

磁异常检测方法研究现状及发展趋势

徐磊¹, 张志强^{1,*}, 林朋飞², 刘一飞¹, 林春生¹

(1. 海军工程大学 兵器工程学院, 湖北 武汉 430034;

2. 海军大连舰艇学院 水武与防化系, 辽宁 大连 430010)

摘要 作为一种被动检测目标的方法, 磁异常检测方法凭借其隐蔽性能好和抗干扰能力强的优势受到广泛的关注, 磁异常检测方法不断涌现, 应用范围也不断扩展。从信号特征选取的角度综述了2类磁异常检测方法的原理, 详细阐述了以 OBF (标准正交基)、MED (最小熵)、HOC (高阶过零) 3种检测方法为代表的磁异常检测方法研究现状, 分析了接下来的研究方向, 为磁异常检测研究提供参考。

关键词 磁异常检测; 磁目标检测; 信号特征

中图分类号 TH89

文献标识码 A

文章编号 2096-5753(2022)01-0066-07

DOI 10.19838/j.issn.2096-5753.2022.01.011

Research Status and Development Trend of Detection Method for Magnetic Anomaly

XU Lei¹, ZHANG Zhiqiang¹, LIN Pengfei², LIU Yifei¹, LIN Chensheng¹

(1. College of Weapons Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430034, China;

2. Department of Underwater weapons and Chemical Defense, PLA Dalian Naval Academy, Dalian 430010, China)

Abstract As a passive object detection method, the magnetic anomaly detection method has received widespread attention due to its good concealment performance and strong anti-interference capability. Various magnetic anomaly detection methods continue to emerge, and the range of application continues to expand. From the perspective of signal feature selection, the principles of two types of magnetic anomaly detection methods are reviewed. The research status represented by 3 detection methods of OBF (standard orthogonal basis), MED (minimum entropy), and HOC (high-order zero crossing) is described in detail. The future research trend is analyzed, which provides a reference for the study of magnetic anomaly detection.

Key words magnetic anomaly detection; magnetic target detection; signal characteristics

0 引言

被地磁场磁化后的铁磁性物体会产生感应磁场, 该磁场会影响恒定分布的地磁场, 这种引起地磁场产生异常的现象称为磁异常。磁异常检测是指利用磁测量设备通过采集目标区域的磁异常信息, 按照一定的方法对信息进行处理进而获得目标区域内磁性目标若干特性的技术。被广泛应用于水下或地下目标探测^[1-2]、航空磁测^[3]、导航定位、地

质矿产勘探、人道救援^[4]等诸多领域。

与声呐和雷达等主动检测方法相比, 磁异常检测技术是一种典型的被动无接触检测手段。一方面, 磁场在固液气3种形式的物质间传播时基本不会改变传播方向, 这种特性有助于保证检测的准确性, 而无论是声音、光线还是电磁波都会发生方向或者能量的变化; 另一方面, 磁异常检测技术是一种依赖地球磁场特性的无源检测方法, 基本没有天

收稿日期: 2021-10-26

作者简介: 徐磊 (1993-), 男, 博士生, 主要从事目标特性与信号感知技术研究。

*通信作者: 张志强 (1982-), 男, 博士, 副教授, 主要从事目标特性与信息感知技术研究。

气条件的限制, 不易被目标发现, 具有隐蔽性能好、抗干扰能力强的优势^[5]。凭借其独特的优势, 无论是军用领域还是民用领域, 磁异常检测技术都具有广阔的应用前景^[6]。

本文研究了磁目标检测方法, 从信号特征构建的角度出发, 阐述了 OBF 检测方法、MED 方法和 HOC 检测方法的检测原理, 综述了磁目标检测方法的研究进展, 总结了今后的发展趋势, 为接下来的研究提供参考。

