Calibration of Magnetometer for Underwater Vehicle Based on Least Squares Method*

TANG Jun*, DANG Zhaokai, HONG Zhimin, WANG Zimeng
(College of Mechanical and Electrical Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou Jiangxi 341000, China)

Abstract: In order to obtain more accurate magnetic induction intensity data for the remotely operated vehicle (ROV) in operation, a least-squares ellipsoidal fitting method is proposed to calibrate the MEMS magnetometer on ROV. The error model is established by analyzing the main error components of the magnetometer, and the calibration experiments of ROV magnetometer are carried out based on the least-squares ellipsoidal fitting method. The experimental results show that the parameters in the magnetometer error model are calibrated to near-optimal values. At the same time, the magnetic induction intensity is corrected, which is in good agreement with the three-dimensional sphere with the center of the sphere at the origin and the radius of 20.985 8 μT. The corrected magnetic induction intensity is close to the theoretical magnetic field intensity, and the residual error fluctuates within the range of −3 μT~2 μT, with the average residual error of −0.165 0 μT, showing that the calibration result of the magnetometer is satisfactory.

Key words: ROV; MEMS magnetometer; calibration; least squares; ellipsoidal fitting
EEACC: 7220; 7230M **doi**: 10.3969/j.issn.1005-9490.2023.04.042

基于最小二乘的水下机器人磁力计标定

唐 军*, 党召凯, 洪枝敏, 王子梦
(江西理工大学机电工程学院, 江西 赣州 341000)

摘 要: 为了在缆控水下机器人(ROV)运行时获得准确的航向信息, 提出了一种基于最小二乘的椭球拟合方法对 ROV 的 MEMS 磁力计进行标定。通过分析磁力计的主要误差构成, 建立误差模型, 并基于最小二乘椭球拟合方法对 ROV 磁力计进行标定实验。实验结果表明: 经过标定后, 得到磁力计误差模型中各参数的最优值。同时, 磁感应强度得到修正, 与球心落在原点, 半径为 20.98 58 μT 的三维球体较为吻合, 修正后磁感应强度接近理论磁场强度, 残差在−3 μT~2 μT范围内波动, 且残差均值为−0.165 0 μT。说明了磁力计标定结果较为理想。

关键词: ROV; MEMS 磁力计; 标定; 最小二乘; 椭球拟合
中图分类号: TP212.1 **文献标识码**: A **文章编号**: 1005-9490(2023)04-1140-06

水下机器人因具有灵活性高、安全可靠等优点, 在水下勘探、水下搜救等领域具有良好的发展前景[1-2]。MEMS 三轴磁力计是水下机器人导航系统中的关键辅助传感器[3]。磁力计在机器人水下航行时采集磁感应数据信息并与陀螺仪、加速度计等传感器数据融合, 实时估计姿态角度[4-5], 对水下机器人的感知以及控制过程起到了关键作用。但磁力计易受自身制造误差、安装位置误差、环境磁场干扰等因素的影响, 从而导致姿态解算的精度降低[6]。因此在水下机器人启动运行前或者航行过程中状态不稳定时, 对磁力计标定是非常重要的。

目前, MEMS 磁力计的标定方法主要包括一般标定和自动标定[7-8]。一般标定方法是指借助高精度的多功能三轴转台等外部实验设备来完成的标定方法。高可等[9]利用无磁旋转平台, 采用误差分离校准方法分析了传感器偏置、灵敏度系数等各干扰因素对罗盘精度的影响。Pang 等[10]建立了磁力计的非线性误差模型, 使用非磁性旋转平台、质子磁强计等外部设备获取磁干扰参数, 进行三轴磁力计标定和磁干扰补偿。然而外部设备成本昂贵、操作复杂, 不利于整机设备的现场标定。

自动标定无需外部设备, 简单便捷, 仅利用传感器提供的信息实现磁力计的标定。戴磊等[11]提出了硬磁罗差和比例因子误差的简化标定方法, 提高了罗盘标定的可操作性, 但误差模型不够完善。Papafotis 等[12]提出了一种基于最小二乘的多个传感器联合标定和轴向对准的迭代算法, 使用多个同类型的三轴加速度计和磁力计来提高标定精度, 但产生了较大计算量。Zeng 等[13]通过自适应滤波算法建立自标定误差模型, 采用增量元学习 IDBD 算

