = \frac{\delta T_{zy}}{|T_{zzy}|} \\ \delta z = \frac{\delta T_{zz}}{|T_{zzz}|} \end{cases} \quad (4)$$

4.3 地磁梯度张量自适应三角格网构建方法

地磁梯度张量自适应三角格网构建技术,通过

动态调整网格密度,能够在磁场变化显著区域实现高精度数据采集,同时在平缓区域有效抑制噪声,从而优化计算资源的使用,并提高了数据处理效率。该技术可以提供更精准的模型,尤其是在 GPS 信号不可达的水下或地下环境,能够实现高精度定位。此外,自适应网格技术还提高了目标定位的准确性和可靠性,对于地质勘探、矿产资源评估及考古探测等领域具有重要价值。自适应三角格网构建步骤如下。

1)初始网格生成:首先,根据反演区域生成一套较粗糙的三角形网格。

2)统计分析:计算每个三角形中梯度张量数据的均值和标准差。

3)标记高变异性区域:将标准差大于梯度张量观测误差的三角形标记出来。

4)网格加密:将标记的三角形一分为二进行加密。具体方法是连接最长边的中点与对应的顶点,并且连接与其共用最长边的相邻三角形的对应顶点。如果分出的小三角形中,有任何一个小三角形的梯度张量标准差小于梯度张量观测误差,则撤销此次分割操作;否则,保留分割结果。

5)迭代判断:检查每个三角形中的梯度张量数据。如果所有三角形的梯度张量标准差都小于或等于梯度张量观测误差,或者没有更多的三角形可以被进一步分割,则网格生成结束;否则,返回步骤 2)继续进行统计分析和加密。

4.4 地磁梯度张量匹配技术

(1)基于迭代最近等值线(iterative closest contour point,ICCP)算法的地磁梯度张量数据匹配导航算法研究。

地磁梯度张量数据在导航和定位中具有重要的应用价值,尤其是在全球卫星导航系统(global navigation satellite system,GNSS)信号不可用或受限的环境中。ICCP 算法作为一种有效的匹配方法,广泛应用于地磁梯度张量数据的匹配导航^[26]。该算法是一种迭代最相关等值线点匹配算法,通过逐步优化匹配点对,实现两个数据集之间的精确对齐。该算法最初应用于三维点云数据的配准,但在地磁梯度张量数据匹配中也表现出良好的性能^[27]。

地磁导航中对于 ICCP 算法的应用通常分为以下几个步骤。

1)惯性导航系统(inertial navigation system,INS)运行一段距离后,可以提供一系列的推测位置

点 P_1, P_2, P_3 和 P_4 , 这些点构成了 INS 指示的航迹。同时,在每个指示点上,地磁传感器可以测量并提供相应的地磁梯度张量,分别记作 M_1, M_2, M_3 和 M_4 。在已有的数字地磁图中,需要定位那些具有与 M_1, M_2, M_3 和 M_4 相同地磁梯度张量值的等值线。

2)在地磁图中,搜索 INS 指示点所对应的最近等值线上的点 Q_1, Q_2, Q_3 和 Q_4 。

3)将等值线点设为真实的航行路线,通过 INS 指示轨迹点集 (P_1, P_2, P_3, P_4) 和等值线点集 (Q_1, Q_2, Q_3, Q_4) , 在它们之间寻找与旋转矩阵和平移矩阵相对应的刚性变换。

