

基于阻尼粒子群优化的地磁场测量误差补偿*

李 婷¹, 张金生¹, 王仕成¹, 李冬予²

(1. 火箭军工程大学 西安 710025; 2. 中国运载火箭技术研究院 北京 100076)

摘要:针对三轴磁力仪在磁场测量过程中的磁干扰问题,提出了基于阻尼粒子群优化算法的磁测误差补偿方法。建立了磁力仪误差和载体磁干扰的一体化误差补偿模型,分别采用阻尼粒子群算法和 Two-step 方法对非线性观测模型进行参数估计。以质子磁力仪数据作为真值,借助无磁转台充分连续采样,实验结果显示,阻尼粒子群算法对于磁场测量误差具有良好的抑制作用。补偿后,由阻尼粒子群算法和 Two-step 方法得到的均方根误差分别由 1 025.7 降至 60.304 4、581 nT。结果表明,阻尼粒子群算法取得了更好的补偿效果,补偿精度提高了至少一个数量级,为磁场测量误差提供了一种非常有效的补偿方法。

关键词:捷联三轴磁力仪;测量误差补偿;参数估计;阻尼粒子群优化算法

中图分类号: TH762.3 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4030

Compensation of geomagnetic field measurement error based on damped particle swarm optimization

Li Ting¹, Zhang Jinsheng¹, Wang Shicheng¹, Li Dongyu²

(1. Rocket Force University of Engineering, Xi'an 710025, China;

2. China Academy of Launch Vehicle Technology, Beijing 100076, China)

Abstract: Aiming at the magnetic interference problem of three-axis magnetometers in magnetic field measurement process, a new magnetic field measurement error compensation method based on damped particle swarm optimization (DPSO) algorithm is proposed. A comprehensive error compensation model for magnetometer error and geomagnetic interference field is established. DPSO algorithm and two-step method are used to carry out the parameter estimation work of nonlinear observation model, respectively. The scalar value of the proton magnetometer is taken as the true value and a non-magnetic turntable is employed in the experiment for continuous sampling. Experiment results demonstrate that the DPSO algorithm has good suppression capability to magnetic field measurement error. After compensation, the root mean square errors (RMSE) are reduced from 1 025.7 to 60.304 4 and 581 nT for DPSO algorithm and two-step method, respectively. The results indicate that better compensation performance is achieved with DPSO algorithm, and the compensation accuracy is improved at least by one order of magnitude, which provides an efficient compensation method for magnetic field measurement error.

Keywords: strapdown three-axis magnetometer; measurement error compensation; parameter estimation; damped particle swarm optimization (DPSO) algorithm

0 引 言

地磁场具有无源、无辐射、与空间位置一一对应的特点,为航空、航天、航海提供了天然的导航资源,地磁匹

配导航成为了导航技术领域研究的热点。地磁场数据的获取是地磁导航的基础,在实际测量中,捷联在载体内部的三轴磁力仪测量的地磁场数据不仅包括真实的地磁矢量,还包括载体内部各种电子设备的干扰信号,这严重影响了地磁场的测量精度。地磁传感器的标定

与磁场补偿技术成为制约地磁匹配导航技术发展的重要因素之一。

针对干扰磁场补偿问题,许多学者进行了研究。文献[1]建立了经典的 Tolles-Lawson 方程,对包含载体感应磁场、固定磁场和涡流磁场干扰的磁测误差进行补偿; Gebre-Egziabher D 等人^[2]提出了非线性两步估计法求解传感器误差参数,第 1 步利用批处理最小二乘法对辅助变量进行求解,第 2 步采用代数方法待估计参数求解;文献[3]利用 Two-step 法实现了包含传感器非正交误差的传感器校正,并利用三轴磁力仪验证了该算法的有效性;文献[4]利用椭圆拟合思想对磁测误差进行补偿,该方法利用带椭圆约束的最小二乘法拟合测量数据,实现载体磁场的快速标定然后利用标定参数进行磁干扰补偿,然而该方法最多可以实现 6 个补偿参数的标定;文献[5]将载体运动空间由二维平面拓展到三维空间,利用椭球拟合法实现载体磁干扰补偿,仍是最多可以实现 9 个参数的标定。椭球(圆)拟合法对于数据采集时载体姿态有一定的要求,当采集数据不能拟合成椭球(圆)时,该方法不能使用。文献[6]提出了基于高斯牛顿迭代法的磁强计校正方法,并取得了较高的补偿精度,然后该方法对于初始值敏感,当初始值距离真值较远时该算法并不能收敛到真值附近;文献[7]设计了基于矩阵形式的数学模型对磁力仪误差进行修正,并构造了相应的函数链接型神经网络实现参数辨识,并取得了较高的磁力仪转向误差补偿精度。