项目来源: 国家自然科学基金项目(51864015)
收稿日期: 2021-08-24 **修改日期**: 2022-05-08

法精确获取误差参数,该方法依赖较多的测量数据。

本文以“潜蛟Ⅱ”CHASING M2 ROV 为研究对象,为了有效降低磁力计测量误差,使磁力计标定简单便捷,且无需借助标定装置,提出了一种基于最小二乘的椭球拟合方法对三轴磁力计传感器进行标定。通过分析磁力计误差的构成,建立误差模型。基于最小二乘椭球拟合方法进行了磁力计标定实验,得到传感器误差模型中各参数的最优值,并完成了磁力计标定。

1　MEMS 磁力计误差构成及模型建立

1.1　磁力计误差构成

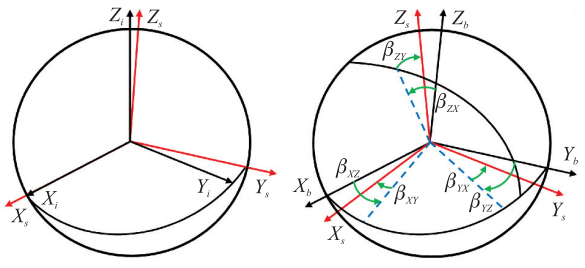
MEMS 磁力计误差主要包括传感器误差以及磁场干扰。传感器误差包括:交叉耦合误差、比例因子误差、零偏误差以及随机噪声[14]。其中,交叉耦合误差、比例因子误差以及零偏误差均属于系统性误差。

零偏误差是各类传感器测量过程中都会存在的常值误差。当传感器输入是零值的时候,理想的输出值同样也是零值,但传感器受其内部电子元件特性的影响,使其实际输出值为具体的某一非零值,此时产生的误差称为零偏误差。零偏误差通常是构成传感器误差的主要因素。磁力计的零偏误差表示为:

$$\boldsymbol{b}'_m=[b'_{\mathrm{mx}},b'_{my},b'_{mz}]^{\mathrm{T}}。$$

比例因子误差(Scale Factor Error)是指传感器测量过程中,由于量纲换算导致输入与输出的单位斜率的偏差。由比例因子误差导致的传感器输出误差与实际测量值成正比。磁力计的比例因子误差表示为:$\boldsymbol{K}_m=\mathrm{diag}(s_{\mathrm{mx}},s_{my},s_{mz})$。

交叉耦合误差(Cross-Coupling Errors)分为两类,一类是传感器敏感轴和载体坐标轴装配不对称造成的误差,另一类是传感器自身的交叉耦合误差。在理想正交坐标系 $X_iY_iZ_i$ 和传感器非正交坐标系 $X_sY_sZ_s$ 中,非正交坐标系的 X_s 轴与正交坐标系的 X_i 轴重合,正交坐标系的 Y_i 轴处于由非正交坐标系 X_s 轴和 Y_s 轴构成的平面内,如图 1(a)所示。对于载体坐标系 $X_bY_bZ_b$ 而言,其与传感器坐标系通常存在微小角度的误差,可以通过旋转变换进行消除,如图 1(b)所示。



(a) 传感器非正交坐标系与理想正交坐标系　　(b) 传感器非正交坐标系与载体坐标系

图 1　交叉耦合误差示意图

在载体坐标系中,β_{ZY}表示传感器坐标系的 Z 轴绕着载体坐标系的 Y 轴旋转,β_{XZ}、β_{XY}等同理。磁力计的交叉耦合误差可表示为:

$$\boldsymbol{T}_m=\begin{bmatrix}1 & -\beta_{YZ} & \beta_{ZY}\\ \beta_{XZ} & 1 & -\beta_{ZX}\\ -\beta_{XY} & \beta_{YX} & 1\end{bmatrix}$$

随机噪声是所有传感器在测量过程中均无法避免的一种误差。因为传感器的随机噪声与任意时刻的数值均没有联系,所以无法对随机噪声进行标定补偿。在某种意义上,随机噪声也被理解成由白噪声通过积分得到,称为随机游走。它被认为是马尔科夫(Markov)过程,前一时刻的测量误差掺杂随机白噪声从而形成当前的测量误差值。具体对应到相应的传感器,磁场漂移误差由磁感应强度随机噪声经过积分计算得到。磁力计的随机噪声表示为:$\boldsymbol{n}_m=[n_{\mathrm{mx}},n_{my},n_{mz}]^{\mathrm{T}}$。

