

## 基于椭球曲面拟合的三维磁罗盘误差补偿算法

朱建良<sup>1</sup>, 王兴全<sup>2</sup>, 吴盘龙<sup>1</sup>, 薄煜明<sup>1</sup>, 张捷<sup>1</sup>

(1. 南京理工大学 自动化学院, 南京 210094; 2. 天津航海仪器研究所, 天津 300131)

**摘要:** 针对现有三维磁罗盘误差补偿速度慢、需专用转台、野外使用不便的问题, 提出了一种建立总磁场的不等边椭球曲面数学模型进行误差补偿的方法。首先根据 Poisson 方程描述的总磁场测量模型, 得出一般椭球曲面模型, 然后, 采用牛顿迭代法对椭球曲面方程线性化, 分别使用最小二乘法和总体最小二乘法计算线性化方程, 推导椭球曲面拟合的数学公式, 计算椭球曲面参数, 最后, 利用最小二乘法提出并推导参数初值的计算公式, 给出了选取数据点的方法。实验结果表明, 仅手持磁罗盘在各象限旋转即可实现误差补偿, 航向测量精度可达  $0.8^\circ$ , 补偿精度与传统的转台补偿基本相同, 而补偿方式更为灵活, 适用于无转台设备的野外环境测量使用。

**关键词:** 三维磁罗盘; 椭球曲面拟合; 总体最小二乘法; 牛顿迭代法

**中图分类号:** U666.1

**文献标志码:** A

## Three-dimensional magnetic compass error compensation algorithm based on ellipsoid surface fitting

ZHU Jian-liang<sup>1</sup>, WANG Xing-quan<sup>2</sup>, WU Pan-long<sup>1</sup>, BO Yu-ming<sup>1</sup>, ZHANG Jie<sup>1</sup>

(1. Automation College, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China; 2. Tianjin Navigation Instrument Research Institute, Tianjin 300131, China)

**Abstract:** To solve the problems in existing 3D magnetic compasses (such as, error compensation is slow, special turntable is needed, and field applying is inconvenient), we put forward a method to establish a scalene ellipsoid surface mathematical model of the general magnetic field to compensate errors. First, we established the ellipsoid surface model according to the general magnetic field model presented by Poisson equation. Then, we linealized the ellipsoid surface equation using Newton iteration method, and used least square method and total least square method respectively to calculate linear equations, derive the mathematical forum of ellipsoid surface fitting and the ellipsoid surface parameters. Finally, we derived the calculation forum of parameters' initial value by using least square method, and gave the method of selecting data point. The results show that the errors can be compensated only by using a hand to hold a magnetic compass and let it spin in all quadrants. And the heading measurement precision can reach  $0.8^\circ$ . The compensation precision of this method is almost the same as that of traditional turntable compensation methods, but it is more agile and fit for the field use with no turntable equipment.

**Key words:** three-dimensional magnetic compass; ellipsoid surface fitting; TLS; Newton iteration method

磁罗盘通过测量地球磁场来确定载体航向角, 采用三轴磁阻传感器进行地球总磁场测量, 利用两轴加速度计测量载体的重力加速度, 再通过补偿算法校准

导航系统的误差, 得到载体的航向角。由于地球的平均磁场强度仅约为  $0.6 \times 10^{-4} \text{ T}$ , 磁传感器易受到周围环境磁场的干扰, 这些干扰可等效于电子罗盘三轴磁

**收稿日期:** 2012-04-20; **修回日期:** 2012-09-20

**基金项目:** 国家自然科学基金(61104196); 南京理工大学紫金之星基金资助项目(AB41381); 国家自然科学基金(61104109); 江苏省自然科学基金(BK2011703); 江苏省科技支撑与自主创新资金资助(BE2012178)

**作者简介:** 朱建良(1980—), 男, 博士生, 助理研究员, 从事导航与制导研究。E-mail: zjl\_njust@sina.com

**联系人:** 薄煜明(1965—), 男, 研究员, 博士生导师, 从事火力控制、导航方面的研究。E-mail: 13905178063@172.com

场数据的零位误差、标度因数和正交误差，并可由 Poisson 数学模型来描述<sup>[1]</sup>。

现有的磁罗盘误差补偿方法主要有外部信息融合法、给定基准法和椭圆拟合法。外部信息融合法利用 GPS、惯性测量单元<sup>[2]</sup>测得的数据对磁罗盘进行滤波校准；给定基准法利用外部辅助设备测定磁罗盘在各个方向上的姿态，在磁场环境变化不大时，具有良好的补偿精度，对外部设备的要求较高；椭圆拟合法无需外部设备，仅在水平方向旋转一周即可自动拟合出椭圆函数<sup>[3]</sup>，精度较高，但仅能应用于二维罗盘的平面补偿，不适用于水平倾角有较大变化的情况；多平面的椭圆拟合法要求在至少两个相互垂直的平面内独立旋转一周，并分别使用椭圆拟合算法得到三轴的补偿值，补偿效果很好，但对补偿过程要求较高。

