

DOI: 10.13382/j.jemi.B2104571

磁异常探测中载体干扰磁场 RLS 补偿方法^{*}

吕禹萱^{1,2} 雷华明^{1,2}(1. 上海交通大学仪器科学与工程系 上海 200240; 2. 上海交通大学海洋智能装备与
信息系统教育部重点实验室 上海 200240)

摘要:针对磁异常探测中载体干扰磁场会极大的影响测量结果的问题,提出一种基于 RLS 算法的磁异常探测载体干扰磁场补偿方法。首先,对磁异常探测中的干扰进行分类,建立测量模型;然后,将模型转换为标准多元线性方程,通过正交约束和线性约束降低共线性,经 RLS 算法求解模型参数,并进行模型仿真验证算法正确性;最后,进行有无异常载体有限元仿真,通过 RLS 算法解算无异常时仿真数据获取补偿参数,并用补偿参数对含异常仿真数据进行补偿。结果表明:经补偿误差显著降低,无磁异常实测实验的补后改善比为 10.3,该方法可用于磁异常探测中的载体干扰磁场补偿,有效提升了磁异常探测的抗干扰能力,对掩埋物检测、矿产勘探、反潜等工作都具有重要意义。

关键词:载体干扰;磁异常探测;RLS 算法;干扰补偿

中图分类号: TN382; TP206⁺.1 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 510.40

RLS method for carrier interference compensation in magnetic anomaly detection

Lyu Yuxuan^{1,2} Lei Huaming^{1,2}

(1. Department of Instrumentation Science and Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China;

2. Key Laboratory of Ocean Intelligent Equipment and Information System of Ministry of Education,
Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: Focusing on the problem that magnetic interference of carrier in magnetic anomaly detection will greatly affect the measurement results, a carrier interference magnetic field compensation method for magnetic anomaly detection based on RLS algorithm is proposed. First, classify the interference in the magnetic anomaly detection and establish a measurement model. Then, convert the model to a standard multiple linear equation. Reduce collinearity through orthogonal and linear constraints. Solve the model parameters through the RLS algorithm and the correctness of the algorithm is verified by model simulation. Finally, carry out finite element simulation of the carrier with and without anomalies. The RLS algorithm is used to calculate the compensation parameters from the simulation data without abnormality. The calculated compensation parameters are used to compensate the abnormal simulation data. The results show that the compensation error is significantly reduced. The signal improvement ratio after compensation for experiment without magnetic anomalies is 10.3. This method can be used for carrier interference magnetic field compensation in magnetic anomaly detection. It effectively improves the anti-interference ability of magnetic anomaly detection, and is of great significance to buried object detection, mineral exploration, anti-submarine and other works.

Keywords: carrier interference; magnetic anomaly detection; RLS algorithm; interference compensation

0 引言

随着科学技术的发展,磁异常探测在工业、矿藏、考古、军事等领域都发挥着重要的作用。磁异常探测是一种通过高精度磁场测量对磁异常信号进行探测从而对引起磁异常的物体的位置和磁场强度进行判断的被动目标探测方法,可用于水面舰船监测^[1]、运动目标检测与识别^[2,4]、掩埋目标勘测、矿物勘探^[5]、考古^[6]等领域。

磁异常探测常通过载体搭载传感器实现,例如航磁探测中用到的飞机,水下磁异常探测中用到的自主式水下航行器(autonomous underwater vehicle, AUV)等。一方面,三轴磁传感器存在正交误差,当磁场方向与传感器方向发生改变时,会产生虚假的磁异常信号;另一方面,传感器所搭载的载体在磁场中受到磁化产生附加磁化场。这些磁场与目标磁异常信号叠加,给磁异常信号的探测识别带来了很大的挑战,因此需要对载体的干扰磁场进行补偿。

载体干扰补偿方法的研究根据载体的不同分为航磁补偿与水下载体补偿两类。航磁测量中载体运动范围大,地磁总场变化大,载体的运动更为快速灵活。航磁补偿多基于 Tolles-Lawson 方程(T-L 方程),局部线性回归的自适应算法^[7]具有比非自适应方法更好的补偿结果,但自适应方法可能会引起磁异常信号扭曲。非线性的花粉授权算法(flower pollenation algorithm, FPA)^[8]可以实现对铁磁性干扰的补偿,具有参数调整少、全局搜索能力强等优点,但未考虑传感器转向差的影响。此外,深度自动编码器(deep auto-encoder, DAE)^[9]、主成分分析法^[10]以及多模型^[11]等方法,均可降低 T-L 模型中参数共线性。梯度下降迭代的无迹卡尔曼滤波算法^[12]可以避免线性模型拟合不足与神经网络过拟合的问题,但缺乏复杂噪声适应性。相比之下,水下磁探测的探测范围相对较小,磁场变化较小,载体的速度和姿态变化都比较慢。在水下磁异常探测过程中,为了补偿载体干扰磁场,提出了基于双磁传感器进行探测的差分补偿方法^[13]和基于集合经验模态分解(ensemble empirical mode decomposition, EEMD)算法^[14]的异常信号分析处理方法,可以提高磁异常探测的精度,但是未考虑参数共线性问题,基于遗传算法(genetic algorithm, GA)等神经网络的研究也取得了进展,并被证明可用于 AUV,实验中记录的最佳标准偏差约为 1 000 nT^[15],这表明磁异常信号小于该幅度难以被辨别。

针对磁异常探测中载体干扰磁场补偿问题,文中提出了一种用递归最小二乘(recursive least squares, RLS)算法补偿的方法。在对磁异常探测中干扰分类的基础上,建立小区域范围内磁异常探测中载体干扰磁场理论

模型,将模型转换为标准多元线性方程,用 RLS 算法对模型中的参数进行求解,并通过线性约束与正交约束降低参数共线性。有限元仿真与实验证明理论模型与 RLS 算法可行,磁异常探测过程仿真进一步证明算法可以补偿磁异常探测中载体干扰磁场,实现磁异常探测,提高磁异常探测的精度。