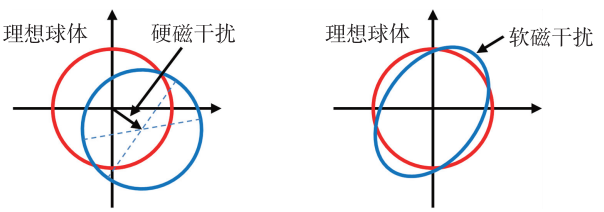
1.2　磁力计误差模型

如果不存在外部磁场干扰,理想的磁力计测量出的磁感应强度即为地球表面的磁感应强度。由于地球磁场方向始终朝向北并且保持不变,若将磁力计朝着空间中任意方位角度旋转 360°,磁力计在其 X、Y、Z 轴上测量出的地球磁感应强度大小是相同的,在三维空间中形成一个标准的正球体,球体的半径就是磁场强度。然而实际测量环境中存在其他磁场干扰[15-16]:硬磁干扰(Hard-Iron Effect)和软磁干扰(Soft-Iron Effect)。硬磁干扰不会随环境磁场大小与方向的改变而变化,使测量的磁感应强度分布在一个圆心偏离原点的理想球体上,如图 2(a)所示。软磁干扰随着外部磁场大小与方向的改变而在一定范围内产生变化。磁力计周围的干扰磁场,具有使理想球体伸展、倾斜的效果,从而使测量结果分布在一个椭球上,如图 2(b)所示。

对磁力计主要误差构成进行分析,建立磁力计误差模型为:

$$^b\boldsymbol{m}'_m=\boldsymbol{T}_m\boldsymbol{K}_m\boldsymbol{M}_s(^b\boldsymbol{m}_m+\boldsymbol{b}'_m)+\boldsymbol{b}_h \tag{1}$$

式中:$^b\boldsymbol{m}_m$ 表示标定后的磁场强度,$^b\boldsymbol{m}'_m$表示标定前的



(a) 硬磁干扰　　(b) 软磁干扰

图 2　硬、软磁干扰示意图

磁场强度。磁力计的交叉耦合误差 $\boldsymbol{T}_m$,比例因子误差 $\boldsymbol{K}_m$,零偏误差 $\boldsymbol{b}'_m$,软磁干扰 $\boldsymbol{M}_s$,硬磁干扰 $\boldsymbol{b}_h$ 分别为:

$$\begin{cases}\boldsymbol{T}_m=\begin{bmatrix}1 & -\gamma_{yz} & \gamma_{zy}\\ \gamma_{xz} & 1 & -\gamma_{zx}\\ -\gamma_{xy} & \gamma_{yx} & 1\end{bmatrix} \quad \boldsymbol{K}_m=\begin{bmatrix}s_{\mathrm{mx}} & 0 & 0\\ 0 & s_{my} & 0\\ 0 & 0 & s_{mz}\end{bmatrix}\\ \boldsymbol{M}_s=\begin{bmatrix}m_{11} & m_{12} & m_{13}\\ m_{21} & m_{22} & m_{23}\\ m_{31} & m_{32} & m_{33}\end{bmatrix} \quad \boldsymbol{b}'_m=\begin{bmatrix}b'_{\mathrm{mx}}\\ b'_{my}\\ b'_{mz}\end{bmatrix} \quad \boldsymbol{b}_h=\begin{bmatrix}b_{hx}\\ b_{hy}\\ b_{hz}\end{bmatrix}\end{cases} \tag{2}$$

进一步地,式(1)可以简化为:

$$^b\boldsymbol{m}'_m=\boldsymbol{W}^b\boldsymbol{m}_m+\boldsymbol{V} \tag{3}$$

$$^b\boldsymbol{m}_m=\boldsymbol{W}^{-1}(^b\boldsymbol{m}'_m-\boldsymbol{V}) \tag{4}$$

式中:$\boldsymbol{W}$ 为总标定矩阵,$\boldsymbol{V}$ 为总偏差矩阵。

2 基于最小二乘椭球拟合的磁力计标定

理想状态下磁力计测得地球磁场的数据是恒定不变的。无论磁力计以任何角度在空间旋转,测得的磁感应强度均分布在半径为地磁场强度的球面上。然而实际中磁力计受到环境磁场的影响,使磁感应强度的测量值分布在一椭球面上[17]。

取理论磁场强度参考值为 m,因此有:

$$\begin{aligned}(^b\boldsymbol{m}_m)^{\mathrm{T}}\cdot{}^b\boldsymbol{m}_m&=m^2\\ (\boldsymbol{W}^{-1}(^b\boldsymbol{m}'_m-\boldsymbol{V}))^{\mathrm{T}}\cdot(\boldsymbol{W}^{-1}(^b\boldsymbol{m}'_m-\boldsymbol{V}))&=m^2\\ (^b\boldsymbol{m}'_m-\boldsymbol{V})^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{W}^{-1})^{\mathrm{T}}\cdot\boldsymbol{W}^{-1}(^b\boldsymbol{m}'_m-\boldsymbol{V})&=m^2\end{aligned} \tag{5}$$