针对方程两侧都含有误差的情况,文献[8]提出了总体最小二乘法(total least squares, TLS)估计模型参数,并取得了比 Two-step 法更高精度的补偿结果,然而当载体无法实现大范围机动时,测量数据有时无法激励所有的磁测误差,此时观测方程会出现病态的情况,上述方法的稳定性将会大大降低。针对磁干扰补偿中的病态问题,文献[9]提出了截断总体最小二乘(truncated TLS, TTLS)方法对陆用车载磁力仪进行标定,并获得了稳定的数值解,满足了车载磁导航的精度需求。

现有的文献大多是基于标量约束思想,利用校正后的总场值与高精度磁力仪(通常为质子磁力仪或者光泵磁力仪,只能测量磁场总场值)测量示数相等的思想构建非线性方程。迭代法是求解非线性方程最常用的方法,然而该方法严重依赖于初始解,有时在模型比较复杂时无法得到数值解。文献[10]利用粒子群优化实现了磁力仪的标定,并取得了比 Two-step 更高的标定精度,显示了统计类算法解决非线性优化问题的潜力。智能优化算法对初始值不敏感,且对于高维非线性方程具有良好的求解能力,本文提出了基于阻尼粒子群优化(damped particle swarm optimization, DPSO)算法的磁干扰补偿方法。首先对磁力仪误差和载体磁干扰进行统一建模;然

后利用阻尼粒子群算法估计模型参数;最后利用实测数据验证了该方法可以大大提高测量精度,均方根误差提高了至少一个数量级。

1 问题描述

1.1 输入输出模型

三轴磁力仪在测量时受到来自两个方面的影响:1)磁力仪误差。由于制造材料和制造工艺的限制,仪器不可避免的存在非正交误差、刻度因子误差和零偏误差;2)载体磁干扰^[11]。软磁材料受磁场磁化而产生的软磁误差、硬磁材料经外部磁场磁化后保留的剩余磁场以及一些难以建模的噪声和杂散磁场。这两类误差同时作用于磁力仪的输出,在载体坐标系下,捷联三轴磁力仪的输出模型^[12]为:

$$\mathbf{B}^s = \mathbf{C}_M \mathbf{C}_{No} \mathbf{C}_{SF} (\mathbf{C}_g^b \mathbf{B}^g + \mathbf{B}_{HI} + \mathbf{B}_{SI}) + \mathbf{b}_0 + \mathbf{w} \quad (1)$$

式中:上角标 b 表示载体坐标系, g 表示地理坐标系。 \mathbf{B}^s 表示三轴磁力仪测量输出矢量, \mathbf{B}^g 表示地理坐标系下的地磁矢量, \mathbf{C}_M 为安装误差矩阵, \mathbf{C}_{No} 为非正交误差矩阵, \mathbf{C}_{SF} 为刻度因子误差矩阵, \mathbf{C}_g^b 为地理坐标系到载体坐标系的转换矩阵, \mathbf{B}_{HI} 为硬磁误差, \mathbf{B}_{SI} 为软磁误差, \mathbf{b}_0 为磁力仪的零偏误差, \mathbf{w} 为测量噪声矢量。

1.1.1 磁力仪误差分析

理想情况下,磁力仪捷联在载体内部,安装误差矩阵 \mathbf{C}_M 为单位矩阵。设理想正交坐标系的 3 个轴为 OX 、 OY 、 OZ ,实际传感器的三轴为 OX' 、 OY' 、 OZ' 。设 OX' 与 OX 重合且面 $X'OY'$ 与 XOY 共面,记 OY' 与 OY 之间的夹角为 β , OZ' 与 XOY 的夹角为 α , 与 XOZ 平面的夹角为 γ , 如图 1 所示。