1 磁异常检测的原理

对信号特征进行准确的提取和判断是磁目标检测方法的核心, 根据信号特征构建的对象, 检测方法主要分为 2 种类型: 一种是对目标信号建模,

分析目标信号的参量特征, 判断目标的存在性; 另一种是研究磁背景信号, 通过研究噪声的统计特性, 对比分析其与无目标时的信号差异, 利用噪声特征判断目标的存在性。

1.1 目标信号特征检测的原理

OBF 检测是基于目标信号特征检测的常用方法, 根据磁异常信号模型, 标量磁异常的信号序列可以利用 3 个互不相关的基函数通过线性组合表示出来, 经过斯密特正交化和归一化处理, 基函数转化为 OBF。分析发现 OBF 的能量值集中在某一段区域内, 因此根据标准正交基的函数性质, 计算出任意确定信号所对应的线性组合系数, 随后构建检验统计量, 判断信号序列中目标存在的可能性。其检测过程如图 1 所示。

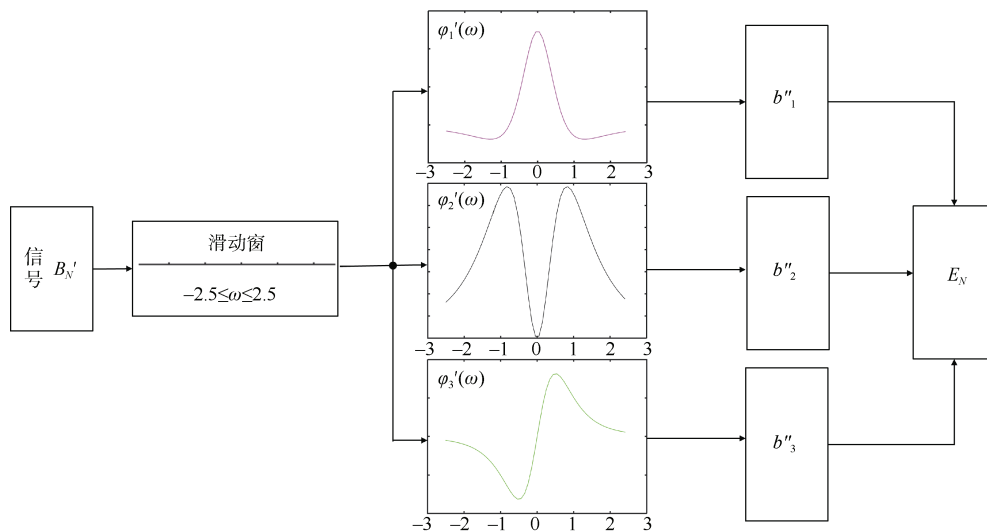


图 1 OBF 检测器的检测过程
Fig.1 Detection process of OBF detector

图 1 中: ω 是一个和磁测量系统实时运动有关的无量纲函数, 也称之为特征时间; $\phi_1'(\omega)$, $\phi_2'(\omega)$ 与 $\phi_3'(\omega)$ 线性无关的基函数; $b_n'' (n=1,2,3,4)$ 构建能量函数 E_N 的系数。OBF 的能量集中在滑动窗范围内, 在固定滑动窗的条件下, 对采集到的磁信号遍历求 E_N , 若磁性目标存在, E_N 明显变大, 超出预设门限值, 从而实现检测的目的。

1.2 噪声信号特征检测的原理

基于噪声信号特征的检测方法主要包括 MED 检测器和 HOC 检测器。

1) MED 检测原理。

磁异常信号较单纯的高斯白噪声信号而言, 有序程度较高, 而信息熵是评价信号有序化程度的一种参数, 信号越有序, 信息熵越小。无磁目标存在时, 环境噪声基本完全无序, 信息熵较大, 而磁目标的存在影响了原噪声的无序分布, 使信息熵发生改变。因此可以将测得的磁信号转化为对应的信息熵序列, 观察信息熵的变化趋势并设定阈值, 实现对磁目标的检测, 此即 MED 检测方法的原理, MED 检测器的构建如图 2 所示。