1 干扰分析与测量磁场建模

1.1 干扰磁场组成

磁异常探测中载体干扰磁场补偿目的是去除磁传感器探测结果中包含的地磁干扰信号与载体在地磁环境中运动所产生的磁场干扰。地磁干扰信号是指传感器方向相对磁场方向发生改变时,由三轴磁传感器转向差引起的虚假磁异常信号。载体产生的干扰磁场主要可分为两个部分:1)载体上的硬磁材料在生产加工以及后续存放过程中,在地磁场的作用下发生磁化,保留一定的剩磁,即永久磁化,同时,载体上可能携带的永磁体也会产生磁场,这类磁场的方向大小取决于永磁体与传感器的相对位置,与地磁场方向大小无关;2)载体上的软磁材料在地磁场作用下发生感应磁化,产生与地磁场方向大小相关的感应磁场。

1.2 磁场建模

设测量区域的国际地磁参考场(international geomagnetic reference field, IGRF)值为 $\mathbf{B}_0 = (B_x \ B_y \ B_z)^T$,地磁场对传感器的感应磁化矩阵为 \mathbf{A}_0 ,永久磁化磁场和永磁源磁场之和为 \mathbf{b}_0 ,载体坐标系与磁传感器坐标系之间的转换矩阵为 \mathbf{Q} ,载体姿态矩阵为 \mathbf{R} ,在载体运动过程中,传感器测量磁场值 $\mathbf{B}' = (B'_x \ B'_y \ B'_z)^T$ 应该满足:

$$\mathbf{B}' = \mathbf{Q}[(\mathbf{A}_0 + \mathbf{E})\mathbf{R}\mathbf{B}_0 + \mathbf{b}_0] \quad (1)$$

其中, \mathbf{E} 为单位矩阵。

由于三轴磁传感器本身存在传感器加工工艺引入三轴之间灵敏度、零位的差异以及三轴安装不正交,灵敏度误差、零位误差与不正交度误差统称为转向差。设传感器 X、Y、Z 轴三轴的灵敏度分别为 S_x, S_y, S_z ,零位误差分别为 d_x, d_y, d_z ,不正交角度分别为 η, β, γ ,对应矩阵分别记为 \mathbf{K}, \mathbf{d} ,则引入转向差的传感器测量值 $\mathbf{B}'' = (B''_x \ B''_y \ B''_z)^T$ 与理论的传感器测量值 \mathbf{B}' 之间的关系满足:

$$\mathbf{B}'' = \mathbf{K}\mathbf{B}' + \mathbf{d} = \mathbf{K}\mathbf{Q}[(\mathbf{A}_0 + \mathbf{E})\mathbf{R}\mathbf{B}_0 + \mathbf{b}_0] + \mathbf{d} \quad (2)$$

其中, $\mathbf{K} = \begin{pmatrix} S_x & \beta & \eta \\ 0 & S_y & \gamma \\ 0 & 0 & S_z \end{pmatrix}, \mathbf{d} = \begin{pmatrix} d_x \\ d_y \\ d_z \end{pmatrix}$,将 \mathbf{K} 记为 $\mathbf{E} +$

$\delta\mathbf{K}, \mathbf{Q}$ 记为 $\mathbf{E} + \delta\mathbf{Q}, \mathbf{E}$ 为单位矩阵。通常不正交度误差和

灵敏度误差以及磁传感器与载体坐标系间的差距都很小,载体感应磁化远小于 IGRF 值,可以认为 $\delta\mathbf{K}$ 中元素 δK_{ij} 、 $\delta\mathbf{Q}$ 中元素 δQ_{ij} 与 \mathbf{A}_0 中元素 A_{ij} 满足 $|\delta K_{ij}| = |E_{ij} - K_{ij}| \ll 1$, $|\delta Q_{ij}| = |E_{ij} - Q_{ij}| \ll 1$, $|A_{ij}| \ll 1$, 其中 $i, j = 1, 2, 3$, E_{ij} 、 K_{ij} 、 Q_{ij} 分别为 \mathbf{E} 、 \mathbf{K} 与 \mathbf{Q} 中元素。由于 \mathbf{K} 、 \mathbf{Q} 、 \mathbf{A}_0 、 \mathbf{b}_0 和 \mathbf{d} 都是固定值,故而可以将式(2)表示为:

$$\mathbf{B}'' = (\mathbf{A} + \mathbf{E})\mathbf{R}\mathbf{B}_0 + \mathbf{b} \quad (3)$$

$$\text{其中, } \mathbf{A} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix}, \mathbf{b} = \begin{pmatrix} b_x \\ b_y \\ b_z \end{pmatrix}, \text{满足:}$$

$$\mathbf{A} = (\mathbf{E} + \delta\mathbf{K})(\mathbf{E} + \delta\mathbf{Q})(\mathbf{A}_0 + \mathbf{E}) - \mathbf{E} \approx \delta\mathbf{K} + \delta\mathbf{Q} + \mathbf{A}_0 \quad (4)$$

$$\mathbf{b} = (\mathbf{E} + \delta\mathbf{K})(\mathbf{E} + \delta\mathbf{Q})\mathbf{b}_0 + \mathbf{d} \approx (\mathbf{E} + \delta\mathbf{K} + \delta\mathbf{Q})\mathbf{b}_0 + \mathbf{d} \quad (5)$$

载体姿态角包括横摇角 α 、俯仰角 θ 和航向角 φ , 姿态角与载体姿态矩阵 \mathbf{R} 之间的关系如下:

$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha & \sin\alpha \\ 0 & -\sin\alpha & \cos\alpha \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos\theta & 0 & \sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta & 0 & \cos\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos\varphi & \sin\varphi & 0 \\ -\sin\varphi & \cos\varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (6)$$

其中, α 取值范围为 $[0, 2\pi)$, θ 取值范围为 $[-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}]$, φ 取值范围为 $(-\pi, \pi]$ 。

在实际测量中测量区域地磁场真实磁场值还存在与 \mathbf{B}_0 正交的偏差 $\Delta\mathbf{f} = (f_x \ f_y \ f_z)^T$, 因此 \mathbf{B}'' 可进一步表示为:

$$\mathbf{B}'' = (\mathbf{A} + \mathbf{E})\mathbf{R}(\mathbf{B}_0 + \Delta\mathbf{f}) + \mathbf{b} \quad (7)$$