本文对二维罗盘的椭圆拟合算法在三维空间进行推广，提出对二次椭球曲面进行拟合的三维拟合算法。

## 1 误差模型

三维电子磁罗盘通常采用三轴磁阻传感器测量三轴地磁分量，用两轴加速度计测量载体的俯仰角、横滚角，通过坐标变换和姿态计算得到磁航向角。

在任意姿态下，磁罗盘三轴传感器的测量值为  $H_b = [H_{bx} \ H_{by} \ H_{bz}]^T$ ，地磁力在当地水平坐标系上的分量为  $H_g = [H_{gx} \ H_{gy} \ H_{gz}]^T$ ，在理想情况下，磁罗盘仅受地磁场的影响，其测量公式为：

$$H_g = A(\phi, \theta) H_b \quad (1)$$

式中， $A(\phi, \theta)$  是从当地水平坐标系到载体坐标系的状态转移矩阵，其中， $\phi$ 、 $\theta$  分别是加速度计测量的载体水平俯仰角和横滚角。

地磁干扰因素分为硬磁干扰和软磁干扰。硬磁材料是经外磁场后能保持大量剩磁的磁性材料，其磁场强度不变；软磁材料本身没有磁性，经磁化后，其作用力的方向、大小与软磁材料、磁罗盘的距离有关。

地磁力、硬磁干扰和软磁干扰，共同作用于磁罗盘，其测量模型可由 Poisson 方程描述<sup>[4]</sup>：

$$H_b = A(\phi, \theta)^{-1} \alpha H_g + H_l \quad (2)$$

式中， $H_l = [H_{lx} \ H_{ly} \ H_{lz}]^T$  为硬磁干扰， $\alpha$  为与载体位置有关的软磁干扰系数矩阵<sup>[5]</sup>：

$$\alpha = \begin{bmatrix} 1+a & b & c \\ d & 1+e & f \\ g & h & 1+k \end{bmatrix} \quad (3)$$

地磁场的标量值  $\|H_g\|$  在一定的小区域内运动时，可看作是固定值，根据式(2)可得  $H_g = K^{-1}(H_b - H_l)$ ，

令  $K = A(\phi, \theta)^{-1} \alpha$ ，有：

$$\|H_g\|^2 = H_b^T K_0 H_b - H_b^T K_0 H_l - H_l^T K_0 H_b + H_l^T K_0 H_l \quad (4)$$

其中， $K_0 = (K^{-1})^T K^{-1}$ 。

式(1)中，理想条件下测量值的轨迹是一个圆球面；式(4)中，因为硬磁干扰和软磁干扰的存在，测量值的轨迹畸变为一个椭球面<sup>[6]</sup>。同时，由于传感器本身的噪声、非线性、温度等因素的影响<sup>[7]</sup>，椭球面还会产生微小的形变。直接采样多组  $H_g$ ，求解式(3)中的参数，对硬磁干扰和软磁干扰系数进行标定，可计算出参数  $K_0$ ，并根据式(2)对环境干扰磁场进行补偿，但参数较多，计算量过大。

根据椭球曲面的性质计算补偿量更为方便，通过磁罗盘载体的三维旋转，采样获取椭球面上的多个点的坐标  $H_g$ ，拟合计算得出椭球的方程，即可对三维磁场进行补偿。

## 2 椭球曲面拟合

椭球是一种二次曲面，是椭圆在三维空间的推广， $(x_0, y_0, z_0)$  表示中心点， $(a, b, c)$  表示 3 个相互垂直的轴，其一般表达式为：

$$\frac{(x-x_0)^2}{a^2} + \frac{(y-y_0)^2}{b^2} + \frac{(z-z_0)^2}{c^2} = 1 \quad (5)$$