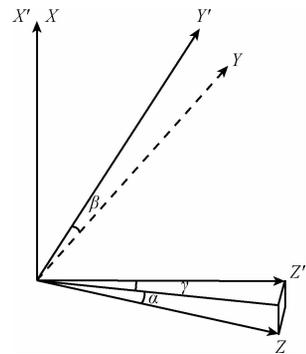


图 1 三轴磁力仪空间误差

Fig. 1 Space error of three-axis magnetometer

非正交矩阵可表示为:

$$\mathbf{C}_{No} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ \sin\alpha & \cos\alpha & 0 \\ \sin\beta\cos\gamma & \sin\beta & \cos\beta\cos\gamma \end{bmatrix} \quad (2)$$

由于制造工艺的限制,传感器的3个轴可能存在微小的差异。由于灵敏度不同造成的差异称为刻度因子误差;此外,磁力仪的磁芯可能存在剩磁,由输出信号发生漂移引起的误差称为零偏误差,在一段时间内认为固定不变。

$$\mathbf{C}_{\text{SF}} = \text{diag}(s_x, s_y, s_z) \quad (3)$$

$$\mathbf{b}_0 = [b_{0x} \ b_{0y} \ b_{0z}]^T \quad (4)$$

1.1.2 载体干扰磁场分析

按误差来源可将载体磁干扰分为硬磁干扰、软磁干扰和随机磁干扰。

硬磁误差主要来源于载体硬磁材料受外界磁场磁化后保留的磁性,常见的有永磁体和高碳钢。硬磁材料一经磁化后,剩磁可以保留较长时间保持不变,表示为:

$$\mathbf{B}_{\text{H}} = [b_{\text{H}x} \ b_{\text{H}y} \ b_{\text{H}z}]^T \quad (5)$$

软磁误差是软磁材料受到外部磁场的激励而产生的磁场,其分布与激励磁场的方向和幅值有关,当载体连续运动时,软磁磁场也会连续的变化,软磁误差可表示为:

$$\mathbf{B}_{\text{SI}} = \mathbf{C}_{\text{SI}}(\mathbf{C}_g^b \mathbf{B}^g + \mathbf{B}_{\text{H}}) \quad (6)$$

式中: \mathbf{C}_{SI} 为软磁系数矩阵。

由载体内部电子设备、输电线等产生的干扰磁场以及一些难以建模的杂散磁场构成了随机干扰磁场。有效的抑制随机干扰磁场的方法有两个:1)尽量通过低磁材料和磁屏蔽技术降低磁干扰;2)利用低通滤波器对磁干扰进行初步的处理。

实际测量过程中,随机干扰可以通过一定方法降低且相对于系统误差较小, w 可以先忽略。将式(2)~(6)代入式(1),可得:

$$\mathbf{B}^s = \mathbf{K}\mathbf{B}^b + \mathbf{O} \quad (7)$$

式中: $\mathbf{K} = \mathbf{C}_{\text{NO}}\mathbf{C}_{\text{SF}}(\mathbf{I} + \mathbf{C}_{\text{SI}})$ 为上三角矩阵, $\mathbf{O} = \mathbf{K}\mathbf{B}_{\text{H}} + \mathbf{b}_0$ 。

从数学角度看,磁力仪误差和载体磁干扰可以统一建模为3种误差,总非正交误差、总刻度因子误差、总零偏误差^[13-14],即:

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} \kappa_1 & 0 & 0 \\ \kappa_2 \sin \rho_1 & \kappa_2 \cos \rho_1 & 0 \\ \kappa_3 \sin \rho_2 \cos \rho_3 & \kappa_3 \sin \rho_3 & \kappa_3 \cos \rho_2 \cos \rho_3 \end{bmatrix}, \mathbf{O} = \begin{bmatrix} o_1 \\ o_2 \\ o_3 \end{bmatrix},$$

$\kappa_1 \sim \kappa_3$ 是总刻度因子误差, $\rho_1 \sim \rho_3$ 为总非正交角误差, $o_1 \sim o_3$ 是总零偏误差。

1.2 校正模型

由式(7)可知,磁力仪输出矢量 \mathbf{B}^s 和载体坐标系下的真实地磁矢量 \mathbf{B}^b 之间存在旋转、缩放和平移的关系。校正模型以传感器的输出矢量 \mathbf{B}^s 作为输入,以校正后的

地磁矢量 $\hat{\mathbf{B}}^b$ 作为输出,则有:

$$\mathbf{K}\hat{\mathbf{B}}^b = \mathbf{K}^{-1}(\mathbf{B}^s - \mathbf{O}) = \mathbf{P}(\mathbf{B}^s - \mathbf{O}) \quad (8)$$

