

# 一种面向时变干扰的地磁矢量测量补偿方法

刘中艳 唐凤燕 徐昱静 邱晓天 何鑫蓉

(国防科技大学智能科学学院 长沙 410073)

**摘要:**为了提升地磁矢量测量的精度,并有效应对传统补偿方法在处理磁干扰模型参数时变性问题上的不足,本文提出了一种面向时变干扰的地磁矢量测量补偿方法。该方法在测量过程中可以根据最新的测量数据、先前的补偿参数与压缩矩阵,利用Woodbury方程对先前参数进行迭代更新,从而准确获取时变磁干扰参数,并进行补偿。通过仿真和实验验证了所提方法的有效性,尤其是在磁干扰特性变化较大时,此方法效果更为明显。实验结果显示,采用传统方法时,地磁场总强度和3个分量的均方根误差分别可以从4 596.3、1 310.0、5 768.9和3 245.7 nT降低到123.34、35.93、142.12和100.54 nT,但采用本文所提方法,它可以进一步降低到31.57、11.09、35.13和27.26 nT。这表明相较于传统方法,本方法不仅成功捕捉到了时变磁干扰参数的动态变化,还显著降低了地磁场总强度及各分量的均方根误差,实现了对时变磁干扰的高精度补偿。

**关键词:**时变干扰;地磁矢量测量;进化补偿

中图分类号: TN06 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 460.4

## A compensation method of geomagnetic vector measurement for time-varying disturbances

Liu Zhongyan Tang Fengyan Xu Yujing Qiu Xiaotian He Xinrong

(College of Intelligent Science, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** In order to improve the accuracy of geomagnetic vector measurements and effectively deal with the shortcomings of traditional compensation methods in dealing with the problem of time-varying magnetic interference model parameters, this paper proposes a time-varying interference oriented compensation method for geomagnetic vector measurements. The method can accurately obtain the time-varying magnetic interference parameters and compensate them during the measurement process by iteratively updating the previous parameters using Woodbury's equation based on the latest measurement data, the previous compensation parameters and the compression matrix. The effectiveness of the proposed method is verified through simulations and experiments, especially when the magnetic interference characteristics vary greatly. The experimental results show that the total geomagnetic field intensity and the rms errors of the three components can be reduced from 4 596.3、1 310.0、5 768.9 and 3 245.7 nT to 123.34、35.93、142.12 and 100.54 nT, respectively, when using the traditional method, but it can be further reduced by our proposed method to 31.57、11.09、35.13 and 27.26 nT. This shows that compared with the traditional method, the present method not only successfully captures the dynamic changes of the time-varying magnetic interference parameters, but also significantly reduces the root-mean-square error of the total geomagnetic field strength and each component, and realises the high-precision compensation of the time-varying magnetic interference.

**Keywords:** time-varying interference; geomagnetic vector measurement; evolutionary compensation

## 0 引言

地磁矢量可以通过结合三轴磁传感器的测量值和惯性导航系统(INS)单元提供的姿态信息来获取。利用INS提

供的姿态信息,将三轴磁传感器的测量值投影到统一的地理坐标下<sup>[1-3]</sup>,整个测量设备称之为地磁矢量测量系统<sup>[4]</sup>。它被广泛应用于水下目标探测、地质勘探、地磁导航等领域。然而,在地磁矢量测量系统中,三轴磁传感器不可避免

的会受到周围铁磁性磁干扰,这些干扰磁场会导致上千 nT 甚至更多的测量误差,因此在实际应用中必须对磁干扰误差进行补偿<sup>[5-9]</sup>。

目前磁矢量补偿方法都在一定程度上取得了补偿效果,但存在一个共同的问题,即假设干扰磁场的模型参数是恒定的,忽略了其时变特性。Pang 等<sup>[10-11]</sup>都通过考虑涡流干扰来扩展传统的固定、感应干扰补偿模型,但这适用于涡流场相对较大的高速测量的场景。当运动速度较低时,忽略涡流磁场是合理的。此外,Pang 等还研究了误差模型方程的构建方法,并利用四面体和垂直平台构建了精确的参数估计方程。Luo 等<sup>[12]</sup>研究了三轴磁传感器的姿态旋转策略,并基于不同的姿态旋转策略构建了方程,得出了对称策略可以提供最佳数据结论。Li 等<sup>[13]</sup>通过使用 3D Helmholtz 线圈建立了一个补偿磁干扰场的系统。但涉及的试验量需要准确测量,试验成本昂贵。Wan 等<sup>[14]</sup>设计了一种基于拉格朗日乘子的干扰参数估计方法,需要总量约束信息。现有研究都缺乏对时变磁干扰的考量,但在实际地磁矢量测量过程中,不可避免地会出现包括铁磁材料的磁化特性、平台特性的变化等,而这些会导致干扰模型参数的变化,若不对干扰模型参数实时进行修正,会严重影响地磁矢量测量系统的测量精度。

为了解决上述问题,本文提出了一种面向时变干扰的地磁矢量测量补偿方法。该方法利用过去的参数信息和当前的观测数据实现干扰参数的在线更新。因此,可以根据测量应用过程中的实际情况,更准确地消除磁干扰参数变化带来的测量精度下降的问题。本文仿真和试验结果表明,该方法能进一步提高地磁矢量测量系统的测量精度,具有广泛的应用潜力。