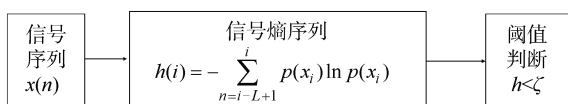


图 2 MED 检测器的检测过程
Fig.2 Detection process of MED detector

图 2 中： $h(i)$ 表示信息熵序列； $p(x_i)$ 表示 x_i 点处的概率密度函数值； L 表示滑动窗口的长度。和环境噪声相比，磁异常信号有序程度较高。因此，信息熵较小，在将磁信号转化为信息熵的过程中，一旦检测到磁目标的存在，信息熵会出现很明显的下降趋势，当信息熵值小于阈值 ζ 时，判定磁目标

存在，实现磁目标的检测。

2) HOC 检测原理。

过零数是指时域信号在去除线性分量后，其数值产生正负变化的总数。HOC 定义为利用 k 阶差分算子 ∇^k 求时域信号的 k 阶差分函数后，该差分函数的过零数。过零率定义为过零数与最大过零数的比值。显然高斯白噪声的高阶过零率应当是一组稳定值，任意时间段内不会发生明显的变化，然后当信号中混杂有磁异常信号时，高阶过零率必定会发生显著变化，这种差异定义为高级过零率差。HOC 检测器就是通过判断高阶过零率差来判断磁目标的存在性，其检测过程如图 3 所示^[7-8]。

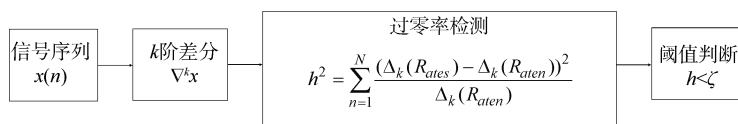


图 3 HOC 检测器的检测过程
Fig.3 Detection process of HOC detector

图 3 中： N 表示 k 阶差分函数的过零数目； $\Delta_k(R_{aten})$ 是实施检测前环境噪声的高阶过零率差； $\Delta_k(R_{ates})$ 是测量数据的高阶过零率差。稳定的噪声环境下，用于过零率检测的检验统计量是一个恒定值，基本保持不变，当有磁异常存在时，检验统计量会发生明显变化，当其变化值大于检测阈值时，判定磁目标存在，完成检测。

去除了恒定偏差和线性时间趋势，进一步提高了检测方法的信噪比^[11]。在高斯白噪声条件下，OBF 检测器具有最理想的检测性能，但在非高斯白噪声存在时，检测性能受到很大的影响。

2 磁异常检测方法研究现状

2.1 基于目标信号特征的检测方法

21 世纪初，以色列的 Lev Frumkis 团队首次提出了 OBF 检测理论，并不断拓展和完善其检测性能。首先研究了基于磁总场异常的 OBF 检测方法，利用 5 个正交基函数表示标量磁总场异常信号，构建了确定基函数下的能量函数，分析了垂直和水平分布磁传感器的差异，提高了磁异常信号的信噪比^[9]。随后，研究了基于磁总场梯度的 OBF 检测方法，将基函数由 5 个简化至 4 个，利用简化模型验证了检测方法的有效性和稳定性^[10]。紧接着，为了提到 OBF 检测方法的检测性能，对滑动窗、偏移常量和特征时间等核心参数进行了优化，

针对环境噪声问题，Sheinker 分析了地磁噪声的统计特性，得出其功率谱密度近似服从 $1/f^\alpha (0 < \alpha < 2)$ 分布的结论，并提出基于 AR 模型的白化滤波方法，即先对测量信号进行 AR 滤波，随后利用 OBF 检测方法完成检测，仿真与实测数据证明了白化效果的性能^[12]。之后，噪声白化方法不断得到扩展，OBF 检测方法也不断地改进，应用范围也越来越广。2015 年，Pepe 等^[13]通过多级模型对磁异常进行泛化，利用广义似然比测试实现了 OBF 检测方法在多磁目标检测中的应用。