式(5)表达了三轴磁传感器在地磁力、硬磁干扰和软磁干扰共同作用下的测量值构成的二次曲面。实际上，这个二次曲面还会产生旋转，这里省略对旋转的讨论，因为在一般干扰条件下，对精度影响较小。

为计算方便，改变式(5)的形式，令  $A = a/b$ ， $B = a/c$ ， $R = a$ ，可得：

$$(x-x_0)^2 + A^2(y-y_0)^2 + B^2(z-z_0)^2 = R^2 \quad (6)$$

式(6)是一个非线性方程，其参数求解通常采用闭合形式解或线性化迭代法，这里采用牛顿迭代法。因为椭球曲面是从一个在坐标原点的球畸变为偏离坐标原点的椭球，假设初始椭球曲面的近似参数，也就是估计参数  $\hat{u} = (\hat{x}_0, \hat{y}_0, \hat{z}_0, \hat{A}, \hat{B}, \hat{R})^T$  已知，真参数  $u = (x_0, y_0, z_0, A, B, R)^T$  即可表示为估计参数  $\hat{u}$  和误差参数  $\Delta u = (\Delta x_0, \Delta y_0, \Delta z_0, \Delta A, \Delta B, \Delta R)^T$  之和，即  $u = \hat{u} + \Delta u$ 。

式(6)中，将  $x^2$  项提出，可得：

$$x^2 = 2x_0x - x_0^2 - A^2(y-y_0)^2 - B^2(z-z_0)^2 + R^2 \quad (7)$$

令  $f(u) = x^2$ ，根据式(6)，可得：

$$f(u) = f(\hat{u} + \Delta u) \quad (8)$$

$f(\hat{\mathbf{u}} + \Delta \mathbf{u})$  可以围绕估计参数  $\hat{\mathbf{u}}$  和近似点用泰勒级数展开成：

$$f(\hat{\mathbf{u}} + \Delta \mathbf{u}) = f(\hat{\mathbf{u}}) + \frac{\partial f(\hat{\mathbf{u}})}{\partial \hat{x}_0} \Delta x_0 + \frac{\partial f(\hat{\mathbf{u}})}{\partial \hat{y}_0} \Delta y_0 + \frac{\partial f(\hat{\mathbf{u}})}{\partial \hat{z}_0} \Delta z_0 + \frac{\partial f(\hat{\mathbf{u}})}{\partial \hat{A}} \Delta A + \frac{\partial f(\hat{\mathbf{u}})}{\partial \hat{B}} \Delta B + \frac{\partial f(\hat{\mathbf{u}})}{\partial \hat{C}} \Delta C + \dots \quad (9)$$

为了消除非线性项，在展开式 (9) 中省去了一阶偏导数以后的项。各偏导数计算为：

$$\frac{\partial f(\hat{\mathbf{u}})}{\partial \hat{x}_0} = 2(x - \hat{x}_0), \quad \frac{\partial f(\hat{\mathbf{u}})}{\partial \hat{y}_0} = 2\hat{A}^2(y - \hat{y}_0), \quad \frac{\partial f(\hat{\mathbf{u}})}{\partial \hat{z}_0} = 2\hat{B}^2(z - \hat{z}_0), \quad \frac{\partial f(\hat{\mathbf{u}})}{\partial \hat{A}} = -2\hat{A}(y - \hat{y}_0)^2,$$

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} 2(x_1 - \hat{x}_0) & 2\hat{A}^2(y_1 - \hat{y}_0) & 2\hat{B}^2(z_1 - \hat{z}_0) & -2\hat{A}(y_1 - \hat{y}_0)^2 & -2\hat{B}(z_1 - \hat{z}_0)^2 & 2\hat{R} \\ 2(x_2 - \hat{x}_0) & 2\hat{A}^2(y_2 - \hat{y}_0) & 2\hat{B}^2(z_2 - \hat{z}_0) & -2\hat{A}(y_2 - \hat{y}_0)^2 & -2\hat{B}(z_2 - \hat{z}_0)^2 & 2\hat{R} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 2(x_n - \hat{x}_0) & 2\hat{A}^2(y_n - \hat{y}_0) & 2\hat{B}^2(z_n - \hat{z}_0) & -2\hat{A}(y_n - \hat{y}_0)^2 & -2\hat{B}(z_n - \hat{z}_0)^2 & 2\hat{R} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{Y} = \begin{bmatrix} (x_1 - \hat{x}_0)^2 + \hat{A}^2(y_1 - \hat{y}_0)^2 + \hat{B}^2(z_1 - \hat{z}_0)^2 - \hat{R}^2 \\ (x_2 - \hat{x}_0)^2 + \hat{A}^2(y_2 - \hat{y}_0)^2 + \hat{B}^2(z_2 - \hat{z}_0)^2 - \hat{R}^2 \\ \dots \\ (x_n - \hat{x}_0)^2 + \hat{A}^2(y_n - \hat{y}_0)^2 + \hat{B}^2(z_n - \hat{z}_0)^2 - \hat{R}^2 \end{bmatrix}.$$