## 1 补偿理论

### 1.1 地磁矢量测量原理

地磁矢量测量的关键在于用惯导(INS)为三轴磁传感器提供实时的姿态信息,三轴磁传感器坐标系与当地地理坐标系之间关系可用欧拉角表示<sup>[4]</sup>:

$$\begin{bmatrix} H_x \\ H_y \\ H_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} & T_{13} \\ T_{21} & T_{22} & T_{23} \\ T_{31} & T_{32} & T_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_{ex} \\ H_{ey} \\ H_{ez} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中:

$$\begin{cases} T_{11} = \cos\beta\cos\gamma \\ T_{12} = \sin\gamma\cos\beta \\ T_{13} = -\sin\beta \\ T_{21} = \sin(\alpha)\sin(\beta)\cos(\gamma) - \cos(\alpha)\sin(\gamma) \\ T_{22} = \sin(\alpha)\sin(\beta)\sin(\gamma) + \cos(\alpha)\cos(\gamma) \\ T_{23} = \sin(\alpha)\cos(\beta) \\ T_{31} = \cos(\alpha)\sin(\beta)\cos(\gamma) + \sin(\alpha)\sin(\gamma) \\ T_{32} = \cos(\alpha)\sin(\beta)\sin(\gamma) - \sin(\alpha)\cos(\gamma) \\ T_{33} = \cos\alpha\cos\beta \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $\alpha, \beta, \gamma$  分别为 INS 提供的偏航角、横滚角和俯仰角。 $H_x, H_y, H_z$  为三轴磁强计坐标系下的理论磁场分量(不包含任何磁干扰)。 $H_{ex}, H_{ey}, H_{ez}$  为地理坐标系下的地磁场分量。基于上述公式的转换关系,两个坐标系之间的磁场分量可以相互转换。

### 1.2 传统的补偿方法

在考虑固定磁干扰和感应磁干扰后,三轴磁传感器的磁干扰模型可表示为<sup>[15-16]</sup>:

$$\begin{bmatrix} Y_x \\ Y_y \\ Y_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_x \\ H_y \\ H_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} H_{px} \\ H_{py} \\ H_{pz} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: $Y = (Y_x, Y_y, Y_z)^\top$  是三轴磁传感器测的测量值,这是需要进行补偿的。 $H = (H_x, H_y, H_z)^\top$  是三轴磁传感器坐标下地磁场的真实值。 $H_p = (H_{px}, H_{py}, H_{pz})^\top$  是固定磁干扰参数。 $a_{ij}, i, j = 1, 2, 3$  是感应磁干扰参数。

结合式(1),三轴磁传感器测量的磁场分量可以改写为:

$$Y_x = a_{11}(T_{11}H_{ex} + T_{12}H_{ey} + T_{13}H_{ez}) + a_{12}(T_{21}H_{ex} + T_{22}H_{ey} + T_{23}H_{ez}) + a_{13}(T_{31}H_{ex} + T_{32}H_{ey} + T_{33}H_{ez}) + H_{px} \quad (4)$$

$$Y_y = a_{21}(T_{11}H_{ex} + T_{12}H_{ey} + T_{13}H_{ez}) + a_{22}(T_{21}H_{ex} + T_{22}H_{ey} + T_{23}H_{ez}) + a_{23}(T_{31}H_{ex} + T_{32}H_{ey} + T_{33}H_{ez}) + H_{py} \quad (5)$$

$$Y_z = a_{31}(T_{11}H_{ex} + T_{12}H_{ey} + T_{13}H_{ez}) + a_{32}(T_{21}H_{ex} + T_{22}H_{ey} + T_{23}H_{ez}) + a_{33}(T_{31}H_{ex} + T_{32}H_{ey} + T_{33}H_{ez}) + H_{pz} \quad (6)$$

在此,定义:

$$\begin{cases} M_1 = T_{11}H_{ex} + T_{12}H_{ey} + T_{13}H_{ez} \\ M_2 = T_{21}H_{ex} + T_{22}H_{ey} + T_{23}H_{ez} \\ M_3 = T_{31}H_{ex} + T_{32}H_{ey} + T_{33}H_{ez} \end{cases} \quad (7)$$

根据式(1)可知, $M_1, M_2, M_3$  是已知量,其可以通过结合姿态变化信息  $\alpha, \beta, \gamma$  (由 INS 提供)和由 IGRF<sup>[4]</sup>获得的地磁矢量  $H_e = (H_{ex}, H_{ey}, H_{ez})^\top$  的真实值来计算。

进一步地,式(5)~(7)可以写成矩阵形式:

$$\mathbf{Y} = \Phi \boldsymbol{\theta} \quad (8)$$

式中:

$$\Phi = \begin{bmatrix} [M_1 \quad M_2 \quad M_3 \quad 0_{1 \times 6} \quad 1 \quad 0 \quad 0]_{N \times 12} \\ [0_{1 \times 3} \quad M_1 \quad M_2 \quad M_3 \quad 0_{1 \times 3} \quad 0 \quad 1 \quad 0]_{N \times 12} \\ [0_{1 \times 6} \quad M_1 \quad M_2 \quad M_3 \quad 0 \quad 0 \quad 1]_{N \times 12} \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\boldsymbol{\theta} = [a_{11} \quad a_{12} \quad a_{13} \quad a_{21} \quad a_{22} \quad a_{23} \quad a_{31} \quad a_{32} \quad a_{33} \quad H_{px} \quad H_{py} \quad H_{pz}]^\top \quad (10)$$