林春生课题组提出了 4 种方法：第 1 种是研究磁异常信号的频域特征，构建在频域内的 Parks-McClellan 最优 FIR 滤波器，滤波器可以有效地保存原信号的频域数据，使环境噪声高斯化^[14]；第 2 种是利用小波分解的方法分解磁信号，保留其低频分量，去除高频噪声，随后利用 OBF 检测器对低频分量进行检测分析^[15]；第 3 种是利用 BP 神

经网络滤除环境噪声, 随后在采用 OBF 检测^[16]; 第 4 种是提出利用信号子空间的投影长度来对目标进行检测的方法, 以投影长度为检测统计量, 对测量数据进行检测, 判断目标的存在性, 有效地减小噪声的影响^[17]。2014 年, 国防科技大学的聂新华详细分析了 OBF 检测方法的优势和不足^[18], 针对环境噪声和电路噪声主要来源是 $1/f$ 分形噪声的特点, 提出将 LMS 算法与 AR 模型相融合, 构成自适应 AR 模型的白化滤波方法, 实现对噪声的白化, 并构建了自适应滤波器与 OBF 检测方法相结合的改进磁异常检测系统, 实现了磁目标的检测。基于 $1/f$ 分形噪声具有非平稳性、自相似性和长程相关性的特点, 又提出了基于小波变换的 OBF 自适应检测方法, 该方法首先利用离散小波变换处理环境噪声, 使噪声趋于白化, 随后通过 OBF 检测方法处理信号, 完成能量值的计算和磁异常检测, 有效提高了磁检测的检测效果^[19-20]。陈敏研究了自适应 AR 白化滤波器, 由于环境噪声是不断变化的, 并不服从单一功率谱密度的变化规律, 固定的 AR 滤波器滤波效果并不理想。针对此问题, 提出了用自适应噪声抵消器对信号进行预处理, 提高信噪比后再进行白化率与磁检测, 实验表明这种带有噪声抵消器的 OBF 检测算法检测微弱信号的能力更强, 使信噪比提高了 7 dB^[21]。在环境噪声处理方面, 杨勇^[22]、郑鑫^[23-24]等研究了基于 FIR 低通滤波的 OBF 检测方法, 可以实现在信噪比较低情况下的磁异常检测。之后, 周晗对比分析了基于 AR 模型的匹配滤波器与非抽样离散小波变换滤波器, 研究发现两种方法的检测效果受目标特征时间与小波基函数的影响较大, 为了避免这类问题, 提出了基于 EMD 能量检测器的方法。该检测器的优势在于不需要任何先验信息, 并且可以根据磁异常信号的特点自适应调整分析精度, 性能更加稳定^[7, 25]。2018 年, 万成彪将卡亨南-洛维展开式引入到 OBF 检测中来, 提出利用卡亨南-洛维展开修正标准正交基函数, 构建了 KLE-OBF 检波器, 实现了有色噪声条件下的有效磁检测, 磁目标检测概率提升到了 80%左右^[26]。刘舒畅^[27]提出了一种基于神经网络的 OBF 检测方法, 利用神经网络结构评估信号的统计特性和磁矩特性, 随后利用适当的神经层数