令 $(\boldsymbol{W}^{-1})^{\mathrm{T}}\cdot\boldsymbol{W}^{-1}=\boldsymbol{A}$,$\boldsymbol{A}$ 为对称矩阵,则有:

$$(^b\boldsymbol{m}'_m-\boldsymbol{V})^{\mathrm{T}}\boldsymbol{A}(^b\boldsymbol{m}'_m-\boldsymbol{V})-m^2=0 \tag{6}$$

应用最小二乘法[18],将磁感应强度的测量值与椭球面之间距离平方和的最小化作为判断准则,求解矩阵 $\boldsymbol{A}$ 的参数。建立误差方程为:

$$\begin{aligned}r_k&=\|{}^b\boldsymbol{m}_{m,k}\|^2-m^2=(^b\boldsymbol{m}'_{m,k}-\boldsymbol{V})^{\mathrm{T}}\boldsymbol{A}(^b\boldsymbol{m}'_{m,k}-\boldsymbol{V})-m^2=\\ &(^b\boldsymbol{m}'_{m,k})^{\mathrm{T}}\boldsymbol{A}{}^b\boldsymbol{m}'_{m,k}-2(^b\boldsymbol{m}'_{m,k})^{\mathrm{T}}\boldsymbol{A}\boldsymbol{V}+\boldsymbol{V}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{A}\boldsymbol{V}-m^2\end{aligned} \tag{7}$$

式中:r_k 为第 k 次测量值与理论磁场强度的残差。上述方程转换为矩阵形式为:

$$\begin{aligned}r_k=&\begin{bmatrix}{}^b m'_{mx,k}\\ {}^b m'_{my,k}\\ {}^b m'_{mz,k}\end{bmatrix}^{\mathrm{T}}\begin{bmatrix}A_{xx} & A_{xy} & A_{xz}\\ A_{xy} & A_{yy} & A_{yz}\\ A_{xz} & A_{yz} & A_{zz}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}{}^b m'_{mx,k}\\ {}^b m'_{my,k}\\ {}^b m'_{mz,k}\end{bmatrix}-\\ &2\begin{bmatrix}{}^b m'_{mx,k}\\ {}^b m'_{my,k}\\ {}^b m'_{mz,k}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}A_{xx} & A_{xy} & A_{xz}\\ A_{xy} & A_{yy} & A_{yz}\\ A_{xz} & A_{yz} & A_{zz}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}V_x\\ V_y\\ V_z\end{bmatrix}+\\ &\begin{bmatrix}V_x\\ V_y\\ V_z\end{bmatrix}^{\mathrm{T}}\begin{bmatrix}A_{xx} & A_{xy} & A_{xz}\\ A_{xy} & A_{yy} & A_{yz}\\ A_{xz} & A_{yz} & A_{zz}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}V_x\\ V_y\\ V_z\end{bmatrix}-m^2\end{aligned} \tag{8}$$

式(8)进一步转换成齐次坐标形式为:

$$r_k=\begin{bmatrix}{}^b m'^2_{mx,k}\\ 2{}^b m'^b_{mx,k}m'_{my,k}\\ 2{}^b m'^b_{mx,k}m'_{mz,k}\\ {}^b m'^2_{my,k}\\ 2{}^b m'^b_{my,k}m'_{mz,k}\\ {}^b m'^2_{mz,k}\\ {}^b m'_{mx,k}\\ {}^b m'_{my,k}\\ {}^b m'_{mz,k}\\ 1\end{bmatrix}^{\mathrm{T}}\cdot\begin{bmatrix}A_{xx}\\ A_{xy}\\ A_{xz}\\ A_{yy}\\ A_{yz}\\ A_{zz}\\ -2A_{xx}V_x-2A_{xy}V_y-2A_{xz}V_z\\ -2A_{xy}V_x-2A_{yy}V_y-2A_{yz}V_z\\ -2A_{xz}V_x-2A_{yz}V_y-2A_{zz}V_z\\ A_{xx}V_x^2+2A_{xy}V_xV_y+2A_{xz}V_xV_z+A_{yy}V_y^2+2A_{yz}V_yV_z+A_{zz}V_z^2-m^2\end{bmatrix} \tag{9}$$