由于 \mathbf{A} 中分量 a_{ij} 满足 $|a_{ij}| \ll 1$, 式(7)等价于:

$$\mathbf{B}'' = (\mathbf{A} + \mathbf{E})\mathbf{R}\mathbf{B}_0 + \mathbf{R}\Delta\mathbf{f} + \mathbf{b} \quad (8)$$

设磁异常值为 $\Delta\mathbf{B}$, 实际测量中, 磁异常信号是与地磁场叠加的, 故而测量过程的理论模型为:

$$\mathbf{B}'' = (\mathbf{A} + \mathbf{E})\mathbf{R}(\mathbf{B}_0 + \Delta\mathbf{B}) + \mathbf{R}\Delta\mathbf{f} + \mathbf{b} \quad (9)$$

磁异常值反解模型应为:

$$\Delta\mathbf{B} = \mathbf{R}^{-1}(\mathbf{A} + \mathbf{E})^{-1}(\mathbf{B}'' - \mathbf{b} - \mathbf{R}\Delta\mathbf{f}) - \mathbf{B}_0 \quad (10)$$

其中, 传感器测量值 \mathbf{B}'' 、姿态矩阵 \mathbf{R} 、标准地磁场值 \mathbf{B}_0 为可直接获取的数据, 矩阵 \mathbf{A} 、 $\Delta\mathbf{f}$ 及 \mathbf{b} 为待求解的补偿参数矩阵, 通过获取其中元素的值即可通过式(10)对磁异常信号进行反解。

根据式(9)、(10)可知, 去除干扰实现磁异常探测, 首先应获取补偿参数, 即在被测区域内无磁异常的位置按照“8”字旋转法或“360°”旋转法^[16]进行补偿运动, 获取无磁异常的测量数据, 按照式(8)进行补偿参数递归求解。其次让载体经过有磁异常的区域进行测量, 并按

式(10)所示磁异常反解模型对磁异常进行求解, 实现磁异常探测。

1.3 RLS 补偿算法

RLS^[17-21]是一种通过递推形式求解多元线性方程最小二乘解的方法, 可以实时在线的建立起输入与输出之间的映射关系。最小二乘求解多元线性方程即为对已知的 x 和 y 的一系列数据, 按照:

$$y = \mathbf{x}\mathbf{w} \quad (11)$$

实现对参数 $\mathbf{w} = (w_0 \ w_1 \ \dots \ w_n)^T$ 的估计的过程, 其中 $\mathbf{x} = (1 \ x_1 \ \dots \ x_n)$, 用矩阵表示即为:

$$\begin{pmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_k \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \phi_1^T \\ \vdots \\ \phi_k^T \end{pmatrix} \mathbf{W} \quad (12)$$

其中, k 代表观测数据共有 k 组, $\phi_k^T = (1 \ x_1^i \ \dots \ x_n^i)$, $\mathbf{W} = (w_0 \ w_1 \ \dots \ w_n)^T$ 代表第 i 组数据的输入观测值, y_i 表示第 i 组数据的输出观测值。令 $\Phi_k = (\phi_1^T \ \dots \ \phi_k^T)^T$, $\mathbf{Y}_k = (y_1 \ \dots \ y_k)^T$, 则最小二乘解等价于:

$$\hat{\mathbf{W}}_k = (\Phi_k^T \Phi_k)^{-1} \Phi_k^T \mathbf{Y}_k \quad (13)$$

当数据为实时输入时, 最小二乘方法求解的内存占用和运算量都很大, 此时通过 RLS 算法求解可以在线更新 $\hat{\mathbf{W}}_k$ 的解, 式(13)中令 $\mathbf{P}_k^{-1} = \Phi_k^T \Phi_k$ 可得:

$$\mathbf{P}_k = \mathbf{P}_{k-1} - \frac{\mathbf{P}_{k-1} \phi_k \phi_k^T \mathbf{P}_{k-1}}{1 + \phi_k^T \mathbf{P}_{k-1} \phi_k} \quad (14)$$

$$\Phi_k^T \mathbf{Y}_k = \Phi_{k-1}^T \mathbf{Y}_{k-1} + \phi_k^T y_k \quad (15)$$

$$\mathbf{P}_{k-1}^{-1} \hat{\mathbf{W}}_{k-1} = \Phi_{k-1}^T \mathbf{Y}_{k-1} \quad (16)$$

根据式(14)~(16)可以建立起 $\hat{\mathbf{W}}_k$ 与 $\hat{\mathbf{W}}_{k-1}$ 之间的递推关系:

$$\hat{\mathbf{W}}_k = \hat{\mathbf{W}}_{k-1} + \mathbf{P}_k \phi_k (y_k - \phi_k^T \hat{\mathbf{W}}_{k-1}) = \hat{\mathbf{W}}_{k-1} + \mathbf{U}_k \varepsilon_k \quad (17)$$

根据式(14)~(17)可得 RLS 算法所需的 $\hat{\mathbf{W}}_k$ 、 \mathbf{K}_k 、 ε_k 、 \mathbf{P}_k 的递推关系为:

$$\begin{cases} \hat{\mathbf{W}}_k = \hat{\mathbf{W}}_{k-1} + \mathbf{U}_k \varepsilon_k \\ \mathbf{U}_k = \mathbf{P}_k \phi_k \\ \varepsilon_k = y_k - \phi_k^T \hat{\mathbf{W}}_{k-1} \\ \mathbf{P}_k = \mathbf{P}_{k-1} - \frac{\mathbf{P}_{k-1} \phi_k \phi_k^T \mathbf{P}_{k-1}}{1 + \phi_k^T \mathbf{P}_{k-1} \phi_k} \end{cases} \quad (18)$$