选取 6 个测得值，如果  $\mathbf{H}$  可逆，则式 (11) 有唯一解为：

$$\Delta \mathbf{u} = \mathbf{H}^{-1} \mathbf{Y} \quad (12)$$

可以算出椭球的 6 个参数  $\mathbf{u}$ 。若  $\Delta \mathbf{u}$  在精度要求范围内，说明得到了符合精度要求的参数值；若尚未达到求解精度，便以算得的参数  $\mathbf{u}$  作为新的估计值代替  $\hat{\mathbf{u}}$ ，且另选取 6 个测得值，重新迭代上述过程，直到参数误差  $\Delta \mathbf{u}$  在精度范围内。

### 3 最小二乘法

在实际使用中，测量值  $\mathbf{u}$  受到诸如传感器正交误差、温度漂移、环境磁场变化和旋转误差等独立误差的影响，这些误差将转换为各个参数分量的误差  $\Delta \mathbf{u}$ 。

可以通过对多于 6 个的测量值进行处理，使得有效方程式个数多于未知数个数，即解超定方程组，使误差  $\Delta \mathbf{u}$  减小。每一个冗余测量值均包含独立误差产生的影响，冗余测量值可以用最小二乘估计加以处理，以获得对未知量改善的估计。

最小二乘法的解  $\Delta \mathbf{u}$  能使方程组中的各个方程式等号左右两边的方差的平方和最小。式 (11) 各个方

$$\frac{\partial f(\hat{\mathbf{u}})}{\partial \hat{B}} = -2\hat{B}(z - \hat{z}_0)^2, \quad \frac{\partial f(\hat{\mathbf{u}})}{\partial \hat{R}} = 2\hat{R}.$$

将上述偏导数带入式 (9)，整理后，可得：

$$f(\mathbf{u}) - f(\hat{\mathbf{u}}) = 2(x_i - \hat{x}_0)\Delta x_0 + 2\hat{A}^2(y_i - \hat{y}_0)\Delta y_0 + 2\hat{B}^2(z_i - \hat{z}_0)\Delta z_0 - 2\hat{A}(y_i - \hat{y}_0)\Delta A - 2\hat{B}(z_i - \hat{z}_0)\Delta B + 2\hat{R}\Delta R \quad (10)$$

式 (10) 就是相对于未知数  $\Delta \mathbf{u}$  的线性化方程式，含有  $\Delta \mathbf{u}$  的 6 个参数。将多个测得值  $(x_i, y_i, z_i)$  代入式 (10)，可联立线性方程式，解出  $\Delta \mathbf{u}$  的所有未知数。其矩阵形式如式 (11)。

$$\mathbf{H} \Delta \mathbf{u} = \mathbf{Y} \quad (11)$$

其中， $\mathbf{H}$  为雅可比矩阵，

程式左右两边之差的平方和记为  $P(\Delta \mathbf{u})$ ，则

$$P(\Delta \mathbf{u}) = \|\mathbf{H} \Delta \mathbf{u} - \mathbf{Y}\| \quad (13)$$

求使得  $P(\Delta \mathbf{u})$  最小的  $\Delta \mathbf{u}$ ，有最小二乘解

$$\Delta \mathbf{u}_{LS} = (\mathbf{H}^T \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^T \mathbf{Y} \quad (14)$$

估计参数  $\mathbf{u} = \hat{\mathbf{u}} + \Delta \mathbf{u}_{LS}$  即为新的估计值。

### 4 总体最小二乘法

式 (14) 的最小二乘解仅考虑了向量  $\mathbf{Y}$  的噪声干扰，实际上，矩阵  $\mathbf{H}$  也会受到噪声干扰。同时考虑  $\mathbf{H}$  和  $\mathbf{Y}$  的噪声干扰，假设噪声各分量统计独立，每次迭代运算取 8 组测量值，则可得到总体最小二乘意义下的解为<sup>[8]</sup>：

$$\Delta \mathbf{u}_{TLS} = \left[ \frac{V(2,7)}{V(1,7)}, \frac{V(3,7)}{V(1,7)}, \frac{V(4,7)}{V(1,7)}, \frac{V(5,7)}{V(1,7)}, \frac{V(6,7)}{V(1,7)}, \frac{V(7,7)}{V(1,7)} \right]^T \quad (15)$$