式中: $N$  表示处于不同姿态的测量点的数量。 $\Phi$  是  $\mathbb{R}^{3N \times 12}$  中在不同姿态下的观测矩阵。 $\boldsymbol{\theta}$  是需要估计的  $\mathbb{R}^{12 \times 1}$  参数矩阵。

由式(8)可知,补偿模型已经建立,然后可利用测量数

据对补偿参数  $\theta$  进行估计, 最后使用补偿参数对测量数据进行干扰补偿从而获得磁场真值。因此, 补偿参数  $\theta$  的高精度估计可以确保消除磁干扰。利用测量数据和补偿方程,  $\theta$  可以通过最小二乘法(LSM)<sup>[4]</sup>进行估计:

$$\hat{\theta} = (\Phi^T \Phi)^{-1} \Phi^T Y \quad (11)$$

### 1.3 基于 Woodbury 方程的进化补偿

在实际测量中地磁矢量测量系统的参数会随着时间推移而发生一定变化, 从而影响补偿性能。为解决这个问题, 本文提出一种基于 Woodbury 方程的进化补偿方法。

根据最小二乘算法(式(11)),  $N-1$  时刻未知参数  $\theta$  的最小二乘估计可表示为:

$$\hat{\theta}_{N-1} = (\Phi_{N-1}^T \Phi_{N-1})^{-1} \Phi_{N-1}^T Y_{N-1} \quad (12)$$

然后, 将  $N-1$  时刻的估计参数考虑到  $N$  时刻, 演化所得干扰模型为:

$$\Phi_N \hat{\theta}_N = Y_N \quad (13)$$

令  $\Phi_N$  和  $Y_N$  分别是截至  $N$  时刻的所有数据构成的观测数据矩阵和模型输出向量, 即:

$$\Phi_N = \begin{bmatrix} \Phi_{N-1} \\ \Phi_N^T \end{bmatrix}_{3(N+1) \times 12}, Y_N = \begin{bmatrix} Y_{N-1} \\ Y_N \end{bmatrix}_{3(N+1) \times 1} \quad (14)$$

式中:  $\Phi_N^T$  是  $\mathbb{R}^{3 \times 12}$  维度矩阵, 代表第  $N$  时刻的观测数据矩阵,  $Y_N$  是  $\mathbb{R}^{1 \times 12}$  维度向量, 代表第  $N$  时刻模型输出向量。于是, 第  $N$  时刻未知参数  $\theta$  的最小二乘估计可表示为:

$$\hat{\theta}_N = (\Phi_N^T \Phi_N)^{-1} \Phi_N^T Y_N \quad (15)$$

将式(14)代入上式, 可得:

$$\hat{\theta}_N = (\Phi_N \Phi_N^T + \Phi_{N-1}^T \Phi_{N-1})^{-1} (\Phi_N Y_N + \Phi_{N-1}^T Y_{N-1}) = (\Phi_N \Phi_N^T + P_{N-1}^{-1})^{-1} (\Phi_N Y_N + \Phi_{N-1}^T Y_{N-1}) = P_N (\Phi_N Y_N + \Phi_{N-1}^T Y_{N-1}) \quad (16)$$

式中:  $P_{N-1} = (\Phi_{N-1}^T \Phi_{N-1})^{-1}$ ,  $P_N = (P_{N-1}^{-1} + \Phi_N \Phi_N^T)^{-1}$ 。

Woodbury 方程<sup>[17]</sup>表明, 结合  $N-1$  时刻的压缩矩阵  $P_{N-1}$  和  $N$  时刻更新的观测矩阵  $\Phi_N$ , 并根据矩阵求逆公式,  $P_N$  可表示为:

$$P_N = (P_{N-1}^{-1} + \Phi_N \Phi_N^T)^{-1} = P_{N-1} - P_{N-1}^{-1} \Phi_N (I + \Phi_N^T P_{N-1} \Phi_N)^{-1} \Phi_N^T P_{N-1} \quad (17)$$

因此, 经过演化和更新的干扰模型的参数可以表示为:

$$\hat{\theta}_N = P_N [\Phi_{N-1}^T, \Phi_N] \begin{bmatrix} Y_{N-1} \\ Y_N \end{bmatrix} = [I - P_{N-1} \Phi_N (I + \Phi_N^T P_{N-1} \Phi_N)^{-1} \Phi_N^T] \hat{\theta}_{N-1} + [P_{N-1} - P_{N-1}^{-1} \Phi_N (I + \Phi_N^T P_{N-1} \Phi_N)^{-1} \Phi_N^T P_{N-1}] \Phi_N Y_N \quad (18)$$

由式(18)可知,  $N$  时刻的干扰参数矩阵包含之前的估计参数  $\hat{\theta}_{N-1}$  和  $N-1$  时刻获取的压缩矩阵  $P_{N-1}$ , 以及  $N$  时刻系统的观测矩阵  $\Phi_N$  和实测矩阵  $Y_N$ , 保证了对地磁矢量测量系统时变磁干扰的补偿。需要注意的是, 之前的测量数据可以被释放, 只需存储之前的估计参数  $\hat{\theta}_{N-1}$  和获取的压缩矩阵  $P_{N-1}$ , 通过实时获取当前时刻的观测数据, 便能