4)将上述求得的旋转矩阵和平移矩阵用于修正 INS 指示点,修正后的坐标点记 Y_1, Y_2, Y_3 和 Y_4 。

5)将修正轨迹点 Y_1, Y_2, Y_3 和 Y_4 作为新的推测指示点序列,继续对上述步骤进行重复,直至输出的修正轨迹点符合预期的匹配结果。

ICCP 算法通常是最优估计的欧氏距离作为目标函数^[28]

$$\min_T \sum_n Q_i - TP_i^2 \quad (5)$$

其中, T 为刚性变换。

ICCP 算法的过程示意如图 6 所示。

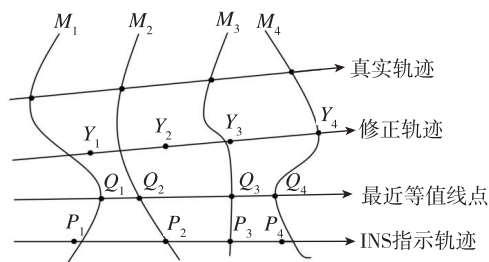


图 6 ICCP 算法过程示意

Fig. 6 Flow of ICCP algorithm

(2)基于 POMDP 地磁梯度张量决策建模的地磁导航方法

基于部分可观测的马尔可夫决策过程(partially observable Markov decision process, POMDP)的地磁梯度张量决策建模是一种应用于地磁导航中的新方法。POMDP 模型是一个六元组 $\{S, A, T, O, R, B\}$, S 为智能体状态集; A 为动作集; T 为状态转移函数; O 为观测函数; R 为奖励函数; B 为信念状态^[29]。

状态 S : 该模型下的状态表示为地磁梯度张量的 x 分量 Gx , 由于是多智能体的交互, 状态分为自身状态 s_{self} 和邻居交互状态 s_j 。

动作 A : 与状态的定义类似, 动作规定为地磁梯度张量的 y 分量, 动作也分为自身动作 a_{self} 和邻居交互动作 a_j 。

状态转移概率 T : 状态转移概率用如下形式表示: $T(s', a, s) \sim p_k(s' | s, a)$ 。

观测函数 O : 智能体在每一采样时刻采样地磁信息, 该观测函数描述的是采样地磁信息的准确性, 是一个概率分布。用一个变量 DELTA 表示当前采样地磁信息的误差大小。

信念状态 B 及奖励函数 R : 结合两点法与两步法的梯度张量计算方法可知, 地磁计算的误差主要与两点之间的夹角有关, 两点之间的夹角越大, 则 x 梯度张量分量的准确度越小 (y 梯度张量分量的准确度越大), 反之。因此, 将角度的正弦值和余弦值纳入梯度张量概率以表示状态的信念空间。

该模型通过基于点的值迭代 (point based value iteration, PBVI) 方法计算局部最优解, 其导航精度通常可达 4~7 nmi。

(3) 基于 NSPSO 算法的地磁导航方法

基于自然选择的粒子群优化 (natural selective particle swarm optimization, NSPSO) 算法是一种改进的粒子群优化 (particle swarm optimization, PSO) 算法^[30]。

NSPSO 的核心思想是在每次迭代过程中, 首先根据粒子的适应度值将整个粒子群从低到高进行排序。接着, 选取适应度较低的一半粒子, 并用这些粒子的速度和位置信息替换适应度较高的另一半粒子的对应信息。在此过程中, 每个粒子自身历史最优位置被保留下来^[31]。通过这样的机制设计, 可以促进种群内信息的有效交流与更新, 有助于保持群体多样性和优化效率之间的平衡, 对于提高解决复杂多模态优化问题时的整体性能尤其有益。

在地磁张量导航应用中, 目标的定位步骤如下。

1) 假设粒子群中共有 m 个粒子, 第 i 个粒子的位置矢量为 \mathbf{x}_i , 速度矢量为 \mathbf{v}_i 。

2) 利用磁梯度张量系统测量连续 2 个测量点的磁场信号, 计算磁梯度张量 \mathbf{G}_1, \mathbf{G} 及对应的特征矢量 $\mathbf{V}_{1,1}, \mathbf{V}_{1,3}, \mathbf{V}_1, \mathbf{V}_3$ 和矩阵 \mathbf{A}_1, \mathbf{A} 。