其中， $\mathbf{V}$  为  $[-\mathbf{YH}]$  进行奇异值分解后，所对应的右奇异向量组成的矩阵， $V(i,7)$  为最小奇异值对应的右奇异向量的第  $i$  个元素。

估计参数  $\mathbf{u} = \hat{\mathbf{u}} + \Delta \mathbf{u}_{TLS}$  即为新的估计值。

### 5 初值估计

牛顿迭代法的有效性常常依赖于初值的选取，试验

表明,初值误差过大将导致迭代结果发散。采用闭合形式解的方法,通过公式整理,可直接采用最小二乘法解出唯一的椭球参数初值。式(7)进一步整理可得

$$x^2 = -A^2 y^2 - B^2 z^2 + 2x_0 x + 2A^2 y_0 y + 2B^2 z_0 z + R^2 - A^2 y_0^2 - B^2 z_0^2 - x_0^2 \quad (16)$$

将多个测得值  $(x_i, y_i, z_i)$  代入式(16),可联立线性方程式,式(16)可写为矩阵形式:

$$Dw = c \quad (17)$$

其中,  $w = [A^2, B^2, x_0, A^2 y_0, B^2 z_0, R^2 - A^2 y_0^2 - B^2 z_0^2 - x_0^2]^T$ ,

$$c = [x_1^2 \quad x_2^2 \quad \dots \quad x_n^2]^T,$$

$$D = \begin{bmatrix} -y_1^2 & -z_1^2 & 2x_1 & 2y_1 & 2z_1 & 1 \\ -y_2^2 & -z_2^2 & 2x_2 & 2y_2 & 2z_2 & 1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ -y_n^2 & -z_n^2 & 2x_n & 2y_n & 2z_n & 1 \end{bmatrix}.$$

式(17)有最小二乘解:

$$w = (D^T D)^{-1} D^T c \quad (18)$$

选取 8 个测得值  $(x_i, y_i, z_i)$ ,代入式(18),可算得  $w$ 。因  $A$ 、 $B$ 、 $R$  均为正数,则可进一步算得唯一的初值  $u = (x_0, y_0, z_0, A, B, R)^T$ 。

## 6 实验结果分析

为了验证上述算法的有效性,采用以 Honeywell 磁阻传感器 HMC1022 和 HMC1021 为核心的三维磁罗盘为实验仪器,手持磁罗盘任意变换方位,采集 3 个方向的磁场数值。

### 6.1 实验步骤

1)任意旋转变换磁罗盘姿态,采集 300 组磁罗盘三轴磁场数值,并记录绘图,如图 1。图中显示了磁

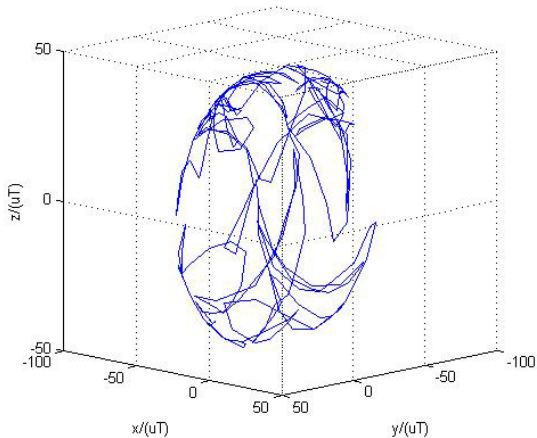


图 1 补偿前三轴传感器测量值

Fig.1 Uncompensated data from three-axis magnetometer

罗盘姿态任意变换时的磁场轨迹,类似一个椭球面,旋转时应使得数值尽量均匀分布到椭球曲面的各个象限,可以减少几何位置引起的精度损失。

2)选取 8 组数据,计算椭球曲面 6 个估计参数  $\hat{u}$  的初值。选取数据采用最值法,当  $x$ 、 $y$  和  $z$  分别取最大和最小值时的数据组,再任意取两组数据,共 8 组。