式中: $\hat{\mathbf{B}}^b$ 为标定后载体坐标系下的地磁矢量, $\mathbf{P} = \mathbf{K}^{-1}$ 也为下三角矩阵。

由式(8)可知,磁测误差补偿的本质就是对 \mathbf{P} 和 \mathbf{O} 进行参数估计。智能优化算法对于高维非线性方程具有良好的解算能力,因此可借鉴智能优化算法求解参数。

2 阻尼粒子群算法

2.1 粒子群算法基本原理

粒子群算法是由 Kennedy J 等人^[15]提出的一种随机优化群智能算法。算法采用速度和位置驱动搜索模型,种群中每一个粒子代表解空间的一个候选解,所有粒子都有被优化的函数决定的适应度函数值,并通过跟踪种群中每一代的个体最优值和全体最优值更新自己的速度和位置。

假设在一个 D 维搜索空间中,种群中有 m 个粒子,在第 k 次迭代时,第 i 个粒子的速度和位置可表示分别表示为: $\mathbf{v}_i^k = (v_{i1}^k, v_{i2}^k, \dots, v_{ij}^k, \dots, v_{iD}^k)$, $\mathbf{x}_i^k = (x_{i1}^k, x_{i2}^k, \dots, x_{ij}^k, \dots, x_{iD}^k)$,每一个粒子的历史最优个体记为 $\mathbf{p}_i^k = (p_{i1}^k, p_{i2}^k, \dots, p_{ij}^k, \dots, p_{iD}^k)$,种群最优个体为 $\mathbf{g}_i^k = (g_{i1}^k, g_{i2}^k, \dots, g_{ij}^k, \dots, g_{iD}^k)$ 。所有粒子根据式(9)和(10)更新当前的速度和位置:

$$v_{ij}^{k+1} = w \cdot v_{ij}^k + c_1 r_1 (p_{ij}^k - x_{ij}^k) + c_2 r_2 (g_{ij}^k - x_{ij}^k) \quad (9)$$

$$x_{ij}^{k+1} = x_{ij}^k + v_{ij}^{k+1} \quad (10)$$

式中: $i=1,2,\dots,m$ 表示种群中的第 i 个粒子, $j=1,2,\dots,D$ 表示每个粒子中的第 j 维度; c_1 和 c_2 为学习因子,表示粒子对于自身认知和全局认知的能力; r_1 和 r_2 表示(0,1)的随机数。此外,粒子的速度被限制在 $[-V_{\text{max}} \ V_{\text{max}}]$ 来保证算法的收敛。

惯性权重 w 在粒子群算法中扮演了重要的角色。合适的 w 可以保持全局搜索和局部探索间的平衡^[16],较大的 w 值有利于跳出局部极值点,较小的 w 值有利于算法收敛。

2.2 改进的 w 参数递减策略

粒子群算法最大的缺点就是容易陷入局部最优,针对这个问题,本文结合模拟退火的思想,对 w 采用震荡递减的策略,即:

$$w = 0.99^k \cdot rt/2 + \alpha \quad (11)$$

式中: k 为迭代次数, rt 为服从(0,1)均匀分布的随机数, α 为一常数,取值范围为 $[0,0.5]$, w 的震荡曲线如图3所示。

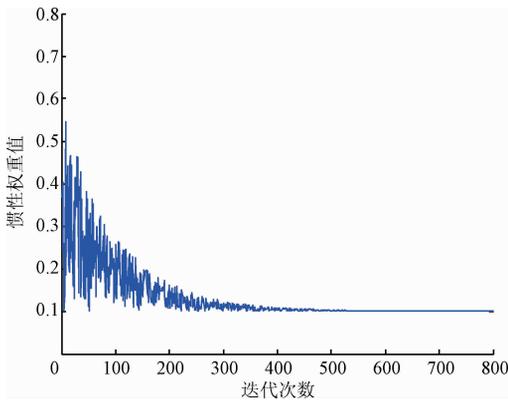


图 2 w 震荡曲线

Fig. 2 The curve of inertia weight w

由图 2 可知, w 并不是光滑递减,而是类似波动阻尼的现象,这种策略有助于在算法早期跳出局部极值,在算法晚期更快的收敛到全局极值。由于 w 类似阻尼震荡曲线,因此称改进的算法为阻尼粒子群算法。文献[17]利用多极值函数测试,已经证明相较于惯性权重单调递减的粒子群优化(partical swarm optimization, PSO)算法,本文中惯性权重震荡衰减的策略有利于跳出局部极值,从而能够更有效地搜索到全局极值,且反演速度也更快,同时,文章指出当 $\alpha = 0.1$ 时,算法具有较高的计算效率和最少的计算时间。