将 RLS 原理应用于测量模型, 式(9)中, 欲通过 RLS 算法进行求解待估矩阵 \mathbf{A} 、 $\Delta\mathbf{f}$ 、 \mathbf{b} 的元素, 需将其化简为标准多元线性方程的形式, 其中系数简记为 x_n^i , n 为数据属性, 可在 1~6 中选取, $i = 1, 2, 3$, 代表方程数, 其中 a_{ii} 与 f_x 、 f_y 、 f_z 存在复共线性, 可以进行化简, 即:

$$\begin{cases} B''_x = \mathbf{x}^1 \mathbf{w}_x = \mathbf{x}^{1'} \mathbf{w}'_x \\ B''_y = \mathbf{x}^2 \mathbf{w}_y = \mathbf{x}^{2'} \mathbf{w}'_y \\ B''_z = \mathbf{x}^3 \mathbf{w}_z = \mathbf{x}^{3'} \mathbf{w}'_z \end{cases} \quad (19)$$

式(19)为标准多元线性方程的形式,其中: $\mathbf{x}^i = (1 \ x_1^i \ x_2^i \ x_3^i \ x_4^i \ x_5^i \ x_6^i)$, $i = 1, 2, 3$, $\mathbf{x}^{i'} = (1 \ x_1^{i'} \ x_2^{i'} \ x_3^{i'} \ x_4^{i'} \ x_5^{i'})$, $i = 1, 2, 3$, \mathbf{w}_j 与 \mathbf{w}'_j 分别代表:

$$\begin{cases} \mathbf{w}_x = (b_x \ a_{11} \ a_{12} \ a_{13} \ f_x \ f_y \ f_z)^T \\ \mathbf{w}_y = (b_y \ a_{21} \ a_{22} \ a_{23} \ f_x \ f_y \ f_z)^T \\ \mathbf{w}_z = (b_z \ a_{31} \ a_{32} \ a_{33} \ f_x \ f_y \ f_z)^T \end{cases} \quad (20)$$

$$\begin{cases} \mathbf{w}'_x = (b_x \ a_{12} \ a_{13} \ Z_{x1} \ Z_{x2} \ Z_{x3})^T \\ \mathbf{w}'_y = (b_y \ a_{21} \ a_{23} \ Z_{y1} \ Z_{y2} \ Z_{y3})^T \\ \mathbf{w}'_z = (b_z \ a_{31} \ a_{32} \ Z_{z1} \ Z_{z2} \ Z_{z3})^T \end{cases} \quad (21)$$

$j = x, y, z$, 式(21)中 Z 表示如下:

$$\begin{cases} Z_{i1} = B_x a_{ij} + f_x \\ Z_{i2} = B_y a_{ij} + f_y \\ Z_{i3} = B_z a_{ij} + f_z \end{cases} \quad (22)$$

其中, $(i, j) \in \{(x, 1), (y, 2), (z, 3)\}$, 通过 RLS 算法即可解出对应的参数 $b_x, b_y, b_z, a_{12}, a_{13}, a_{21}, a_{23}, a_{31}, a_{32}, Z_{x1}, Z_{x2}, Z_{x3}, Z_{y1}, Z_{y2}, Z_{y3}, Z_{z1}, Z_{z2}, Z_{z3}$, 根据式(22)进一步化简得到线性约束, 结合 $\Delta \mathbf{f}$ 与 \mathbf{B}_0 正交的正交性求解得到 $a_{11}, a_{22}, a_{33}, f_x, f_y, f_z$ 的值。RLS 算法补偿及磁异常探测的实现流程如图 1 所示。

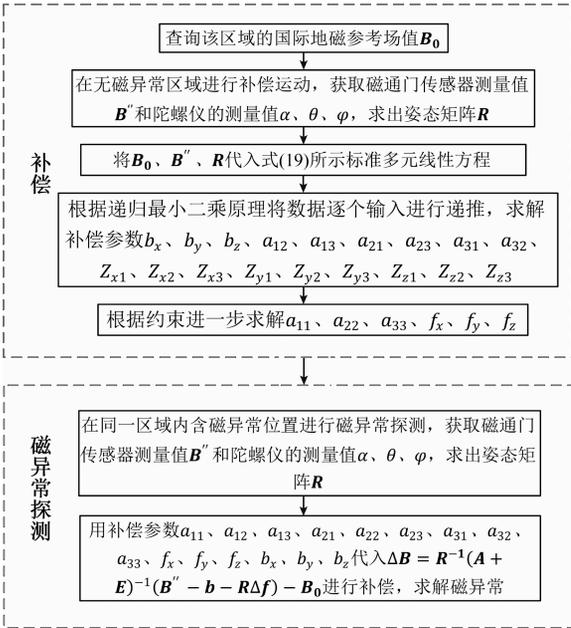


图 1 RLS 算法补偿及磁异常探测原理

Fig. 1 Principle of RLS compensation algorithm and magnetic anomaly detection

2 仿真与实验验证

2.1 数学模型仿真验证与分析

用 MATLAB 对 RLS 算法进行仿真, 验证其对测量模型参数的解算能力。首先对测量模型中的参数进行预设, 以生成传感器测得的含干扰磁场值。设置 IGRF 值为 $\mathbf{B}_0 = (20\ 000 \ 25\ 000 \ 35\ 000)^T$, 姿态角在如下范围内随机选取:

$$\begin{cases} \alpha \in [0, 2\pi] \\ \theta \in [-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}] \\ \varphi \in (-\pi, \pi] \end{cases} \quad (23)$$

参数 $\mathbf{A}, \Delta \mathbf{f}$ 以及 \mathbf{b} 的值如表 1 所示。

表 1 预设参数

Table 1 Preset parameters

参数	预设值
\mathbf{A}	$\begin{pmatrix} -0.000\ 02 & -0.021\ 38 & -0.070\ 51 \\ 0.031\ 56 & 0.000\ 39 & 0.001\ 39 \\ 0.063\ 32 & 0.001\ 00 & 0.010\ 02 \end{pmatrix}$
$\Delta \mathbf{f}$	$\begin{pmatrix} -170 \\ -190 \\ 231 \end{pmatrix}$
\mathbf{b}	$\begin{pmatrix} -886 \\ -804 \\ -462 \end{pmatrix}$

表 1 中所设置的参数 \mathbf{A} 符合 $|a_{ij}| \ll 1$, 代入式(7)进行数据仿真, 不忽略 $\mathbf{A}\Delta \mathbf{f}$ 的影响。