和节点数构建最优网络, 实现对磁异常的检测, 该方法在不同噪声指数的有色高斯噪声下具有很好的检测性能。

对 OBF 检测方法的研究不仅仅是对非高斯噪声进行处理, 也有学者对基函数的构建、特征参数的选择以及检测应用条件等方面进行了研究。范瑶^[28]研究了磁异常总场 OBF 检测方法后提出基于磁异常梯度信号的 OBF 检测方法以及改进方法, 重新构建了基于白化滤波的检测器, 提高了检测效果。刘洋对构建能量函数的系数进行了研究, 分析了系数在椭球面上的空间分布约束, 根据约束关系可以有有效的修正系数值, 提高了磁目标检测的准确性, 降低了虚警率^[29]。秦怡杰等^[30]针对单向磁场梯度在短距离内的变化很小的问题, 进一步提出了一种全磁梯度 OBF 函数, 从信号能量的角度提高了信号的信噪比该方法的信噪比有了很大的提高, 在航磁探测的实际应用中具有重要价值。金镓镓等^[31]引入双磁梯度仪框架来满足磁异常定位的需求, 提出了一种改进的正交基函数(OBF)进行磁张量收缩分解, 通过增加磁梯度仪的基线长度, 也可以提高磁异常检测的信噪比。夏明瑶等^[32]分别基于线性约束最小方差准则和广义似然比检验, 通过考虑信号和噪声信息优化基函数, 提出了一种替代检测方案。使用模拟数据和测量数据的实验结果表明, 与原始 OBF 方法相比, 本方法可以显著提高检测性能。

OBF 检测器只有在理想高斯白噪声条件下才能有效工作, 这极大地限制了检测器的应用, 因此其他基于目标信号特征的检测方法也得到了研究, 如随机共振检测、PCA (主成分分析) 检测等检测方法。Sheinker 选定一个基函数作为主要检测对象, 利用主成分分析法完成磁检测过程, 这种方法的突出优点就是简单高效^[33]。为了扩展磁检测的应用范围, 提高磁异常检测性能, 万成彪^[34]、李启飞^[35]提出了基于随机共振方法的磁异常检测器, 不同于传统方法中对噪声的抑制, 这种检测器有助于增强噪声, 并将噪声转化为有助于检测的有用信号, 这对于提高磁异常信号的检测概率有很大的帮助。赵冠一^[36]、张珂瑜^[37]等人将模式识别方法引入到磁异常信号检测中, 提出利用神经网络的方法对目标信号进行分类和提取, 有效提升了对磁

异常目标的检测性能。为了提高水下目标的信号强度,于振涛^[38]、戴中华^[39]等人提出了自适应小波增强的方法,通过分析磁异常信号的频带方程,利用小波分解计算和重构磁异常信号,实现对磁异常信号的增强,仿真表明,该方法将磁异常信号的信噪比提高了 10 dB 左右。

基于信号特征的检测方法不断得到扩展,特别是随着传感器技术、微机电技术、人工技术等新型技术的出现,检测性能不断提高,特别是 OBF 检测方法,该方法在高斯噪声下具有比较突出的优势。不过现有 OBF 检测方法的理论基础主要集中在磁总场检测,磁总场是典型的标量场,损失了很多矢量信息,研究基于磁矢量的 OBF 检测方法既可以发挥该类方法的突出优势,还可以包含磁异常的矢量信息,具有重要的应用价值。

2.2 基于噪声信号特征的检测方法

基于目标信号特征的检测方法依赖于对目标的先验,然而在实际应用中,很难充分掌握磁目标特征,这就限制了磁异常检测的效果。为了提高磁异常检测的性能,提出基于噪声信号特征的检测方法,这种方法是从背景噪声的角度出发构建决策统计量,主要包括 MED 检测方法和 HOC 检测方法。

在 MED 检测方法的研究方面,Sheinker 等人于 2008 年提出了最小熵检测方法,该方法通过研究噪声的统计特性,根据其时序平稳且信息熵稳定的特点构建 MED 检测器,该方法的优势在于不需要采集目标区域的先验信息,可以实现在较低信噪比条件下的磁目标检测^[40]。随后,唐颖等人提出了一种基于差分信号的熵检测器,利用 2 个磁力仪计算差分信号,通过核平滑方法对信号进行处理,差分后的磁异常信号的熵值变化更加明显,有效降低了虚警概率^[41]。荆秋等人提出了一种混合微分的最小熵检测方法,通过相干差和同步差抑制信号中的共模噪声,提高了磁目标信号的信噪比,具有良好的检测性能^[42]。

在 HOC 检测方法的研究方面,Sheinker 等人于 2012 年提出了在频域基于高阶过零的磁异常检测方法,该方法通过分析磁背景场的分布特性,计算测量信号 2 阶差分序列的过零数,并以高阶过零率构建了检测统计量,实验结果表明,HOC 检测