3) 初始化粒子数量 m 与加速系数 c_1, c_2 以及 N 个粒子的位置 \mathbf{x}_i 与速度 \mathbf{v}_i 。

4) 计算适应度函数 $f(x_i(k))$ 和个体最优位置 $p_i(k)$ 及全局最优位置 $g(k)$, 并更新粒子的位置 $x_i(k+1)$ 与速度 $v_i(k+1)$ 。

5) 将整个粒子群按照适应度值进行排列, 并将群体中适应度值大的一半粒子的位置与速度用适应度值小的一半粒子代替。

6) 当迭代次数到达设定值后, 输出全局最优解 g 作为目标的位置。

根据文献[32]磁梯度张量系统结构的比较分析, 该方法在特定环境下的平均定位误差为 3.14 m, 能搜索到全局最优解。

5 结论及展望

本文全面介绍了地磁梯度张量理论、地磁传感器矩阵构建和地磁梯度张量测量、地磁梯度场建模及地磁梯度张量导航应用, 突显了其作为一种有效导航手段的巨大潜力和重要性。

在未来, 随着传感技术和数据分析方法的不断革新, 地磁梯度张量导航有望在更多应用场景中展现其独特优势, 并对推动相关学科的交叉融合形成积极影响。同时, 继续深化对地球磁场特性的理解, 探索更为精确的建模方法, 将是进一步提升地磁导航系统可靠性和实用性的关键所在。

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.
LU Yi, WEI Dongyan, JI Xinchun, et al. Review of geomagnetic positioning method[J]. Navigation Positioning and Timing, 2022, 9(2): 118-130(in Chinese).
- [2] 踪华, 刘嫵, 杨业. 地磁导航技术研究现状综述[J]. 航天控制, 2018, 36(3): 93-98.
ZONG Hua, LIU Yan, YANG Ye. Overview of the research status about geomagnetic navigation technology[J]. Aerospace Control, 2018, 36(3): 93-98(in Chinese).
- [3] 干博. 磁梯度张量研究与数据解释[D]. 抚州: 东华理工大学, 2014.
GAN Bo. The magnetic gradient tensor research and data interpretation[D]. Fuzhou: East China University of Science and Technology, 2014(in Chinese).
- [4] 迟铨, 吕俊伟. 磁梯度张量系统结构的比较分析[J]. 指挥控制与仿真, 2019, 41(1): 46-49.
CHI Cheng, LYU Junwei. Comparative analysis of magnetic gradient tensor system structure[J]. Command Control and Simulation, 2019, 41(1): 46-49(in Chinese).
- [5] 邹嘉盛, 肖云, 孟宁, 等. 一种基于约束条件的重力