2.3 基于阻尼粒子群算法的磁场测量补偿

由式(8)可得,将矩阵 \mathbf{P} 和 \mathbf{O} 中的 9 个未知参数作为粒子,即 $D=9$,适应度函数可以表示:

$$\operatorname{argmin}f(\mathbf{P}, \mathbf{O}) = \sum_{i=1}^{num} (R - \|\mathbf{P}(\mathbf{B}_i - \mathbf{O})\|_2)^2 \quad (12)$$

式中: R 为匀强磁场区域中由质子磁力仪测得的精确总场值,作为真实磁场值, num 为实际采样点数;以校正后的输出标量值与真实磁场值之差的平方作为适应度函数,通过最小化三轴磁力仪的输出模值与磁场真实值之差的平方实现磁场的补偿,算法步骤如下。

1) 参数初始化。设定粒子维数,种群大小,粒子的速度和位置范围,最大迭代次数,参数设置详如表 1 所示。

表 1 参数设置

Table 1 Parameter setting

| 参数 | 取值 |
|-----------|-------|
| α | 0.1 |
| $maxgen$ | 800 |
| m | 300 |
| D | 9 |
| C_1 | 1.494 |
| C_2 | 1.494 |
| V_{max} | 0.4 |

- 2) 计算初始种群中每个粒子的适应度函数值。
- 3) 进化开始,将当前粒子的适应度值与个体历史最优值进行比较,保留更优者;将当前种群全局最优者与历史全局最优者进行比较,保留更优者。
- 4) 根据式(9)、(10)进行更新。
- 5) 判断是否满足停止条件,若满足,则停止迭代;反之,转到步骤 2)。

3 实验分析

3.1 实验条件

实验时间选在傍晚,此时日变对于磁场的影响比较微弱,地点选在一个空旷的操场中心,周围没有明显的磁干扰设备,采用三轴磁阻传感器测量磁场,高精度质子磁力仪测量总场作为真实磁场值,仪器参数如表 2 所示。

表 2 磁阻传感器参数

Table 2 Parameters of the magnetoresistive sensor

| 指标 | 参数值 |
|-------------------------|----------|
| 型号 | HMR23002 |
| 量程/mT | ± 2 |
| 采样频率/Hz | 10 ~ 157 |
| 分辨率/mT | 67 |
| 非正交误差/($^\circ$) | < 0.01 |
| 零偏误差(25 $^\circ$ C)/nT | < 10 |
| 刻度因子误差(25 $^\circ$ C)/% | < 0.05 |

3.2 实验过程

实验分为两组,第 1 组采样 600 组数据作为校正数据,第 2 组采样 200 组数据作为验证数据,在任意姿态下连续测量磁场矢量。原始测量数据与真实地磁总场值如图 3 所示。

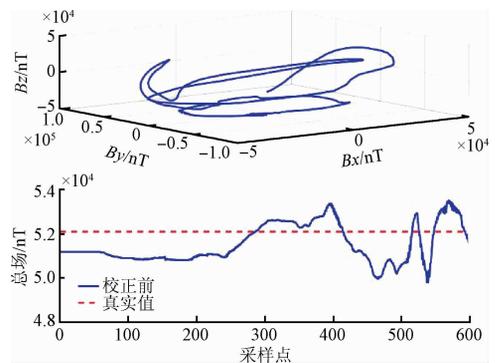


图 3 磁场测量原始数据

Fig. 3 The raw data of magnetic field measurement

分别采用 DPSO 和 Two - step 法对补偿参数进行估计。在 DPSO 算法求解过程中,以进化代数 $maxgen = 800$ 作为迭代停止条件,迭代结果如图 4 ~ 6 所示。