满足求解新的补偿参数的需要(如式(18)所示), 再利用算法迭代, 便能实现对时变磁干扰的补偿。

## 2 仿真实验

为了尽可能模拟真实场景并说明本文提出方法的有效性, 本文在仿真中设置了时间变化的干扰模型参数。根据以往的实际工程经验, 时刻  $N1$  和时刻  $N2$  之间的参数变化分别设置为 1.5%、3%。如表 1 所示, 给出了详细的干扰参数。补偿地点的地磁北向、东向和垂向分量设定为 [36 000, 32 000, 1 500] nT。为了估计干扰模型参数, 使用 3D 球面渐开线生成具有不同姿态的测量数据集<sup>[4]</sup>, 并随机选择其中一些进行参数估计。

本文将提出的进化补偿方法与传统非进化方法进行比较。在传统方法中, 模型参数是使用  $N1$  时刻的数据集进行估计, 然后使用估计参数对时刻  $N2$  的数据集进行补偿。而本文提出的方法则是结合  $N2$  时刻的数据, 对  $N1$  时刻的参数进化和更新。然后, 用更新后的干扰模型参数用于补偿。

如图 1~3 所示, 对于 1.5% 的干扰参数变化, 传统方法可以将总强度、北分量、东分量和垂直分量的 RMS(均方根值)误差从 2 388.9、2 506.2、2 399.0 和 2 305.2 nT 降低到 37.89、37.96、37.73 和 34.04 nT, 但使用本文提出的进化方法, 它可以进一步降低到 20.58、20.12、20.27 和 18.30 nT。

当参数变化 3% 时, 传统方法可以将总强度、北分量、东分量和垂直分量的 RMS 误差从 2 423.5、2 544.8、2 433.8 和 2 337.9 nT 降低到 74.17、75.96、74.75 和 65.73 nT, 而所提出的进化方法可以将其降低到 20.82、20.58、20.67 和 17.81 nT。此外, 参数估计结果也如表 1 所示, 利用进化补偿方法, 可以准确估计随时间变化的干扰模型参数。

综上, 根据对不同干扰模型参数变化率的补偿结果分析可知, 磁干扰特性变化越大, 采用演化补偿方法的必要性越高。

## 3 试验与结果分析

### 3.1 试验设计

试验系统主要包括三轴磁传感器、惯性导航系统(INS)、数据采集和处理软件。三轴磁力计的采样率为 20 Hz。本文选择了一个磁场环境良好的郊区进行补偿试验, 其中磁场的随机波动小于 0.1 nT, 磁梯度小于 1 nT/m。地磁矢量通过 IGRF 获得, 并用作参考值, 其中北向分量、东向分量和垂直分量分别为 35 218、33 062 和 2 105 nT。

为了验证改进算法的性能, 本文使用具有较长时间间隔的数据进行干扰参数估计, 以确保地磁矢量测量系统的磁特性发生显著变化。本文使用 2023 年 5 月的一组测量数据(标记为数据集 A)来估计误差模型参数, 并将其用作初始参数, 使用 2023 年 7 月和 10 月的测量数据(分别标记

表 1 干扰参数的设置和估计  
Table 1 Setup and estimation of the interference parameters

	变化率	硬铁参数	感应参数
N0	真值	$\begin{bmatrix} 47 \\ 22 \\ 8 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.020\ 0 & 0.050\ 0 & 0.010\ 0 \\ 0.080\ 0 & -0.040\ 0 & 0.070\ 0 \\ 0.020\ 0 & 0.050\ 0 & 0.030\ 0 \end{bmatrix}$
	估计值(传统方法)	$\begin{bmatrix} 46.984\ 0 \\ 21.931\ 0 \\ 8.036\ 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.021\ 5 & 0.051\ 2 & 0.013\ 3 \\ 0.089\ 7 & -0.039\ 8 & 0.070\ 8 \\ 0.021\ 1 & 0.062\ 1 & 0.039\ 9 \end{bmatrix}$
	变化率(1.5%)	$\begin{bmatrix} 47.705\ 0 \\ 22.330\ 0 \\ 8.120\ 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.020\ 3 & 0.050\ 7 & 0.010\ 1 \\ 0.081\ 2 & -0.040\ 6 & 0.071\ 1 \\ 0.020\ 3 & 0.050\ 7 & 0.030\ 4 \end{bmatrix}$
N1	估计值(进化方法)	$\begin{bmatrix} 47.968\ 7 \\ 22.641\ 7 \\ 8.367\ 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.021\ 4 & 0.051\ 8 & 0.012\ 8 \\ 0.079\ 6 & -0.042\ 3 & 0.073\ 6 \\ 0.022\ 1 & 0.055\ 6 & 0.032\ 4 \end{bmatrix}$
	变化率(3%)	$\begin{bmatrix} 48.410\ 0 \\ 22.660\ 0 \\ 8.240\ 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.020\ 6 & 0.051\ 5 & 0.010\ 3 \\ 0.082\ 4 & -0.041\ 2 & 0.072\ 1 \\ 0.020\ 6 & 0.051\ 5 & 0.030\ 9 \end{bmatrix}$
	估计值(进化方法)	$\begin{bmatrix} 48.996\ 3 \\ 22.227\ 0 \\ 8.472\ 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.026\ 6 & 0.052\ 3 & 0.012\ 4 \\ 0.086\ 8 & -0.042\ 5 & 0.074\ 7 \\ 0.021\ 5 & 0.053\ 1 & 0.032\ 1 \end{bmatrix}$