将仿真得到的数据进行 RLS 求解, 得到的模型参数如表 2 所示。

表 2 递归求解参数

Table 2 Recursive solution parameters

参数	RLS 求解数值
\mathbf{A}	$\begin{pmatrix} -0.000\ 02 & -0.021\ 38 & -0.070\ 51 \\ 0.031\ 56 & 0.000\ 36 & 0.001\ 39 \\ 0.063\ 32 & 0.001\ 00 & 0.009\ 99 \end{pmatrix}$
$\Delta \mathbf{f}$	$\begin{pmatrix} -169.422\ 2 \\ -189.277\ 8 \\ 232.011\ 1 \end{pmatrix}$
\mathbf{b}	$\begin{pmatrix} -886.000\ 0 \\ -804.000\ 0 \\ -462.000\ 0 \end{pmatrix}$

将补偿参数代入模型, 得到补偿后磁场值并绘制仿真结果如图 2 所示。

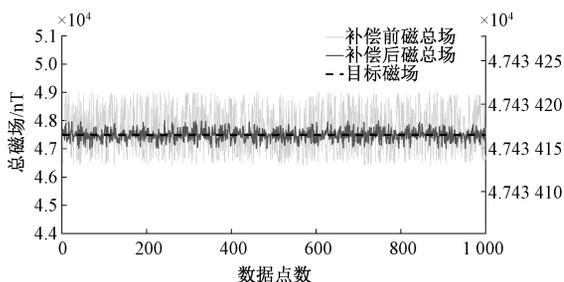


图 2 补偿前后总磁场值

Fig. 2 Total magnetic field value before and after compensation

对比表 1、2 中参数可知,对应的 RLS 求解参数与预设参数值基本一致,由图 2 中补偿前磁场值与预设的理论磁场值以及补偿后磁场值可知,补偿前磁场值与 IGRF 值之间有 $-1\ 000.8\ \text{nT} \sim 1\ 593.3\ \text{nT}$ 的偏差,补偿后误差变为 $-0.160\ \text{nT} \sim 0.167\ \text{nT}$ 。

仿真表明:1)模型中的近似处理,对于 RLS 算法补偿结果影响不大,将 $A\Delta f$ 项忽略的近似是可行的;2)算法对于模型具有较好的求解能力,在有较大载体干扰磁场存在的条件下仍可以获得与预设值基本一致的补偿参数。

2.2 无磁异常有限元仿真分析

为了证明 RLS 算法可用于理论模型中补偿参数的求解,实现对磁异常探测中载体干扰磁场的补偿,设计并进行含载体的有限元仿真。

在有限元仿真软件中,绘制载体模型如图 3 所示,载体由 3 根交叉的相同铁棒组成,铁棒截面为 $1\ \text{m} \times 1\ \text{m}$ 的正方形,棒长 $10\ \text{m}$,材料相对磁导率设为 2 000,在以载体为中心的 $50\ \text{m} \times 50\ \text{m} \times 50\ \text{m}$ 的区域内进行分析,设置区域内域材料为空气,相对磁导率为 1。

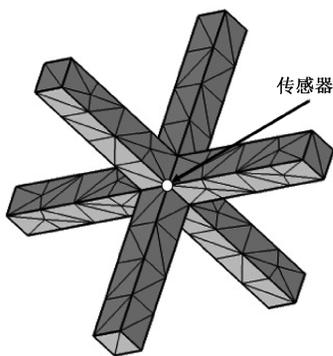


图 3 载体有限元模型

Fig. 3 Finite element model of the carrier

由于在载体运动中,载体相对于地磁场运动,可将载体的运动与姿态通过地磁变化进行表征,即通过地磁场在空间中随姿态变化,表现出载体姿态的变化。在

MATLAB 中设置空间中 X 轴、Y 轴、Z 轴方向静磁场值分别为 $30\ 000\ \text{nT}$ 、 $10\ 000\ \text{nT}$ 和 $25\ 000\ \text{nT}$,同时由于有限元软件在仿真过程中不存在与 IGRF 值正交的磁场偏置,需要考虑 Δf 的存在并对其数值进行预设,此处设定 f_x 、 f_y 、 f_z 分别为 $-170\ \text{nT}$ 、 $-190\ \text{nT}$ 及 $231\ \text{nT}$,并通过随机函数生成 10 000 组随机的三轴姿态角,计算出对应的传感器处地磁场值。将含姿态信息的地磁场值导入载体有限元模型中进行参数化扫描,在载体模型中图示位置布置域点探针,经稳态求解后,即为传感器测量值 B'' 。

从 MATLAB 仿真中导出补偿算法需要的传感器测量值 B'' 、姿态矩阵 R 、标准地磁场值 B_0 。由于随机函数的随机性,必须导出与参数化扫描相同的数据,RLS 算法输出为矩阵 A 、 Δf 及 b 。得到的参数如表 3 所示。

表 3 有限元仿真递归参数

Table 3 Recursive parameters of finite element simulation

参数	RLS 求解数值
A	$\begin{pmatrix} 0.188\ 2 & 0.133\ 2 & 0.177\ 1 \\ 0.053\ 0 & 0.862\ 8 & 0.051\ 2 \\ 0.253\ 0 & 0.254\ 2 & 0.231\ 5 \end{pmatrix}$
Δf	$\begin{pmatrix} -167.799\ 9 \\ -208.315\ 8 \\ 284.684\ 9 \end{pmatrix}$
b	$\begin{pmatrix} -2.262\ 9 \\ -5.316\ 3 \\ -32.212\ 3 \end{pmatrix}$

用补偿参数对 B'' 进行反解,得到如图 4 所示曲线。

由于有限元仿真无法获取准确的参数初始值,可以给定 Δf 的初始值, f_x 、 f_y 、 f_z 分别为 -170 、 -190 及 $231\ \text{nT}$,根据递归求解结果可以看出存在一定的差异,但是数值相差不大,误差来源于模型设置过程中的近似。