3)采用文中的最小二乘初值估计法计算  $\hat{u}$ ,获得对椭球曲面参数的直接估计,如图 2,这个估计采用的数据仅有 8 个点,估计值有较大的误差。

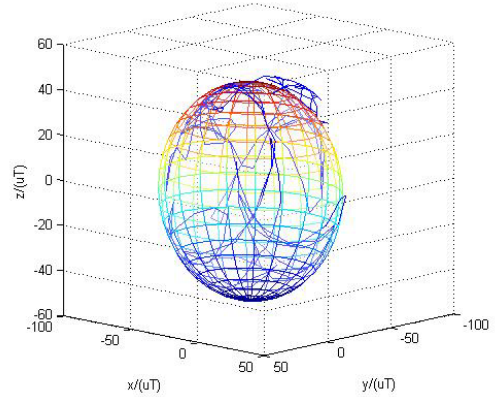


图 2 采用初值拟合成的地磁椭球面

Fig.2 Geomagnetic ellipsoid by initial value fitting

4)选取 8 组新数据,但任意选取数据容易因数据的几何位置过于接近,导致精度因子增大,使得计算结果难以收敛。因此提出采用最值法选取新数据,即参照步骤 2),前 6 组数据分别是  $x$ 、 $y$  和  $z$  轴的最值,对于每个新获取的数据,判断如果是新的最值,则替代原有最值,否则作为后两组数据的新值。即如果新值介于所有的最值之间,仅更新最后的 2 组数据。最值法选取数据既可使数据尽量均匀分布在椭球曲面上,减少误差,又能简化单片机程序复杂度。

5)采用式(14)描述的最小二乘法或式(15)描述的总体最小二乘法,计算椭球曲面最小二乘解  $\Delta u$ ,  $u = \hat{u} + \Delta u$ ,得到新的参数估计,如图 3 所示。

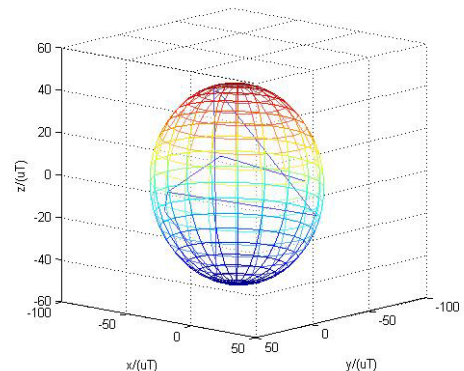


图 3 总体最小二乘法经 10 次迭代拟合形成的地磁椭球面

Fig.3 Geomagnetic ellipsoid by 10 iteration fittings using total least square

6) 选取新数据, 返回(4), 将新的参数估计代入迭代公式, 再次计算椭球曲面的解  $\Delta u$ , 多次迭代后,  $u$  逐渐收敛到真值。

7) 根据椭球曲面参数将磁场测量值补偿为球面, 计算航向值。

### 6.2 误差分析

三维罗盘安装在转台上, 调整转台倾角至  $15^\circ$  附近, 缓慢旋转一周, 旋转周期约 30s, 每  $30^\circ$  记录磁罗盘输出航向数据, 并与转台数据比较, 得出航向误差值。根据补偿算法不同, 实验分四种情况, 分别是无补偿、最小二乘法初值估计补偿、最小二乘法十次迭代补偿、总体最小二乘法十次迭代补偿。

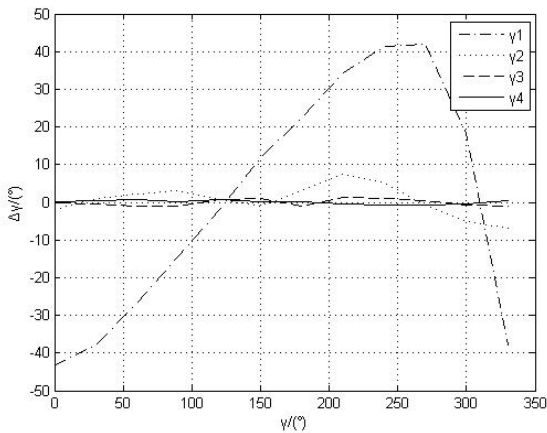


图 4 磁航向误差

Fig.4 Magnetic heading error

图 4 中, 横轴表示转台航向角  $\gamma$ , 纵轴表示航向角误差  $\Delta\gamma$ ; 曲线  $\gamma_1$  表示未补偿的航向误差曲线;  $\gamma_2$  表示根据文中采用的最小二乘初值估计方法算出的椭球参数, 得到的测量误差;  $\gamma_3$  表示根据式(14)描述的最小二乘法, 经过 10 次迭代后算出的椭球参数, 得到的测量误差;  $\gamma_4$  表示根据式(15)描述的总体最小二乘法, 经过十次迭代后算出的椭球参数, 得到的测量误差。