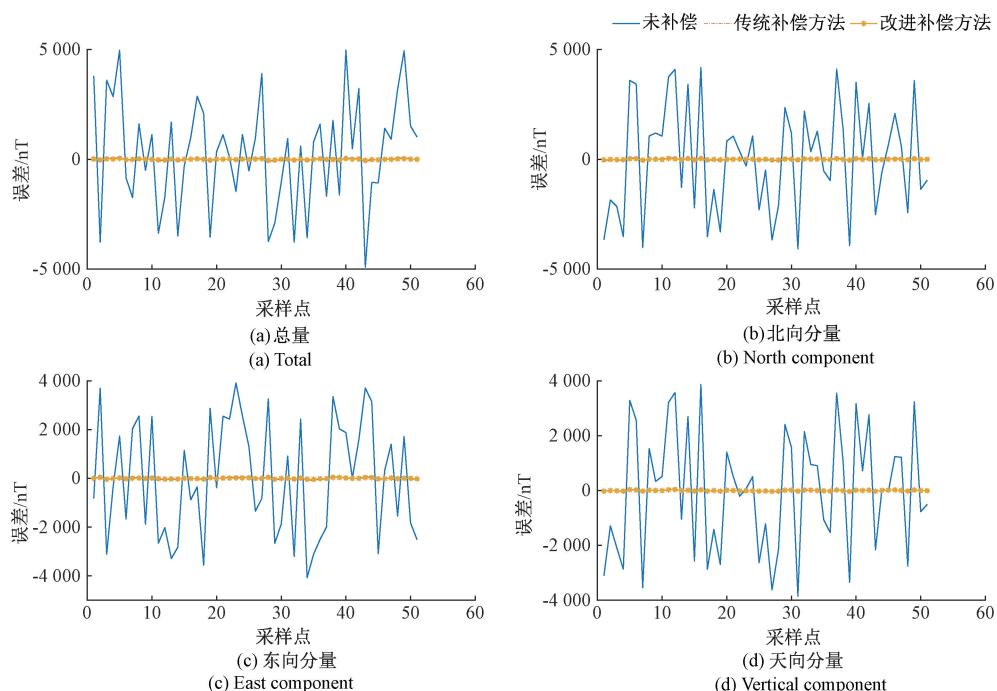


图 1 仿集中原始数据、传统方法和进化方法在干扰参数变化 1.5% 的情况下的补偿结果比较

Fig. 1 Comparison of compensation results between raw data, traditional method and evolutionary method under 1.5% variation of interference parameters in simulation

为数据集 B 和数据集 C) 来演化参数。3 次试验除测试时间不同之外, 其余条件皆保持相同, 试验条件设置与试验

数据采集方法均参考文献[18]。

与仿真类似, 第一种情景不考虑进化, 其中干扰参数

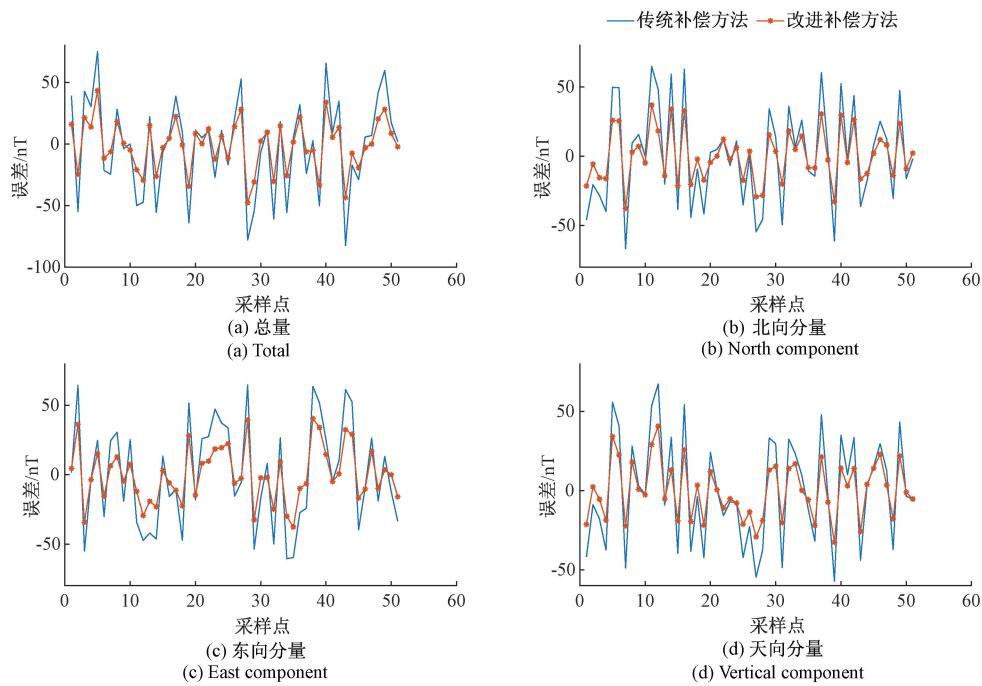


图 2 仿真中干扰参数变化 1.5% 的情况下传统方法和进化方法的补偿结果的详细比较

Fig. 2 Detailed comparison of compensation results between traditional method and evolutionary method under 1.5% variation of interference parameters in simulation