假设有 K 组磁感应强度测量值用于计算模型误差参数,由于测量的次数必须大于或等于参数变量的个数,则由式(9)得 $K\geqslant 10$。

令

$$\boldsymbol{X}=\begin{bmatrix}{}^b m'^2_{mx,0} & 2{}^b m'^b_{mx,0}m'_{my,0} & \cdots & {}^b m'_{my,0} & {}^b m'_{mz,0} & 1\\ {}^b m'^2_{mx,1} & 2{}^b m'^b_{mx,1}m'_{my,1} & \cdots & {}^b m'_{my,0} & {}^b m'_{mz,1} & 1\\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & 1\\ {}^b m'^2_{mx,K-1} & 2{}^b m'^b_{mx,K-1}m'_{my,K-1} & \cdots & {}^b m'_{my,K-1} & {}^b m'_{mz,K-1} & 1\end{bmatrix} \tag{10}$$

$$\boldsymbol{\beta}=\begin{bmatrix}\beta_0\\ \beta_1\\ \beta_2\\ \beta_3\\ \beta_4\\ \beta_5\\ \beta_6\\ \beta_7\\ \beta_8\\ \beta_9\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}A_{xx}\\ A_{xy}\\ A_{xz}\\ A_{yy}\\ A_{yz}\\ A_{zz}\\ -2A_{xx}V_x-2A_{xy}V_y-2A_{xz}V_z\\ -2A_{xy}V_x-2A_{yy}V_y-2A_{yz}V_z\\ -2A_{xz}V_x-2A_{yz}V_y-2A_{zz}V_z\\ A_{xx}V_x^2+2A_{xy}V_xV_y+2A_{xz}V_xV_z+A_{yy}V_y^2+2A_{yz}V_yV_z+A_{zz}V_z^2-m^2\end{bmatrix} \tag{11}$$

则式(9)可扩展为以下矩阵方程:

$$\boldsymbol{r}=\begin{bmatrix} r_0 \\ r_1 \\ \vdots \\ r_{K-1} \end{bmatrix}=\boldsymbol{X}\boldsymbol{\beta}=0 \tag{12}$$

对于齐次形式的最小二乘法,采用特征值分解法求解计算,有:

$$\boldsymbol{X}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{X}\boldsymbol{\beta}=\lambda\boldsymbol{\beta} \tag{13}$$

式中:$\boldsymbol{\beta}$ 是矩阵 $\boldsymbol{X}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{X}$ 的一个特征向量,λ 是其相应的特征值。当取得最小特征值 $\lambda_{\min}$ 时,其特征向量 $\boldsymbol{\beta}_{\min}$ 即为所求的解向量。

相应地,椭球拟合矩阵 $\boldsymbol{A}$ 由解向量 $\boldsymbol{\beta}$ 表示为:

$$\boldsymbol{A}=\begin{bmatrix} A_{xx} & A_{xy} & A_{xz} \\ A_{xy} & A_{yy} & A_{yz} \\ A_{xz} & A_{yz} & A_{zz} \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} \beta_0 & \beta_1 & \beta_2 \\ \beta_1 & \beta_3 & \beta_4 \\ \beta_2 & \beta_4 & \beta_5 \end{bmatrix} \tag{14}$$

总偏差矩阵 $\boldsymbol{V}$ 表示为:

$$\boldsymbol{V}=\begin{bmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \end{bmatrix}=-\frac{1}{2}\begin{bmatrix} \beta_0 & \beta_1 & \beta_2 \\ \beta_1 & \beta_3 & \beta_4 \\ \beta_2 & \beta_4 & \beta_5 \end{bmatrix}^{-1}\begin{bmatrix} \beta_6 \\ \beta_7 \\ \beta_8 \end{bmatrix}=-\frac{1}{2}\boldsymbol{A}^{-1}\begin{bmatrix} \beta_6 \\ \beta_7 \\ \beta_8 \end{bmatrix} \tag{15}$$

总标定矩阵 $\boldsymbol{W}$ 以及磁场强度 m 表示为:

$$\boldsymbol{W}^{-1}=\sqrt{\boldsymbol{A}}=\begin{bmatrix} \beta_0 & \beta_1 & \beta_2 \\ \beta_1 & \beta_3 & \beta_4 \\ \beta_2 & \beta_4 & \beta_5 \end{bmatrix}^{1/2} \tag{16}$$

$$m=\sqrt{A_{xx}V_x^2+2A_{xy}V_xV_y+2A_{xz}V_xV_z+A_{yy}V_y^2+2A_{yz}V_yV_z+A_{zz}V_z^2-\beta_9} \tag{17}$$