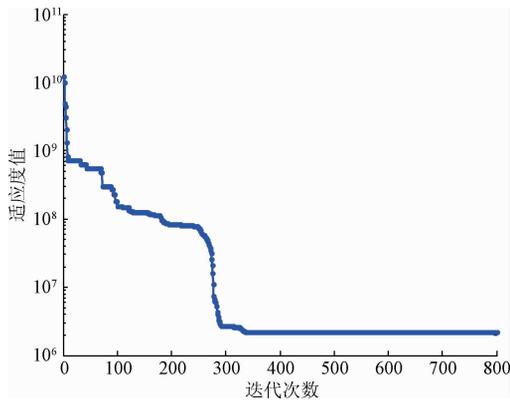


图4 适应值曲线

Fig. 4 The curve of fitness value

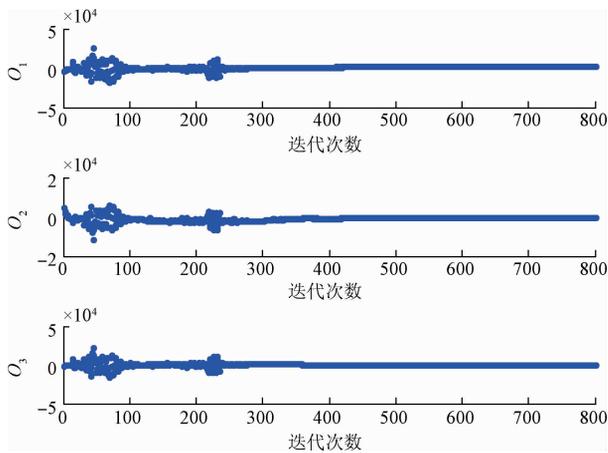


图5 O矩阵参数进化曲线

Fig. 5 Parameter evolution curve of matrix O

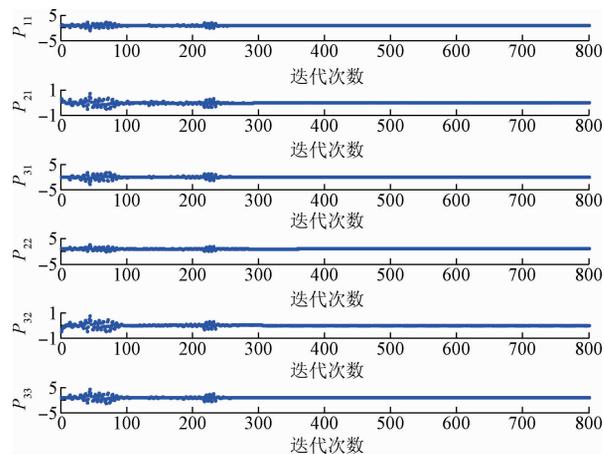


图6 P矩阵参数进化曲线

Fig. 6 Parameter evolution curve of matrix P

Two-step 在第2步的求解过程中会出现多组解的情况,选取其中一组解,如表3所示。为了避免所示曲线的

混淆,选取第1组采样中前500组数据的补偿误差如图7所示。

表3 参数估计结果

Table 3 Parameter estimation result

| 待估计参数 | DPSO | Two-step |
|----------|------------|----------|
| P_{11} | 1.011 7 | 1.012 9 |
| P_{21} | 0.002 8 | 0.002 9 |
| P_{31} | -0.006 7 | 0.006 8 |
| P_{22} | 1.001 0 | 1.002 2 |
| P_{32} | -0.016 6 | 0.016 7 |
| P_{33} | 0.997 2 | 0.997 5 |
| O_1 | 1 576.1 | 1 577.9 |
| O_2 | -604.379 4 | -599.57 |
| O_3 | -41.747 1 | -55.68 |