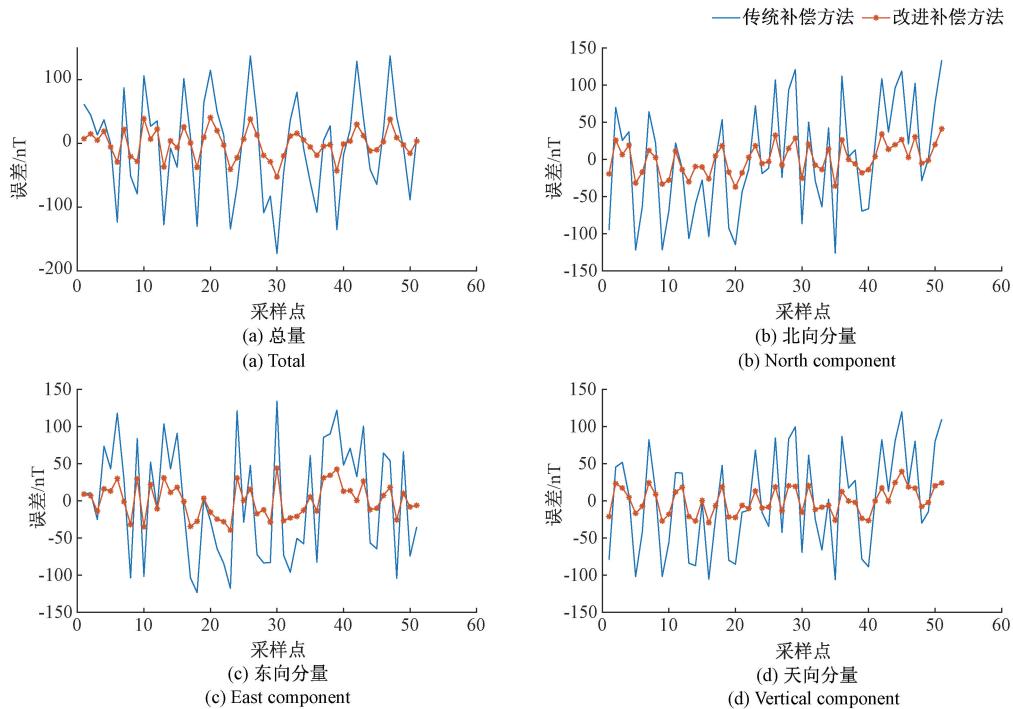


图 3 仿真中干扰参数变化 3% 的情况下传统方法和进化方法的补偿结果的详细比较

Fig. 3 Detailed comparison of compensation results between traditional method and evolutionary method under 3% variation of interference parameters in simulation

是使用数据集 A 估计的, 并用于对数据集 B 和数据集 C 进行补偿。另一种情景是采用本文提出的进化方法, 其中数

据集 A 仅提供初始模型参数, 然后使用数据集 B 来演化参数, 最后再使用数据集 C 进行进一步的演化补偿。

### 3.2 结果分析

如表 2 所示,展示了补偿模型参数估计结果。表 2 中的第一行是数据集 A 中的估计参数,而其他行是数据集中 B 和数据集中 C 中的演进参数。观察表 2 可以发现,对不

同时间下测得的试验数据进行估计得到的补偿参数有所区别,这表明地磁矢量测量中存在着时变磁场干扰,而利用改进的补偿方法可以准确估计随时间变化的模型参数,这对确保高性能补偿至关重要。

表 2 试验中干扰参数的估计值

Table 2 The estimated values of interference parameters in experiment

数据集	硬铁参数	感应参数
数据集 A	$\begin{bmatrix} 82.0841 \\ -23.3287 \\ 84.5159 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.0401 & 0.0215 & -0.0815 \\ 0.0227 & 0.1910 & 0.0283 \\ -0.0132 & 0.0224 & -0.0722 \end{bmatrix}$
数据集 B(进化方法)	$\begin{bmatrix} 83.4896 \\ -23.2589 \\ 85.3369 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.0469 & 0.0209 & -0.0823 \\ 0.0235 & 0.1935 & 0.0245 \\ -0.0133 & 0.0288 & -0.0722 \end{bmatrix}$
数据集 C(进化方法)	$\begin{bmatrix} 84.4629 \\ -23.9933 \\ 87.0329 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.0425 & 0.0219 & -0.0836 \\ 0.0233 & 0.1966 & 0.0278 \\ -0.0114 & 0.0232 & -0.0726 \end{bmatrix}$

如图 4~6 所示,分别显示了数据集 B 和 C 在有进化补偿和无进化补偿的情况下补偿性能。试验结果表明,传统的补偿方法可以将总强度、北分量、东分量和垂直分量的均方根误差从 4 528.0、1 289.1、5 681.9 和 3 200.0 nT 分别降低到 60.96、17.93、69.46 和 52.29 nT,而进化方法可以将其分别降低到 31.57、11.09、35.13 和

27.26 nT。对于模型参数变化较大的数据集 C,用传统方法计算出总强度、北分量、东分量的 RMS 误差,和垂直分量可以分别从 4 596.3、1 310.0、5 768.9 和 3 245.7 nT 降低到 123.34、35.93、142.12 和 100.54 nT,但用本文的进化方法,它可以进一步降低到 31.57、11.09、35.13 和 27.26 nT。