方法可以实现在较低信噪比条件下的磁检测^[8]。袁园等人针对背景模型构建复杂且无法满足实际需求的问题,对磁异常检测进行快速光谱分析,提出了一种二维交叉方法来识别光谱中的突变区域,该方法的优势在于不需要先验信息,能快速准确地识别异常区域,实现磁异常检测^[43]。周家新^[44]等人详细分析了 HOC 检测方法的实现过程,并针对复杂环境下的 HOC 检测阶数过低的问题,将信号差分序列扩展至五阶,提出了自适应 HOC 检测器,有效地实现了远距离磁目标检测。

3 发展趋势

磁异常检测方法不断成熟和发展,越来越受到国内外军事和民用各个领域的重视,深入研究磁异常检测技术具有重要的研究价值。

3.1 矢量磁信号特征的应用

磁异常检测方法逐渐从磁标量向磁矢量方向发展,这一过程可划分为磁总场检测阶段、磁总场梯度检测阶段、磁分量场检测阶段和磁张量场检测阶段。进行磁信号的特征选取,标量磁异常检测损失了磁目标的方向信息,所含磁异常信号信息量较少,磁矢量的应用将是今后的重要发展方向。磁张量探测是磁异常探测最新的发展阶段,具有受系统姿态变化影响小、受环境干扰小等独特优势,获取目标信息十分丰富且基本不受磁背景总场、磁总场梯度和磁分量场的影响,逐渐发展成为地球资源勘探、航空探测和军事侦查等领域的研究热点,应用前景非常广阔。而 OBF 检测是高斯环境下较优的检测方法,因此研究基于磁张量的矢量 OBF 检测方法,结合两者的优势,具有广阔的应用前景。

3.2 智能优化算法的引入

基于目标信号的磁异常检测方法与基于噪声信号的磁异常检测方法各有优势,在不同的使用环境中需要选择最优的检测算法,甚至在相同的环境因检测时间不同,检测算法的优劣也有很大的变化,因此引入量子算法、粒子群算法、遗传算法等智能优化算法研究自适应信号特征选取和检查方法。一方面将两者的优势相结合进一步提高检测方法的检测性能,降低虚警率;另一方面可以根据环境变化自适应选择最优的检测手段,分析磁异常特

点后智能确定最佳的检测方法,使检测手段智能化是今后的重要趋势。

3.3 环境噪声的处理

不论是目标信号特征检测还是噪声信号检测,都会涉及到无关噪声的处理问题,特别是非高斯噪声的处理。同时,在噪声处理方面,由于高斯白噪声是一种研究比较深入,处理方法比较成熟的噪声,将环境噪声转化为高斯噪声有助于对信号进行提取和检验,因此研究噪声白化方法将非高斯噪声转化为高斯噪声是一个非常重要的研究方向,当然环境中含有的噪声种类繁多,研究其他合理高效的噪声处理方法也是一个重要课题。

4 结束语

随着磁传感器技术的发展和新技术领域的出现,磁异常检测逐步由标量磁总场检测向矢量磁分量检测过渡,由全域检测向局域定位过渡,进而实现对磁目标发现即定位,确定磁性目标的运动参数,甚至利用磁特征参数反演物体的体积、大小、尺寸等形态特点,极大地扩展了磁检测的功能。作为研究磁性目标相关信息的重要技术手段,特别是在探测深海或地下磁性掩埋物等方面,磁异常检测具有很好的主动性和隐蔽性等独特优势,在目标探测定位过程中发挥着不可替代的作用。