- 匹配导航算法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2020, 45(10): 1570-1577+1632.
- ZOU Jiasheng, XIAO Yun, MENG Ning, et al. A gravity matching navigation algorithm based on constraint [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2020, 45(10): 1570-1577+1632(in Chinese).
- [6] 陈垚宁, 肖云, 张锦柏, 等. 水下重力匹配导航适配性评价方法比较研究[J]. 大地测量与地球动力学, 2024, 44(7): 737-743.
- CHEN Kaining, XIAO Yun, ZHANG Jinbai, et al. Comparison of adaptive evaluation methods of underwater gravity matching navigation[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2024, 44(7): 737-743 (in Chinese).
- [7] 肖云, 张锦柏, 曹杰, 等. 多属性决策理论的重力匹配导航适配性分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, 48(7): 1089-1099.
- XIAO Yun, ZHANG Jinbai, CAO Jie, et al. Suitability analysis of gravity matching navigation based on multiple attribute decision making theory[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2023, 48(7): 1089-1099(in Chinese).
- [8] CLEM T R. Progress in magnetic sensor technology for sea mine detection[C]// Proceedings of Detection and Remediation Technologies for Mines and Minelike Targets II. Bellingham: SPIE, 1997, 3079: 354-371.
- [9] SCHMIDT P W, CLARK D A. The calculation of magnetic components and moments from TMI: a case study from the Tuckers igneous complex, Queensland [J]. Exploration Geophysics, 1998, 29(4): 609-614.
- [10] BEIKI M, QUERESHI D I. Potential-field tensor gradiometry and its applications in exploration geophysics[J]. Geophysics, 2011, 76(2): W1-W15.
- [11] BEIKI M, PEDERSEN L B, NAZI A. Vector analysis of magnetic gradient tensor data[J]. Geophysics, 2013, 78(3): L39-L50.
- [12] 王明, 郭志宏, 骆遥, 等. Tilt-Euler 方法在位场数据处理及解释中的应用[J]. 物探与化探, 2012, 36(1): 126-132.
- WANG Ming, GUO Zhihong, LUO Yao, et al. The application of Tilt-Euler deconvolution method to potential field data processing and interpretation [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2012, 36(1): 126-132(in Chinese).
- [13] 肖雄, 杨晓非, 欧阳君. 磁梯度张量在磁体测距中的应用研究[J]. 电子测量技术, 2013, 36(4): 15-19.
- XIAO Xiong, YANG Xiaofei, OUYANG Jun. Researching of applying magnetic gradient tensor in finding magnetic substance[J]. Electronic Measurement Technology, 2013, 36(4): 15-19(in Chinese).
- [14] 马国庆. 位场(重 & 磁)及其梯度异常自动解释方法研究[D]. 长春: 吉林大学, 2013.
- MA Guoqing. The study on the automatic interpretation methods of potentialfield (gravity & magnetic) and its gradient[D]. Changchun: Jilin University, 2013(in Chinese).
- [15] LI Q, LI Z, ZHANG Y, et al. Integrated compensation and rotation alignment for three-axis magnetic sensors array[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2018, 54(10): 1-11.
- [16] SUI Y, LI G, WANG S, et al. Compact fluxgate magnetic full-tensor gradiometer with spherical feedback coil [J]. Review of Scientific Instruments, 2014, 85(1): 014701.
- [17] ZHAO J. Study on technologies for HTS magnetic gradiometer[D] Changchun: Jilin University, 2011.
- [18] LIU K, SUI Y, CHENG H, et al. Magnetic dipole moment determination using near-field magnetic gradient tensor data[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2020, 18(7): 1169-1173.
- [19] 李青竹, 李志宁, 石志勇, 等. AFCM 聚类和张量不变量用于磁源多目标定位[J]. 光学精密工程, 2022, 30(20): 2523-2537.
- LI Qingzhu, LI Zhining, SHI Zhiyong, et al. Multi-target magnetic positioning with the adaptive fuzzy C-means clustering and tensor invariants[J]. Optics and Precision Engineering, 2022, 30(20): 2523-2537(in Chinese).
- [20] 张樱子, 秦肖雅, 王晨, 等. 超导磁梯度张量探头结构优化方法研究[J]. 低温与超导, 2023, 51(10): 13-18.
- ZHANG Yingzi, QIN Xiaoya, WANG Chen, et al. Research on structure optimization method of superconducting magnetic gradient tensor probe[J]. Cryogenics & Superconductivity, 2023, 51(10): 13-18(in Chinese).
- [21] 赵敏, 丁宁, 元小强, 等. 基于地磁异常成像的缺陷检测[J]. 无损检测, 2023, 45(4): 17-21.
- ZHAO Min, DING Ning, YUAN Xiaoqiang, et al. Crack inspection based on geomagnetic anomalies imaging[J]. Nondestructive Testing, 2023, 45(4): 17-21(in Chinese).
- [22] 康东, 张雨潇, 刘伟, 等. 采用模型测试区域磁异常信号的影响[J]. 天津科技, 2019, 46(1): 30-33.
- KANG Dong, ZHANG Yuxiao, LIU Wei, et al. Effect of magnetic anomaly signal in model test area[J]. Tianjin