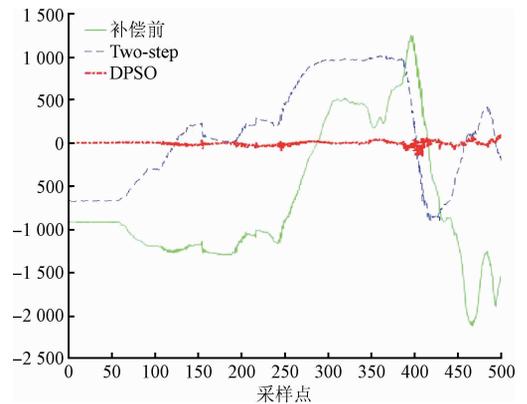


图7 第1组数据补偿误差

Fig. 7 Compensation errors of data 1 for DPSO algorithm and two-step method

3.3 实验结果与分析

由图3知,磁力仪各个敏感轴的输出变化很大,总场的峰峰值高达 3.7×10^3 nT,这表明磁力仪受到强磁干扰,磁场测量误差很大。由图4可知,在350代左右进化停止,适应度值由 10^{10} 降到 10^6 ,DPSO算法达到了较好的收敛效果。图5和6表示每一代最优个体对应的参数搜索过程,在进化初期,每个粒子随机分布在相应的取值范围区间内,伴随迭代的进行经过相互学习牵引最终收敛到最优值附近。Two-step法是非线性优化的常用方法,第1步设置中间变量,将式(12)所示的非线性最优优化转化为线性最优问题,对中间变量进行求解;第2步对中间变量和待求参数进行代数求解,然而该方法的第2步需要求解多元多次方程,解不唯一。经计算,利用DPSO和Two-step法对干扰进行补偿时,均方根误差(root mean square error, RMSE)由补偿前的1 025.7分别降至

60.304 4.581 nT。DPSO 相较于 Two-step 法具有更高的补偿精度,达到了理想的补偿效果。

3.4 验证分析

将表 3 中的参数估计结果分别带入第 2 组实验数据进行验证,补偿结果如图 8 所示。

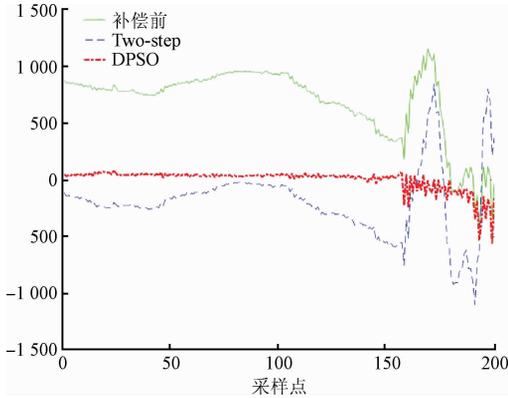


图 8 第 2 组数据补偿误差

Fig. 8 Compensation errors of data 2 for DPSO algorithm and two-step method

由图 8 可知,利用 DPSO 的补偿误差更小,均方根误差由 721 降至 88.6 nT,Two-step 法能在一定程度上减小磁场干扰,但是补偿结果并不理想,均方根误差由 721 降至 449.2 nT。第 1 组测量数据的补偿参数在第 2 组测量中也取得了较好的补偿效果,由此可见 DPSO 对于磁干扰补偿具有较好的普遍适用性。

4 结 论

本文建立了包含磁力仪误差和载体磁干扰的综合补偿模型,分别采用阻尼粒子群算法和 Two-step 法进行参数估计,实验结果表明,基于阻尼粒子群的磁场测量误差补偿效果更好,补偿精度提高了至少一个数量级。此外,阻尼粒子群方法不依赖于初始解,对非线性模型直接求解,为磁场测量干扰补偿提供了一种有效的解决方法。

参考文献

[1] TOLLES W E. Magnetic field compensation system: US. US2706801[P]. 1955.
 [2] GEBRE-EGZIABHER D, ELKAIM G H, POWELL J D, et al. A non-linear, two-step estimation algorithm for calibrating solid-state strapdown magnetometers [C]. Proceedings of International St Petersburg Conference on Navigation Systems, 2001: 28-30.
 [3] FOSTER C C, ELKAIM G H. Extension of a two-step calibration methodology to include nonorthogonal sensor

axes[J]. IEEE Transactions on Aerospace & Electronic Systems, 2008, 44(3): 1070-1078.