由以上推导可知,只需通过传感器采集 K 组测量数据,代入到式(12)中,便可求出总偏差矩阵 $\boldsymbol{V}$ 和总标定矩阵 $\boldsymbol{W}$。

3　ROV 磁力计标定实验

3.1　实验设备

本文的研究对象为“潜蛟 II”CHASING M2 ROV。ROV 选用 STM32F427 处理器作为主控模块,IMU 模块选用的传感器型号为 MPU6000,三轴磁力计选用的传感器型号为 HMC5883L。STM32F427 处理器基于 ARM Cortex-M4 内核,工作主频率为 180 MHz,具有高性能、低功耗的优点,可以满足 ROV 的控制需求。MPU6000 传感器为惯性测量单元,芯片内部包含了一个陀螺仪和一个加速度计传感器,通过 SPI 通信协议与主控连接,系统中设置加速度计量程范围为 ±16 g_n,陀螺仪量程范围为±2 000 °/s,设置采样周期为 480 ms。磁力计 HMC5883L 通过 I2C 协议与主控连接,选择量程范围为±8 Ga,同样以 480 ms 为采样周期进行数据采集。表 1 总结了这些传感器的规格、量程范围、输出和采样周期特性。

表 1　传感器特性

传感器型号	量程范围	输出	采样周期
MPU6000	±16 g_n	SPI	480 ms
MPU6000	±2000 °/s	SPI	480 ms
HMC5883L	±8 Ga	I2C	480 ms

采用 Mission Planner 地面站作为上位机,通过 Mavlink 通讯协议与 ROV 连接,实时获取传感器信息以及由 AHRS 得到的姿态信息,如图 3 所示。

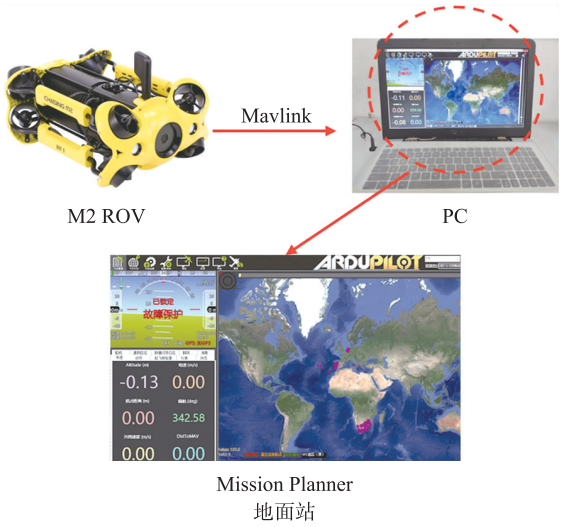


图 3　ROV 与 Mission Planner 地面站

3.2　磁力计标定实验

三轴磁力计传感器 HMC5883L 固定安装于 ROV 内部,随着 ROV 姿态和位置的改变而输出相应测量数据。根据上文阐述的磁力计标定原理,双手将 ROV 依次朝空间任意方向旋转 360°,如图 4 所示,同时以 480 ms 为采样周期完成对磁力计的三轴磁感应强度的测量。测量过程中,随机噪声对测量