参考文献

- [1] 淳明浩,姚志广,杨肖迪,等. 基于磁异常检测的海底管道探测技术研究与应用[J]. 海岸工程, 2020, 39 (2): 94-102.
- [2] 姚宗中,管英强,崔新玲. 水下未爆弹磁法探测的实际运用[C]//全国危险物质与安全应急技术研讨会论文集(上). 重庆: 全国危险物质与安全应急技术研讨会, 2011: 580-583.
- [3] LI C, HUANG S, WEI D, et al. Detection range of airborne magnetometers in magnetic anomaly detection[J]. Journal of Engineering Science and Technology Review, 2015, 8 (4): 105-110.
- [4] DAMES P M, SCHWAGER M, RUS D, et al. Active magnetic anomaly detection using multiple micro aerial vehicles[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2016, 1 (1): 153-160.
- [5] ZHOU J, CHEN J, SHAN Z. Spatial signature analysis of submarine magnetic anomaly at low altitude[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 53 (12): 6001-6007.
- [6] TCHERNYCHEV M, SNYDER D. Open Source magnetic inversion programming framework and its practical applications[J]. Journal of Applied Geophysics, 2007, 61 (3): 184-193.
- [7] 周晗. 巨磁阻抗磁传感器关键技术及应用研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2017.
- [8] SHEINKER A, GINZBURG B, SALOMONSKI N, et al. Magnetic anomaly detection using high-order crossing method[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2012, 50 (4): 1095-1103.
- [9] GINZBURG B, FRUMKIS L, KAPLAN B. Processing of magnetic scalar magnetometer signals using Orthonormal Function[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2002, 102 (1): 67-75.
- [10] GINZBURG B, FRUMKIS L, KAPLAN B. An efficient method for processing scalar magnetic gradiometer signals[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2004, 114 (1): 73-79.
- [11] FRUMKIS L, GINZBURG B, SALOMONSKI N, et al. Optimization of scalar magnetic gradiometer signal processing[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2005, 121 (1): 88-94.
- [12] SHEINKER A, SHKALIM A, SALOMONSKI N, et al. Processing of a scalar magnetometer signal contaminated by 1f noise[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2007, 138 (1): 105-111.
- [13] PEPE P, ZOZOR S, ROUVE L, et al. Generalization of GLRT-based magnetic anomaly detection[C]// 2015 23rd European Signal Processing Conference. New York: IEEE, 2015: 1930-1934.
- [14] 张坚,林春生,邓鹏,等. 非高斯背景噪声下的微弱磁异常信号检测算法[J]. 海军工程大学学报, 2011, 23 (4): 22-26.
- [15] 张坚,林春生,邓鹏,等. 基于小波域 OBF 分解的磁异常信号检测算法[J]. 弹箭与制导学报, 2011, 31 (6): 187-189, 196.
- [16] 张坚,林春生,黄凡. OBF 分解与 BP 网络在船舶磁场信号检测中的应用[J]. 船电技术, 2011, 31 (7): 13-16.
- [17] 庞学亮,林春生,张宁. 一种基于磁偶极子模型的潜艇信号检测方法[J]. 海军工程大学学报, 2011, 23 (1): 73-76.
- [18] NIE X, PAN Z, ZHANG D, et al. Energy detection based on undecimated discrete wavelet transform and its application in magnetic anomaly detection[J]. PLoS One, 2014, 9 (10): 110829.