定义补后改善比为补偿前后剩余干扰磁场的比值为:

$$IR = \frac{\sigma_1}{\sigma_2} \tag{24}$$

其中, σ_1 为补偿前的剩余干扰磁场标准差, σ_2 为补偿后的剩余干扰磁场标准差。改善比可以反映补偿前后干扰磁场的大小,一定程度上反映了补偿的效果。

根据补偿数据曲线可以看出,补偿前由于载体干扰磁场的存在, X 轴、Y 轴、Z 轴测量数据分布在 $-50\ 000 \sim 50\ 000\ \text{nT}$ 之间,补偿后,三轴数据分别分布在 $30\ 000$ 、 $10\ 000$ 和 $25\ 000\ \text{nT}$ 附近,误差范围为 $230 \sim 240\ \text{nT}$,补后改善比为 158.35。根据曲线可以看出,经补偿载体干扰磁场得到减弱,传感器测量结果更接近目标磁场,补后改善比可以更定量的证明这一点。同时也说明算法可用于补偿磁异常探测中载体干扰磁场,提升磁异常探测精度。

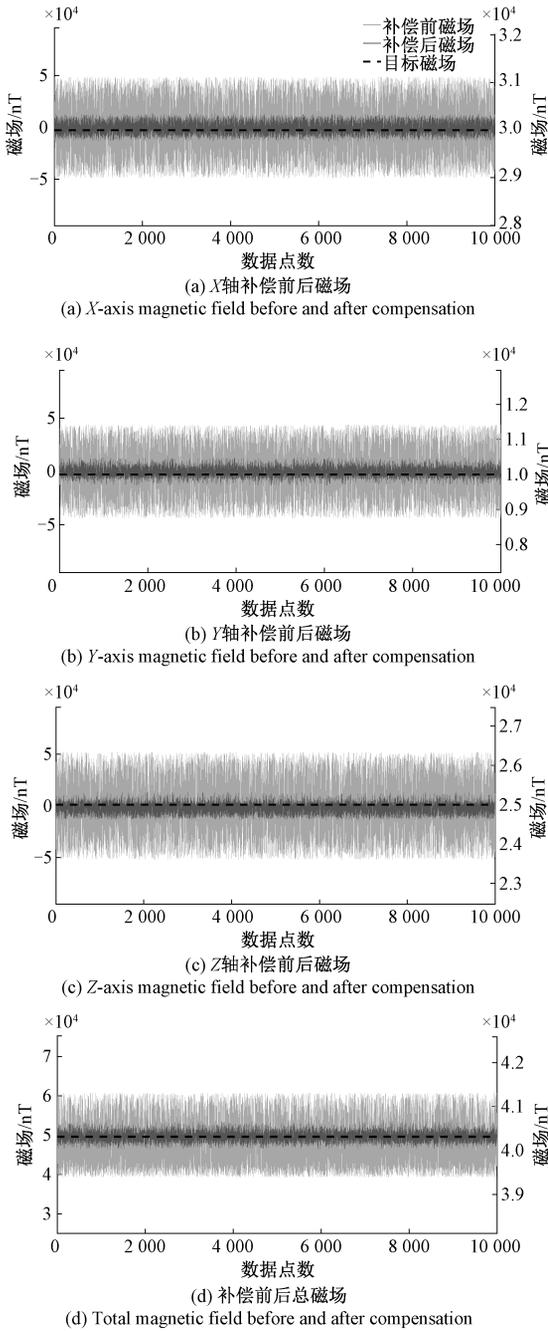


图4 有限元仿真补偿前后磁场对比

Fig. 4 Comparison of magnetic field before and after compensation in finite element simulation

2.3 无磁异常实验验证

基于仿真结果,在磁干扰较小的空旷区域内进行载体干扰补偿实验,对文中提出的补偿方法在实际测量中的有效性进行验证。载体为开放式铁磁性机箱,实验位置的IGRF值为 $(33\ 204.8\ -3\ 626.3\ 35\ 746.6)^T$,补偿前后的总场如图5所示。

由图5可以看出补偿前由于载体的聚磁作用,载体

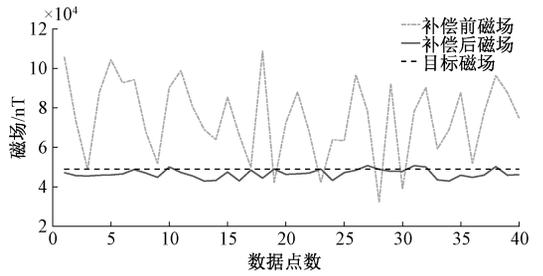


图5 载体干扰补偿实验补偿前后总磁场对比

Fig. 5 Comparison of total magnetic field before and after compensation in carrier interference compensation experiment

干扰明显大于地磁场,干扰值为 $76\ 625.5\ \text{nT}$,补偿后干扰降低为 $7\ 591.7\ \text{nT}$,载体干扰得到了明显降低,补偿前后的总场改善比为10.3,验证了本文的模型和算法可在实际中有效补偿载体干扰,提升磁异常探测精度。由于实验中存在环境、设备等的干扰,实验改善效果较仿真结果有所下降。

3 含磁异常有限元模型仿真与分析

在有限元软件中建立异常模型,对磁异常探测过程进行仿真验证,进一步证明经由算法可以实现磁异常探测中载体干扰磁场补偿。

在有限元软件中采用圆柱模型对长 $6\ \text{m}$ 、直径 $0.06\ \text{m}$ 的电缆进行建模,并在以电缆质心为中心的 $20\ \text{m} \times 10\ \text{m} \times 10\ \text{m}$ 的长方体空间内进行磁场分析。设长方体空间中的介质由磁导率为1的空气组成,电缆由磁导率为700的材料制成,设置空间中 X 轴、 Y 轴、 Z 轴方向静磁场值分别为 $30\ 000\ \text{nT}$ 、 $10\ 000\ \text{nT}$ 和 $25\ 000\ \text{nT}$,进行稳态分析得到电缆周围空间中的磁场分布。

为了还原实际探测过程,假定载体沿电缆上方距电缆所在水平面 $0.5\ \text{m}$ 的平面上运动,运行路径垂直于电缆方向,在此方向布置测线,获取测线上 X 轴、 Y 轴、 Z 轴的磁场值,即为式(10)中 ΔB 。测线分布对称,获得的异常数据共包含761个数据点,则磁异常应位于381组数据附近。在MATLAB中对数据添加如式(23)所示姿态信息,并选取其中前700组数据代入载体模型中进行仿真,获取载体上传感器位置所测得的磁场信息,传感器固定在图3所示位置。