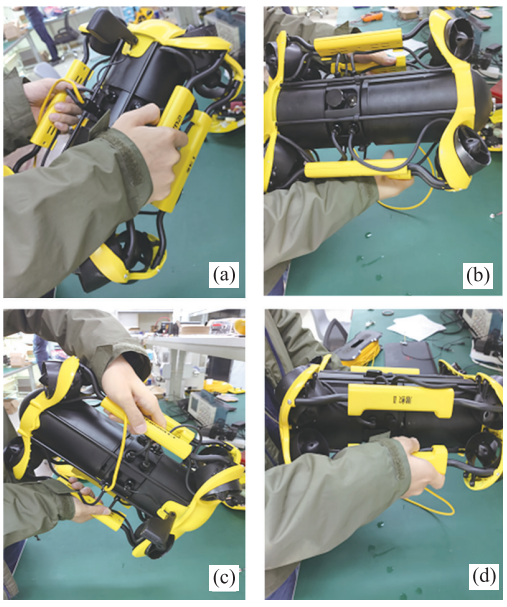


图 4　ROV 向任意方向旋转 360°

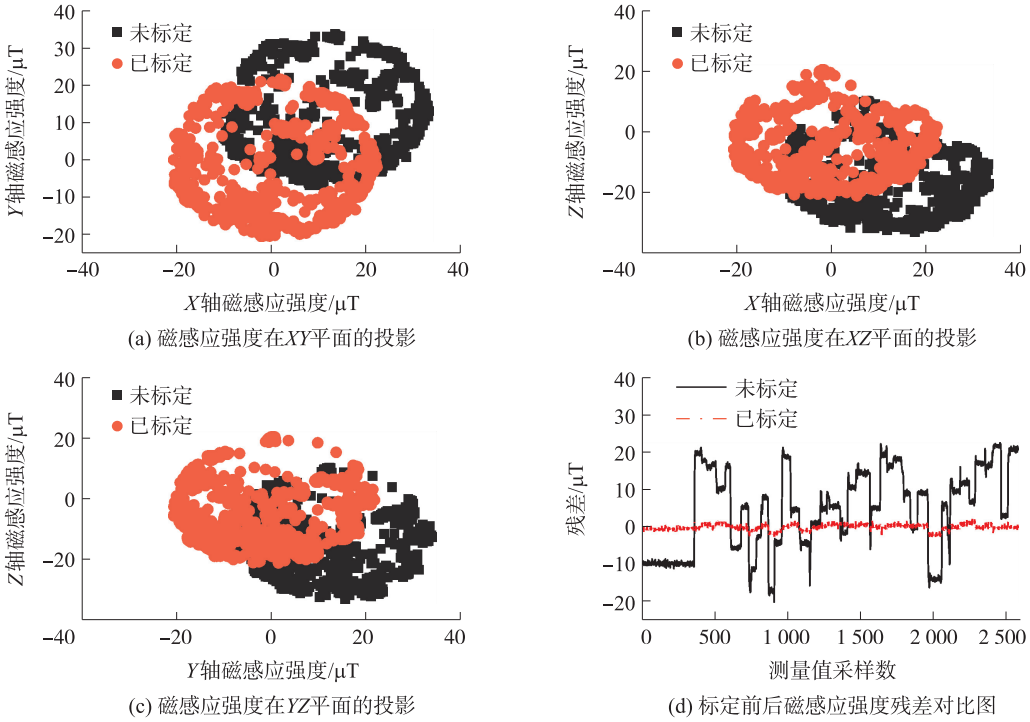
数据的影响忽略不计。

通过测量获得旋转时三轴磁力计数据，利用最小二乘椭球拟合方法对 ROV 上搭载的磁力计进行标定，求解误差方程，得到总标定矩阵 $\boldsymbol{W}$、总偏差矩阵 $\boldsymbol{V}$、磁场强度 m，分别为：

$$\begin{cases} \boldsymbol{W}=\begin{bmatrix} 0.981\ 0 & -0.027\ 0 & 0.052\ 1 \\ -0.027\ 0 & 1.043\ 3 & 0.040\ 3 \\ 0.052\ 1 & 0.040\ 3 & 0.982\ 2 \end{bmatrix} \\ \boldsymbol{V}=\begin{bmatrix} 10.764\ 6 \\ 13.042\ 2 \\ -11.174\ 9 \end{bmatrix} \\ m=20.985\ 8\ \mu\text{T} \end{cases}$$

图 5(a)、图 5(b)、图 5(c)为标定前后磁感应强度在 XY、XZ、YZ 三个平面上的投影。由图可知，由于存在硬磁干扰、软磁干扰等误差影响，三轴磁力计测量的磁感应强度明显偏离圆心，与理想球体偏离较大，畸变为椭球形状。经过标定后，三轴磁力计的磁感应强度得到修正，与球心落在原点，半径为 20.985 8 μT 的三维球体较为吻合。定义标定前后磁感应强度与理论磁场强度的残差为评价标准。标定前后磁感应强度残差对比如图 5(d)所示，由于硬磁干扰、软磁干扰等影响，导致未标定前磁感应强度与理论磁场强度的残差在±20 μT 范围内波动，波动较大，且较为混乱。经过最小二乘椭球拟合方法标定后，磁感应强度接近理论磁场强度，残差在−3 μT～2 μT 范围内波动，且残差均值为−0.165 0 μT。