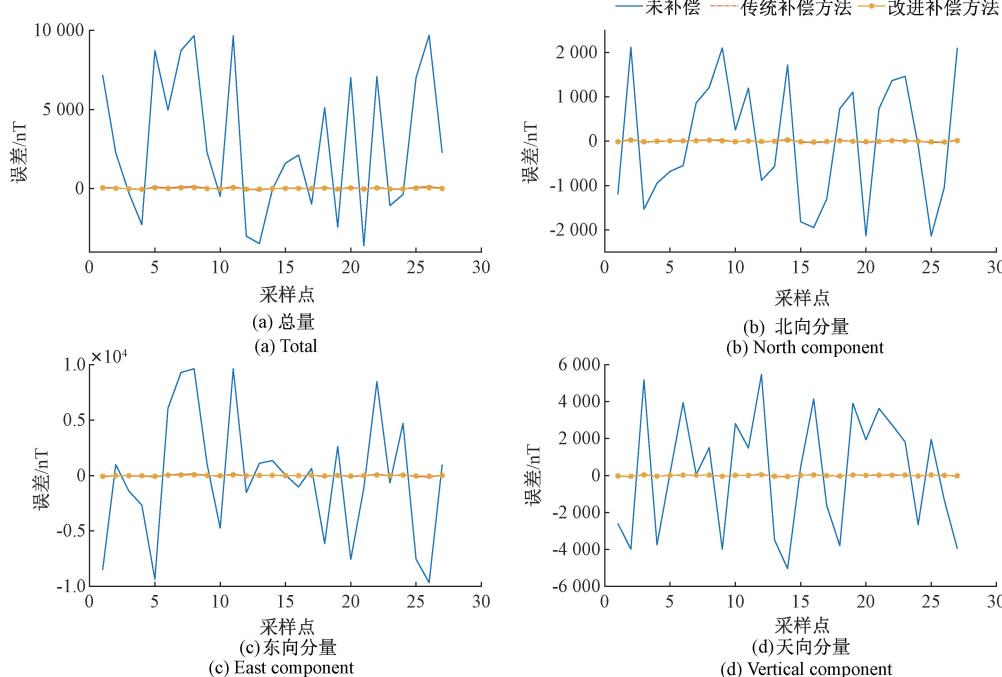


图 4 传统方法和基于数据集 B 的方法结果比较

Fig. 4 Experimental results comparison between traditional method and our proposed method based on DATASET-B

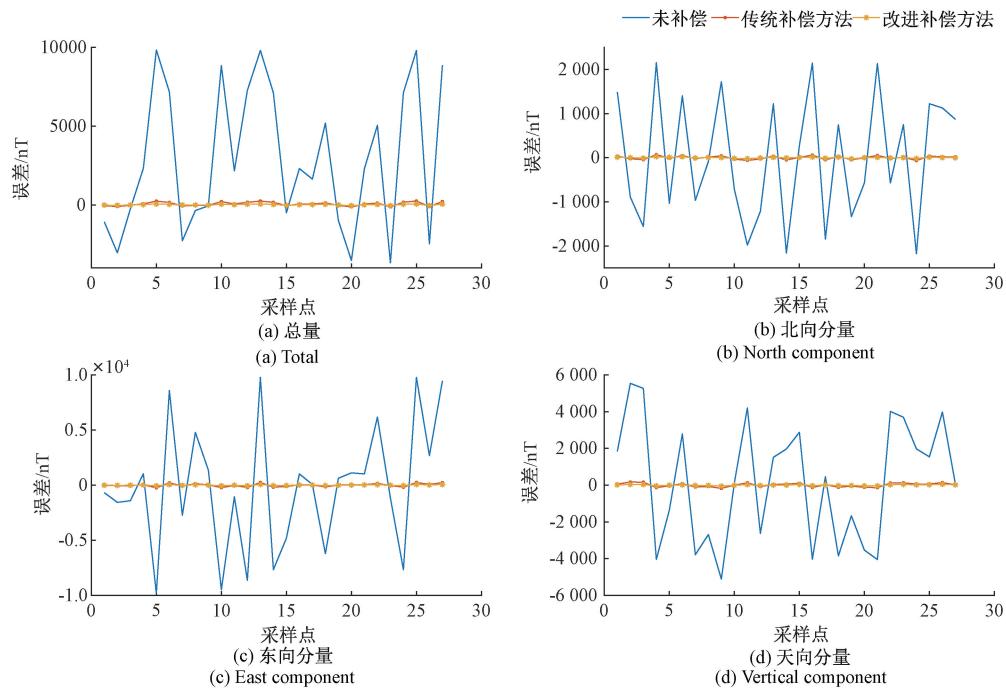


图 5 传统方法和基于数据集 C 的方法结果比较

Fig. 5 Experimental results comparison between traditional method and our proposed method based on DATASET-C