- [19] NIE X, PAN Z, ZHANG D, et al. Wavelet-based adaptive detection of magnetic anomaly signal contaminated by 1f noise[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014 (599-601): 1812-1815.
- [20] NIE X, PAN Z, ZHANG W. Wavelet based noise reduction for magnetic anomaly signal contaminated by 1f noise[J]. Advanced Materials Research, 2014 (889-890): 776-779.
- [21] 陈敏, 潘仲明. 磁异信号自适应检测算法[J]. 传感技术学报, 2014, 27 (7): 916-921.
- [22] 杨勇, 石超, 陈正想. 基于 FIR 与正交基分解的磁性目标检测方法[J]. 舰船电子工程, 2015, 35 (1): 56-58, 157.
- [23] ZHENG X, XU Q, LI Q, et al. An orthonormalized basis function based narrow band filtering algorithm for magnetic anomaly detection[C]// 2016 9th International Congress on Image and Signal Processing, Bio-medical Engineering and Informatics. Datong: CISP-BMEI, 2016.
- [24] ZHENG X, XU Q, ZHOU M, et al. An orthonormalized basis function algorithm based on wavelet analysis for magnetic anomaly detection[C]//2017 10th International Congress on Image and Signal Processing, Bio-medical Engineering and Informatics. Datong: CISP-BMEI, 2017.
- [25] ZHOU H, PAN Z, ZHUO Z. Magnetic anomaly detection with empirical mode decomposition trend filtering[J]. IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics Communications and Computer Sciences, 2017, 100 (11): 2503-2506.
- [26] 万成彪. 磁异信号检测理论与方法研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2018.
- [27] LIU S, HU J, LI P, et al. Magnetic anomaly detection based on full connected neural network[J]. IEEE Access, 2019, 7: 182198-182206.
- [28] FAN L, KANG C, HU H, et al. Gradient signals analysis of scalar magnetic anomaly using orthonormal basis functions[J]. Measurement Science and Technology, 2020, 31 (11): 115105.
- [29] YANG L, ZHONGYAN L, MENGCHUN P, et al. Magnetic anomaly signal space analysis and its application in noise suppression[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2019, 16 (1): 130-134.
- [30] QIN Y, LI K, YAO C, et al. Magnetic anomaly detection using full magnetic gradient orthonormal basis function[J]. IEEE Sensors Journal, 2020, 20 (21): 12928-12940.
- [31] JIN H, GUO J, WANG H, et al. Magnetic anomaly detection and localization using orthogonal basis of magnetic tensor contraction[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2020, 58 (8): 5944-5954.
- [32] HU M, DU C, WANG H, et al. Optimized basis functions under Gaussian color noise for magnetic target signal detection[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2021, 18 (5): 806-810.
- [33] SHEINKER A, MOLDWIN M B. Magnetic Anomaly Detection (MAD) of ferromagnetic pipelines using principal component analysis[J]. Measurement Science and Technology, 2016, 27 (4): 1-7.
- [34] WAN C, PAN M, ZHANG Q, et al. Magnetic anomaly detection based on stochastic resonance[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2018, 278: 11-17.
- [35] 李启飞, 吴芳, 韩蕾蕾, 等. 磁异常信号奇异值分解的随机共振检测方法[J]. 探测与控制学报, 2020, 42 (2): 24-29.
- [36] 赵冠一. 面向航空磁异常探测的干扰抑制与目标检测技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
- [37] 张珂瑜. 微弱磁异常信号特征分析与检测方法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2019.
- [38] 于振涛, 王丹, 许素芹, 等. 水下目标航空磁异常自适应小波增强方法[J]. 探测与控制学报, 2020, 42 (1): 35-38.
- [39] 戴忠华, 周穗华, 单珊. 基于小波能量谱的舰船磁异常检测算法[J]. 探测与控制学报, 2020, 42(3): 14-19.
- [40] SHEINKER A, SALOMONSKI N, GINZBURG B, et al. Magnetic anomaly detection using entropy filter[J]. Measurement Science and Technology, 2008, 19 (4): 45205.
- [41] TANG Y, LIU Z, PAN M, et al. Detection of magnetic anomaly signal based on information entropy of differential signal[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2018, 15 (4): 512-516.
- [42] WANG Z, QIU J, XIE D, et al. Weak magnetic anomaly signal detection based on the entropy of mixed differential signal[J]. AIP Advances, 2021, 11 (1): 015013.
- [43] YUAN Y, WANG Q, ZHU G. Fast hyperspectral anomaly detection via high-order 2-D crossing filter[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2015, 53 (2): 620-630.
- [44] 周家新, 孙磊, 范龙, 等. 航空磁异常探测中的自适应高阶过零检测器[J]. 兵工学报, 2020, 41 (12): 2514-2522.

(责任编辑: 张曼莉)