综上所述，通过标定后磁力计误差模型中的各参数取得最优值，磁感应强度更接近于理想球体，且标定后残差波动明显减小，所以三轴磁力计的标定效果较为理想。



(a) 磁感应强度在XY平面的投影　(b) 磁感应强度在XZ平面的投影

(c) 磁感应强度在YZ平面的投影　(d) 标定前后磁感应强度残差对比图

图 5　标定前后磁感应强度与理论磁场强度对比测量值

4　结论

本文以“潜蛟Ⅱ”CHASING M2 ROV 为研究对象，基于最小二乘椭球拟合方法对其搭载的三轴磁力计传感器进行标定。通过分析磁力计的误差组成部分，并以此为依据建立误差模型。利用最小二乘椭球拟合方法计算得到磁力计误差模型参数，并结合 ROV 采集数据进行标定实验。实验结果表明，经过标定后，得到传感器误差模型中各参数的最优值。标定后磁感应强度得到修正，与球心落在原点，半径为 20.985 8 μT 的三维球体较为吻合，修正后的磁感应强度接近理论磁场强度，残差在−3 μT～2 μT 范围内波动，且残差均值为−0.165 0 μT。磁力计的标定效果较为理想，证明了该方法简单有效。

参考文献：

[1] 唐军，杨书麟，秦智. 水下机器人耐压舱结构设计及参数优化[J]. 江西理工大学学报，2020，41(5)：88-95.

[2] 曹少华，张春晓，王广洲，等. 智能水下机器人的发展现状及在军事上的应用[J]. 船舶工程，2019，41(2)：79-84，89.

[3] 何成奎. MEMS 传感器研究现状与发展趋势[J]. 农业开发与装备，2020(8)：27-29.

[4] Madgwick S O H, Harrison A J L, Vaidyanathan R. Estimation of IMU and MARG Orientation Using a Gradient Descent Algorithm[C]//2011 IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics, Zurich, Switzerland, IEEE, 2011:1-7.

[5] Admiraal M, Wilson S, Vaidyanathan R. Improved Formulation of the IMU and MARG Orientation Gradient Descent Algorithm for Motion Tracking in Human-Machine Interfaces[C]//2017 IEEE International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems (MFI), Daegu, South Korea, IEEE, 2017:403-410.

[6] Wu Z T, Hu X P, Wu M P, et al. Attitude-Independent Magnetometer Calibration for Marine Magnetic Surveys: Regularization Issue[J]. Journal of Geophysics and Engineering, 2013, 10(4):045002.

[7] Fang J C, Sun H W, Cao J J, et al. A Novel Calibration Method of Magnetic Compass Based on Ellipsoid Fitting [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2011, 60(6):2053-2061.

[8] 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):67-72.

[9] 高可,林新华,储志伟. 无磁转台的电子罗盘误差分离标定方法[J]. 传感器与微系统,2017,36(2):21-24.

[10] Pang H F, Pan M C, Chen J F, et al. Integrated Calibration and Magnetic Disturbance Compensation of Three-Axis Magnetometers[J]. Measurement, 2016, 93:409-413.

[11] 戴磊,齐俊桐,吴冲,等. 旋翼飞行机器人磁罗盘误差分析及校准[J]. 机器人,2012,34(4):418-423,484.

[12] Papafotis K, Sotiriadis P P. Multiple Accelerometers and Magnetometers Joint Calibration and Alignment[J]. IEEE Sensors Letters, 2020, 4(3):5500304.

[13] Zeng W S, Bian Q, Gao J J, et al. Attitude-Independent Magnetometer Calibration Based on Adaptive Filtering [J]. IEEE Sensors Journal, 2022, 22(1):195-202.

[14] Tedaldi D, Pretto A, Menegatti E. A Robust and Easy to Implement Method for IMU Calibration without External Equipments[C]//2014 IEEE International Conference on Robotics and automation (ICRC), Hong Kong, China, 2014:3042-3049.

[15] 刘宇,陈永炜,路永乐,等. 基于最小二乘法的磁力计误差补偿与校准[J]. 导航定位与授时,2018,5(1):17-21.

[16] 朱建良,王兴全,吴盘龙,等. 基于椭球曲面拟合的三维磁罗盘误差补偿算法[J]. 中国惯性技术学报,2012,20(5):562-566.

[17] 刘轶凡,肖文栋,吴健康,等. 基于牛顿迭代和椭球拟合的磁力和惯性传感器校准方法[J]. 仪器仪表学报,2020,41(8):142-149.

[18] Kim H J, Kwon K C, Shim D S. Fast Algebraic Calibration of MEMS Tri-Axis Magnetometer for Initial Alignment Using Least Square Method[J]. Journal of Electrical Engineering & Technology, 2020, 15(5):2361-2372.

唐　军(1975—),男,硕导,副教授。主要研究方向:水下机器人结构设计及控制,深海水力提升系统设计与研究。近年来主持国家自然科学基金项目 2 项、参与国家自然科学基金项目 1 项;主持江西省教育厅基金项目 1 项。发表学术论文 30 余篇,其中 SCI 5 篇,授权发明专利 11 项,其中国际发明专利 4 项。