表 1 不同算法测得误差的标准差和最大值

Tab.1 Standard deviation and maximum one from the measurement errors of different algorithm

算法	标准差/(°)	最大误差/(°)
未补偿	27.7	43.2
初值补偿	3.02	7.40
最小二乘法	0.80	1.10
总体最小二乘法	0.39	0.80

表 1 说明最小二乘法得到的椭球曲面参数初值误差较大, 原因是选取的点数仅有 8 个, 不能反映整个椭球的形状特征; 而采用最小二乘法进行迭代运算时, 每次迭代都有新点参与运算, 点数越多, 越能反映整个椭球的特征, 误差随迭代次数增加而减小, 经过 10

次迭代, 最大误差减小到  $1.10^\circ$ ; 采用总体最小二乘法时, 同时考虑了观测向量和状态矩阵产生的噪声干扰, 使得最大误差进一步减小到  $0.80^\circ$ 。

### 7 结论

利用地磁场场强在小区域不变的特性, 提出建立椭球曲面模型对三维磁罗盘进行误差补偿, 利用牛顿迭代法计算补偿参数, 并分别采用最小二乘法和总体最小二乘法进行推导运算。利用转台验证相关算法, 误差曲线如图 4 显示, 采用最小二乘法最大航向误差  $1.1^\circ$ , 采用总体最小二乘法最大航向误差  $0.8^\circ$ 。总体最小二乘法精度优于最小二乘法, 但最小二乘法计算量小, 适用于单片机实现; 总体最小二乘法运算时需要矩阵进行奇异值分解, 计算量更大。

现有的补偿算法通常需要在稳定的转台上进行, 且必须保证旋转时的倾斜角不变。提出的椭球曲面拟合算法仅需手持罗盘在空间各个象限内缓慢旋转即可完成罗盘标定, 且获得  $0.8^\circ$  的补偿后测量精度, 扩大了磁罗盘的应用范围。

### 参考文献 (References):

- [1] Li Zhi, Li Xiang, Wang Yongjun. A calibration method for magnetic sensors and accelerometer in tilt-compensated digital compass[C]// Proceeding of 9th International Conference on Electronic Measurement and Instruments. Beijing, 2009: 868-871.
- [2] Chen Wei, Chen Ruizhi, Chen Yuwei, et al. An adaptive calibration approach for a 2-axis digital compass in a low-cost pedestrian navigation system[C]// Proceedings of the 2010 IEEE International Conference on Instrumentation and Measurement Technology. Austin, 2010: 1392-1397.
- [3] 马珍珍, 盛蔚, 房建成. 微小型无人机用微磁数字罗盘集成系统的设计[J]. 航空学报, 2008, 29(4): 973-980. MA Zhen-zhen, SHENG Wei, FANG Jian-cheng. Design of micro magnetic compass integration system used on MUAV[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2008, 29(4): 973-980.
- [4] Markovic R, Krajnc A, Matko D. Calibration of a solid-state magnetic compass using angular-rate information from low-cost sensors[J]. IET Science, Measurement and Technology, 2011, 5(2): 54-58.
- [5] 刘仁浩, 王华. 数字磁罗盘的全姿态罗差补偿[J]. 光学精密工程, 2011, 19(8): 1867-1873. LIU Ren-hao, WANG Hua. All attitude magnetic deviation compensation for digital magnetic compass[J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(8): 1867-1873.
- [6] 刘诗斌. 无人机磁航向测量的自动罗差补偿研究[J]. 航空学报, 2007, 28(2): 411-414. LIU Shi-bin. Study on automatic magnetic deviation compensation of magnetic heading measurement for UAV [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2007, 28(2): 411-414.
- [7] Vcelak J, Ripka P, Platil A, et al. Errors of AMR compass and methods of their compensation[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2006, 129(1): 53-57.
- [8] Markovsky I, van Huffel S. Overview of total least-squares methods[J]. Signal Processing, 2007, 87(10): 2283-2302.