- [4] 张晓明,赵剡. 基于椭圆约束的新型载体磁场标定及补偿技术 [J]. 仪器仪表学报, 2009, 30 (11): 2438-2443.
 ZHANG X M, ZHAO Y. New auto-calibration and compensation method for vehicle magnetic field based on ellipse restriction [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2009, 30(11): 2438-2443.
 [5] 于振涛,吕俊伟,稽绍康. 基于椭球约束的载体三维磁场补偿方法 [J]. 哈尔滨工程大学学报, 2014, 35 (6): 731-734.
 YU ZH T, LV J W, JI SH K. A compensation method for the vehicle 3-D magnetic field based on ellipsoid constraint [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2014, 35(6):731-734.
 [6] 庞鸿锋,潘孟春,王伟,等. 基于高斯牛顿迭代算法的三轴磁强计校正 [J]. 仪器仪表学报, 2013, 34 (7): 1506-1511.
 PANG H F, PAN M CH, WANG W, et al. Error calibration of three axis magnetometer based on Gauss-Newton iteration algorithm [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013, 34(7): 1506-1511.
 [7] 吴德会,黄松玲,赵伟. 基于 FLANN 的三轴磁强计误差校正研究 [J]. 仪器仪表学报, 2009, 30 (3): 449-453.
 WU D H, HUANG S L, ZHAO W. Research on correction of tri-axial magnetometer based on FLANN [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2009, 30(3): 449-453.
 [8] 吴志添,武元新,胡小平,等. 基于总体最小二乘的捷联三轴磁力仪标定与地磁场测量误差补偿 [J]. 兵工学报, 2012, 33 (10): 1202-1209.
 WU ZH T, WU Y X, HU X P, et al. Calibration of strapdown three-axis magnetometer and measurement error compensation of geomagnetic field based on total least squares [J]. Acta Armamentarii, 2012, 33 (10): 1202-1209.
 [9] 张滢,杨任农,李明阳,等. 基于截断总体最小二乘算法的车载三轴磁力仪标定 [J]. 兵工学报, 2015, 36(3):427-432.
 ZHANG Y, YANG R N, LI M Y, et al. Calibration of vehicular three-axis magnetometer via total least squares algorithm [J]. Acta Armamentarii, 2015, 36 (3): 427-432.
 [10] WU ZH T, WU Y X, HU X P, et al. Calibration of three-axis strapdown magnetometers using particle swarm optimization algorithm [C]. International Symposium on

Robotic and Sensors Environment, 2011:160-165.

- [11] 李季,潘孟春,罗诗途,等. 半参数模型在载体干扰磁场补偿中的应用研究[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(9):2147-2152.
- LI J, PAN M CH, LUO SH T, et al. Study on the application of semi-parametric model in vehicle interferential magnetic field compensation [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013, 34 (9): 2147-2152.
- [12] LIU Y X, LI X S, ZHANG X J, et al. Novel calibration algorithm for a three-axis, strapdown magnetometer [J]. Sensors, 2014, 14(5):8485-8504.
- [13] BONNET S, BASSOMPIERRE C, GODIN C, LESECQ S, et al. Calibration methods for inertial and magnetic sensors[J]. Sensors and Actuators APhysical, 2009, 156(2): 302-311.
- [14] VALERIE R, AFZAL M H, Gerard L. Complete Triaxis Magnetometer Calibration in the Magnetic Domain[J]. Journal of Sensors, 2010, 2010(1): 23-59.
- [15] KENNEDY J, EBERHART R. Particle swarm optimization [C]. IEEE International Conference on Neural Networks, 1995,4(8): 1942- 1948.
- [16] TRELEA I C. The particle swarm optimization algorithm convergence analysis and parameter selection [J]. Information Processing Letters, 2003, 85(6): 317-325.
- [17] 师学明,肖敏,范建科,等. 大地电磁阻尼粒子群优化反演法研究[J]. 地球物理学报, 2009, 52(4): 1114-1120.

SHI X M, XIAO M, FAN J K, et al. The damped PSO algorithm and its application for magnetotelluric sounding data inversion [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2009, 52(4): 1114-1120.

作者简介



李婷,2012 年于西北工业大学获得学士学位,2015 年于第二炮兵工程大学获得硕士学位,现为火箭军工程大学博士研究生,主要研究方向为地磁导航磁场测量误差补偿。
E-mail:648033500@qq.com

Li Ting received her B. Sc. degree from Northwestern Polytechnical University in 2012 and M. Sc. degree from The Second Artillery Engineering University in 2015. Now, she is a Ph. D. candidate in Rocket Force University of Engineering. Her main research interest includes vehicle interferential magnetic field compensation in geomagnetic measurement.



张金生,2008 年毕业于第二炮兵工程学院获得博士学位,现为火箭军工程大学控制工程系副教授,主要研究方向为导航、制导与控制。
E-mail:35118796@qq.com

Zhang Jinsheng received his Ph. D. degree from The Second Artillery Engineering College in 2008. Currently, he is an associate professor in Department of Control Engineering, Rocket Force University of Engineering. His main research interest includes navigation, guidance and control.