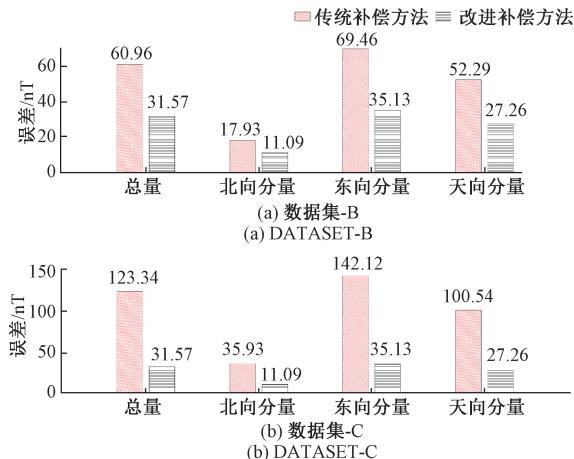


图 6 试验中补偿残差比较

Fig. 6 Compensation residual comparison in experiment

从以上试验结果可以看出,通过进化补偿,可以准确地估计出干扰模型参数随时间的变化,从而可以更准确地消除相应的干扰磁场。需要注意的是,在实际应用中,地磁矢量测量系统的磁特性变化大小决定了是否使用进化方法,进化补偿方法在磁干扰特性变化较大的情况下更适用,不能盲目采用进化补偿方法。此外,数据的质量将直接影响参数估计的性能。特别是对于进化方法,在使用不良数据的情况下,补偿效果将低于原始估计。

#### 4 结 论

磁干扰场主要是由铁磁性材料和电子设备产生的,

随着时间的推移,它不是恒定的,而是会随着各种因素而变化。本文提出了一种基于 Woodbury 方程法的进化补偿方法来解决干扰模型时变问题,其可以结合最新观测数据,对原有参数进行更新。仿真和试验结果表明,本文提出的方法可以有效地估计和消除磁特性变化,从而确保地磁矢量测量精度。本文提出的进化补偿方法在磁异常探测、地球物理勘探、地磁导航等领域有着巨大的应用潜力。

#### 参考文献

- [1] LIU ZH Y, ZHANG Q, PAN M CH, et al. Compensation of geomagnetic vector measurement system with differential magnetic field method [J]. IEEE Sensors Journal, 2016, 16(24): 9006-9013.
- [2] LIU J H, LI X H, ZHANG Y, et al. A comprehensive strapdown triaxial magnetometer calibration method considering temporal misalignment error [J]. Measurement, 2021, 175: 109092.
- [3] PANG H F, ZHU X J, PAN M CH, et al. Misalignment calibration of geomagnetic vector measurement system using parallelepiped frame rotation method [J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2016, 419: 309-316.
- [4] WAHDAN S, GEORGY J, NOURELDIN A. Three-dimensional magnetometer calibration with small space coverage for pedestrians [J]. IEEE Sensors Journal, 2015, 15(1): 598-609.

- [5] ZHANG X J, FAN L M, CHENG P, et al. A method to remotely track a magnetic target using a scalar magnetometer array [J]. *Journal of Sensors*, 2017, 2017(12): 1-9.
- [6] ZHANG Q, LI J, CHEN D X, et al. Method and experiment for compensating the interferential magnetic field in underwater vehicle [J]. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 2014, 47(1): 651-657.
- [7] LEI X SH, ZHANG X Y, HAO Y K. An intelligent ellipsoid calibration method based on the grey wolf algorithm for magnetic compass[J]. *Journal of Bionic Engineering*, 2021, 18(2): 453-461.
- [8] FENG CH N, HU X P, HE X F, et al. Research on MIMU/BD integrated navigation with three-axis magnetometer aided [C]. 2014 IEEE Chinese Guidance, Navigation and Control Conference, 2014.
- [9] ZHANG Q, WAN CH B, PAN M CH, et al. A component compensation method for magnetic interferential field[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2017, 139: 331-337.
- [10] PANG H F, ZHANG Q, LI J, et al. Improvement of vector compensation method for vehicle magnetic distortion field [J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2014, 353: 1-5.
- [11] 缪林良,米洒洒,王玮琳,等. 航磁矢量测量的误差分析和补偿算法研究[J]. *电子测量与仪器学报*, 2021, 35(12): 15-23.
- MIAO L L, MI S S, WANG W L, et al. Error analysis and compensation algorithm research of aeromagnetic vector measurement [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2021, 35(12): 15-23.
- [12] LUO S T, PANG H F, LI J, et al. Calibration strategy and generality test of three-axis magnetometers [J]. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 2013, 46(10): 3918-3923.
- [13] LI T, ZHAO X, ZHANG J S. A new compensation method for magnetic field distortions based on a 3-D Helmholtz coil [J]. *Measurement Science & Technology*, 2019, 30(1):1-9.
- [14] WAN CH B, PAN M CH, ZHANG Q, et al. Improved component compensation for geomagnetic field vector measurement using Lagrange multiplier method [J]. *IET Science Measurement & Technology*, 2017, 11(8): 1094-1098.
- [15] HU J, NING ZH W, CHANG Y. Active compensation method for strong magnetic interference of mems electronic compass[J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 48860-48872.
- [16] LI J, ZHANG Q, CHEN D Y, et al. Magnetic interferential field compensation in geomagnetic measurement [J]. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 2014, 36(2): 244-251.
- [17] MITSOTAKIS D. On iterative methods based on sherman-morrison-woodbury splitting [J]. *Applied Numerical Mathematics*, 2024, 201: 282-289.
- [18] LIU ZH Y, PANG H F, PAN M CH, et al. Calibration and compensation of geomagnetic vector measurement system and improvement of magnetic anomaly detection[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2016, 13(3): 447-451.

## 作者简介

刘中艳,副教授,主要研究方向为智能传感与探测等。

E-mail: liuzhongyan@nudt.edu.cn

邱晓天(通信作者),副教授,主要研究方向为智能传感与探测等。

E-mail: 42072716@qq.com