- Science & Technology, 2019, 46(1): 30-33 (in Chinese).
- [23] 王林飞, 郭灿灿, 薛典军, 等. 磁梯度张量解析信号分析法及其在场源位置识别中的应用[J]. 地球物理学进展, 2016, 31(3): 1164-1172.
WANG Linfei, GUO Cancan, XUE Dianjun, et al. Analytic signals of magnetic gradient tensor and their application to estimate source location[J]. Progress in Geophysics, 2016, 31(3): 1164-1172(in Chinese).
- [24] 陶威, 张晓明, 张仑. 磁传感器阵列安装误差标定与补偿[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2021, 42(4): 368-372.
TAO Wei, ZHANG Xiaoming, ZHANG Lun. Installation error analysis and compensation of magnetic field tensor measurement array[J]. Journal of North University of China (Natural Science Edition), 2021, 42(4): 368-372(in Chinese).
- [25] 黄玉. 地磁场测量及水下磁定位技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2011.
HUANG Yu. Geomagnetic field measurement and study on underwater magnetic localization technology [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2011 (in Chinese).
- [26] 孙大为, 王仕成. 基于等值线匹配的巡航导弹地磁匹配方法研究[J]. 飞航导弹, 2009(9): 53-55.
SUN Dawei, WANG Shicheng. Research on geomagnetic matching method of cruise missile based on contour matching [J]. Aerodynamic Missile Journal, 2009(9): 53-55(in Chinese).
- [27] 邹嘉盛, 肖云, 孙爱斌, 等. 重力异常特征量与匹配导航算法关系研究[J]. 测绘科学, 2020, 45(10): 33-40.
ZOU Jiasheng, XIAO Yun, SUN Aibin, et al. Research on relationship between gravity anomaly feature quality and matching navigation algorithm[J]. Science of Surveying and Mapping, 2020, 45(10): 33-40(in Chinese).
- [28] 王博, 付梦印, 李晓平, 等. 水下重力匹配定位算法综述[J]. 导航与控制, 2020, 19(Z1): 170-178.
WANG Bo, FU Mengyin, LI Xiaoping, et al. Review of underwater gravity matching positioning algorithm [J]. Navigation and Control, 2020, 19(Z1): 170-178 (in Chinese).
- [29] 桂林, 武小悦. 部分可观测马尔可夫决策过程算法综述[J]. 系统工程与电子技术, 2008, 30(6): 1058-1064.
GUI Lin, WU Xiaoyue. Survey of algorithms for partially observable Markov decision processes[J]. Systems Engineering and Electronics, 2008, 30(6): 1058-1064(in Chinese).
- [30] 赵延龙, 滑楠, 于振华. 基于二次搜索的改进粒子群算法[J]. 计算机应用, 2017, 37(9): 2541-2546.
ZHAO Yanlong, HUA Nan, YU Zhenhua. Improved particle swarm optimization algorithm based on twice search[J]. Journal of Computer Applications, 2017, 37(9): 2541-2546(in Chinese).
- [31] 于梦馨, 刘波, 汤恩生. 改进粒子群算法优化 SVM 参数的遥感图像分类[J]. 航天返回与遥感, 2018, 39(2): 133-140.
YU Mengxin, LIU Bo, TANG Ensheng. Remote sensing image classification based on improved PSO support vector machine[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2018, 39(2): 133-140(in Chinese).
- [32] 迟铨, 王丹, 于振涛, 等. 磁梯度张量不变量约束条件下的两点定位方法[J]. 水下无人系统学报, 2023, 31(4): 582-587.
CHI Cheng, WANG Dan, YU Zhentao, et al. Two-point positioning method with magnetic gradient tensor invariant constraints[J]. Journal of Unmanned Undersea Systems, 2023, 31(4): 582-587(in Chinese).

(编辑:孟彬)