将传感器测量的含异磁场用表3所示的递归补偿参数进行补偿反解,并与无载体干扰的含异磁场信号对比,绘制曲线如图6所示,图中补偿后磁场和目标磁场是与对应的地磁IGRF值做差的结果,以更直观的对异常进行分析。图中浅灰色细曲线代表补偿前含载体干扰磁场的传感器测量仿真数值,对应左侧坐标轴,深灰色粗曲线

代表经 RLS 算法补偿后的磁异常探测数据经平滑后的结果,对应右侧坐标轴,黑色虚线为未施加载体干扰磁场的磁异常信号。

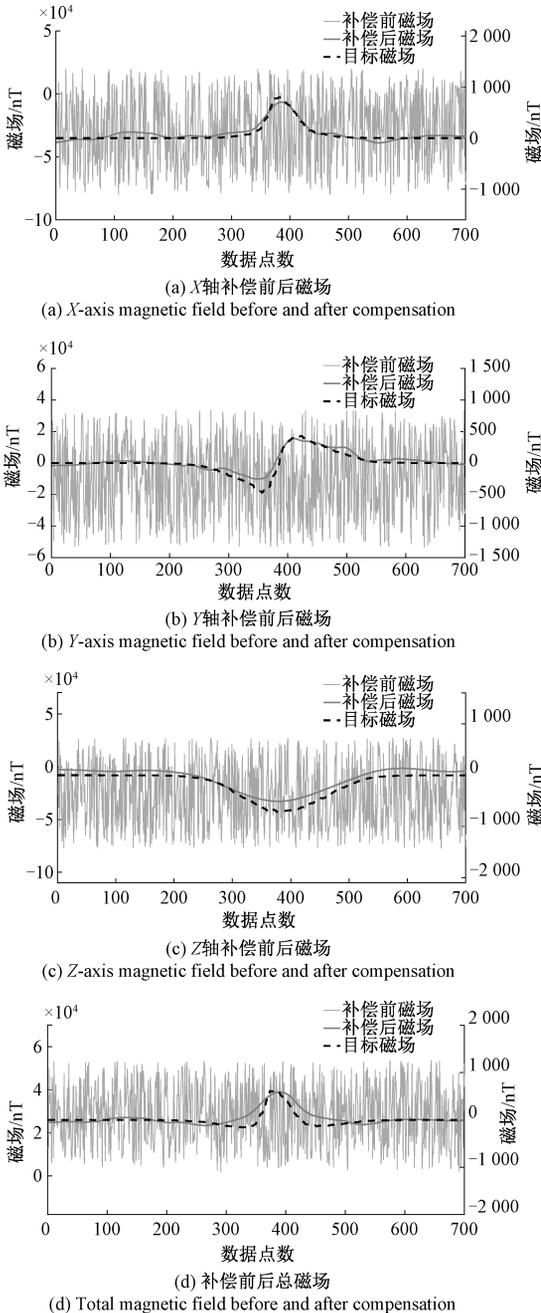


图 6 含异常有限元仿真补偿前后磁场对比

Fig. 6 Comparison of magnetic field before and after compensation in finite element simulation of magnetic anomaly detection

图 6 中曲线趋势对比可以看出,补偿前异常测量结果波动很大,无法识别到异常信号,补偿后曲线与目标异常信号的趋势基本一致,可以在第 350~450 组数据之间看到异常。曲线幅值对比可知,未施加载体干扰的 X、Y、

Z 轴异常值分别为 793、10 以及 -712 nT,补偿载体干扰磁场的 X、Y、Z 轴异常值经平滑分别为 725、33、-520 nT,而补偿前含载体干扰磁场的测量值完全无法识别到磁异常信息,补偿后载体干扰磁场显著降低,可以识别到明显的异常,异常的幅值差异与平滑过程有关,同时也与模型中未能补偿掉的一些与姿态相关的信息有关。补偿前后的改善比为 36.4,证明即使在有磁异常的情况下,算法仍然具有较好的补偿效果,可以用于补偿载体干扰磁场,实现磁异常探测。

4 结论

针对磁异常探测中载体干扰磁场补偿的问题,文章提出一种基于线性约束与正交约束的递归最小二乘 (RLS) 算法。该方法可用于测量数据的在线补偿,解决了测量中的干扰补偿问题。建立了磁异常探测中的测量模型,采用线性约束与正交约束降低参数复共线性,并通过有限元仿真分别验证模型的可行性和算法的有效性。磁异常探测仿真中载体干扰磁场得到有效补偿,补偿后改善比为 36.4,比相同条件 T-L 模型和岭回归估计的改善比^[22]有较大提升,可以实现对磁异常探测中载体干扰磁场的补偿。无磁异常实验的补偿改善比为 10.3,实验证明该方法可以对磁异常探测中的补偿参数进行求解,降低磁异常探测中载体干扰磁场,有效提升了磁异常探测的精度。下一步研究考虑将 RLS 算法与嵌入式系统相结合,实现磁异常探测中实时的载体干扰磁场补偿。

参考文献

[1] 戴忠华,周德华,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.
DAI ZH H, ZHOU S H, SHAN SH. Application research of wavelet transform in ship magnetic field signal detection [J]. Journal of Detection & Control, 2020, 42(3):14-19.

[2] 银鸿,文轩,杨生胜,等. 基于磁异常检测的磁性运动目标识别方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(3):258-264.
YIN H, WEN X, YANG SH SH, et al. Research on the moving ferromagnetic object recognition method based on magnetic anomaly detection [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(3):258-264.

[3] DONG H, WANG X, ZHANG C, et al. Improved robust vehicle detection and identification based on single magnetic sensor [J]. IEEE Access, 2018, 6: 5247-5255.

[4] 黄兴曼, 鄢小玫, 方祖祥. 基于相位差的电磁定位系统设计[J]. 电子测量技术, 2020, 43(8):54-59.

- HUANG X M, WU X M, FANG Z X. Design of electromagnetic positioning system based on phase difference [J]. *Electronic Measurement Technology*, 2020, 43(8):54-59.
- [5] 朱琳, 赵丛, 欧阳游, 等. 航空 VTEM 测量系统在多金属矿产勘查中的应用[J]. *矿产勘查*, 2019, 10(3):624-631.
- ZHU L, ZHAO C, OUYANG Y, et al. The application of aerial VTEM measurement system in polymetallic mineral exploration [J]. *Mineral Exploration*, 2019, 10(3):624-631.
- [6] 王景然, 顾建松, 梁国庆, 等. 数字式小型化磁力仪在古石桥考古中的应用[J]. *声学及电子工程*, 2017, 128(4):49-51.
- WANG J R, GU J S, LIANG G Q, et al. Application of digital miniature magnetometer in archaeology of ancient stone bridge[J]. *Acoustics and Electronics Engineering*, 2017, 128(4):49-51.
- [7] DOU Z, LIU C, WANG J, et al. An adaptive aeromagnetic compensation method based on local linear regression [J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, 783(1):1-10.
- [8] WANG M CH, LIN J, YUE L G, et al. Compensation for mobile carrier magnetic interference in a SQUID-based full-tensor magnetic gradiometer using the flower pollination algorithm [J]. *Measurement Science and Technology*, 2021, 32(8):1-12.
- [9] ZHAO X, YU P, JIAO J. A new improved algorithm for aeromagnetic compensation [J]. *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*, 2021, 660(1):1-6.
- [10] WU P, ZHANG Q, CHEN L, et al. Aeromagnetic compensation algorithm based on principal component analysis [J]. *Journal of Sensors*, 2018, (3):1-7.
- [11] ZHAO G, HAN Q, PENG X, et al. An aeromagnetic compensation method based on a multimodel for mitigating multicollinearity [J]. *Sensors*, 2019, 19(13):2931-2944.
- [12] MA M, ZHIJIAN Z, DEFU C. A dual estimate method for aeromagnetic compensation [J]. *Measurement Science and Technology*, 2017, 28(11):1-8.
- [13] 赵塔, 朱小宁, 程德福, 等. 水下地磁导航技术中的地磁场空间差分测量方法[J]. *吉林大学学报(工学版)*, 2017, 47(1):316-322.
- ZHAO T, ZHU X N, CHENG D F, et al. Geomagnetic field spatial difference measuring method for underwater geomagnetic navigation technology [J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2017, 47(1):316-322.
- [14] 孙华庆, 王丹. 基于改进 EMD 算法的水下潜艇磁异常信号处理分析[J]. *舰船电子工程*, 2018, 38(5):146-150.
- SUN H Q, WANG D. Analysis of underwater submarine magnetic abnormal signal processing based on improved EMD algorithm [J]. *Ship Electronic Engineering*, 2018, 38(5):146-150.
- [15] PHILIPPEAUX H, DHANAK M. Real-time localization of a magnetic anomaly: A study of the effectiveness of a genetic algorithm for implementation on an autonomous underwater vehicle [C]. *Oceans 2018 MTS/IEEE Charleston*. IEEE, 2018:1-7.
- [16] 王琦, 林君, 于生宝, 等. 航空瞬变电磁反演中灵敏度的快速高精度计算[J]. *吉林大学学报(工学版)*, 2015, 45(6):2020-2025.
- WANG Q, LIN J, YU SH B, et al. Calculation of sensitivities for airborne electromagnetic inversion progress [J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2015, 45(6):2020-2025.
- [17] 潘峰, 王长林, 赵超. 基于递归最小二乘的单通道混合信号时延估计算法[J]. *电子测量与仪器学报*, 2021, 35(3):197-203.
- PAN F, WANG CH L, ZHAO CH. Single channel mixed signal delay estimation algorithm based on recursive least squares [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2021, 35(3):197-203.
- [18] MUHAMMAD C B, ANWAR K. Interference mitigation using adaptive beamforming with RLS algorithm for coexistence between 5G and fixed satellite services in C-band [J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, 1577(1):1-9.
- [19] YOUSFIALAOU M. ECG denoising by EMD and EEMD improved with an adaptive RLS filter [J]. *International Journal of Advanced Trends in Computer Science and Engineering*, 2020, 9(3):3241-3248.
- [20] 傅中君, 王建宇, 欧云, 等. 基于最小二乘的准同步 DFT 幅值线性修正方法 [J]. *电子测量与仪器学报*, 2019, 33(7):72-78.
- FU ZH J, WANG J Y, OU Y, et al. Linear correcting algorithm for quasi-synchronous DFT' s harmonic amplitude based on the least squares theory [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2019, 33(7):72-78.
- [21] 付乐天, 李鹏, 高莲. 考虑样本异常值的改进最小二乘支持向量机算法 [J]. *仪器仪表学报*, 2021, 42(6):179-190.
- FU L T, LI P, GAO L. Improved LSSVM algorithm considering sample outliers [J]. *Chinese Journal of*

Scientific Instrument, 2021, 42(6):179-190.

[22] 郑文超, 牛夏牧, 韩琦. 一种改进的航磁补偿系数求解算法[J]. 智能计算机与应用, 2014, 4(1):91-93.

ZHENG W CH, NIU X M, HAN Q. An improved solution algorithm of magnetic composition [J].

Intelligent Computer and Applications, 2014, 4(1):

91-93.

作者简介



吕禹萱, 2019 年于上海交通大学获得学士学位, 现为上海交通大学硕士研究生, 主要研究方向为磁场探测与信号处理。

E-mail: lvxuanxuan@sjtu.edu.cn

Lyu Yuxuan received her B. Sc. degree from Shanghai Jiaotong University in 2019.

Now she is a M. Sc. candidate at Shanghai Jiaotong University. Her main research interests include magnetic detection and signal processing.



雷华明(通信作者), 2005 年于上海交通大学获博士学位, 现为上海交通大学高级工程师, 硕士生导师, 研究方向为电磁传感与探测、微弱信号检测、智能检测系统。

E-mail: hmlei@sjtu.edu.cn

Lei Huaming (Corresponding author), received his Ph. D. from Shanghai Jiaotong University in 2005. He is currently a senior engineer and master tutor at Shanghai Jiaotong University. His research interests include electromagnetic sensing and detection, weak signal detection, and the intelligent system.