

【引用格式】伍东凌, 陈正想, 蔡传真. 磁罗盘误差校准方法及其在海洋领域的应用[J]. 数字海洋与水下攻防, 2022, 5(6): 559-566.

# 磁罗盘误差校准方法及其在海洋领域的应用

伍东凌<sup>1, 2, 3</sup>, 陈正想<sup>1, 2, 3</sup>, 蔡传真<sup>1, 2, 3</sup>

- (1. 中国船舶集团有限公司第七一〇研究所, 湖北 宜昌 443003;
2. 国防科技工业弱磁一级计量站, 湖北 宜昌 443003;
3. 清江创新中心, 湖北 武汉 430076)

**摘要** 针对磁罗盘自身误差以及载体平台磁干扰导致磁罗盘测量精度不高的问题, 提出了一种磁罗盘误差校准方法。通过对磁罗盘自身误差以及载体平台磁干扰产生的误差进行分析, 建立了误差校准模型, 并结合实际应用条件给出了磁罗盘平面校准方法和空间校准方法, 采用最小二乘回归算法对模型求解, 解决了磁罗盘现场校准问题。利用所研制的磁罗盘开展了施加磁干扰后的磁罗盘校准验证实验, 并对校准前后的方位角精度进行了测试。试验结果表明: 在施加磁干扰后方位角最大误差  $12^\circ$  的条件下, 利用该方法校准后方位角最大误差仅为  $0.2^\circ$ , 说明了该方法的有效性。最后, 介绍了磁罗盘在海洋领域常见的几种应用。

**关键词** 磁罗盘; 地磁导航; 误差校准; 方位角

**中图分类号** TP212      **文献标识码** A      **文章编号** 2096-5753(2022)06-0559-08

**DOI** 10.19838/j.issn.2096-5753.2022.06.011

## Error Calibration Method of Magnetic Compass and its Application in Marine Field

WU Dongling<sup>1, 2, 3</sup>, CHEN Zhengxiang<sup>1, 2, 3</sup>, CAI Chuanzhen<sup>1, 2, 3</sup>

- (1. No. 710 R&D Institute, CSSC, Yichang 443003, China;
2. 1<sup>st</sup> Class Weak Magnetic Metering Station of NDM, Yichang 443003, China;
3. Qingjiang Innovation Center, Wuhan 430076, China)

**Abstract** Aiming at the problem of low measurement accuracy of magnetic compass caused by its own error and magnetic interference of the carrier platform, a magnetic compass error calibration method has been proposed. By analyzing the error of the magnetic compass itself and the error caused by the magnetic interference of the carrier platform, the error calibration model has been established. Combined with the practical application conditions, the plane calibration method and space calibration method of the magnetic compass are given. The Ordinary Least Squares Regression (OLS) algorithm is used for model solution, which can also solve the on-site calibration problem of the magnetic compass. Using the developed magnetic compass, the calibration verification experiment of magnetic compass with magnetic interference has been carried out, and the azimuth accuracy before and after calibration has been tested. The experimental results show that when the maximum azimuth error is  $12^\circ$  with magnetic interference, this method can calibrate that maximum azimuth error to be only  $0.2^\circ$ , which shows the effectiveness of this method. Finally, several common applications of the magnetic compass in marine field have been introduced.

**Key words** magnetic compass; geomagnetic navigation; error calibration; azimuth

## 0 引言

地磁场作为一种天然导航标尺,千百年来,一直被用于导航。磁罗盘就是利用地磁场指北原理研制而成,作为一种无源自主导航仪器,具有体积小、重量轻、无积累误差、隐蔽性好以及精度适中等优点<sup>[1]</sup>,并且在抗冲击、抗震动和与其它电子设备组合等方面也表现出优良的特性<sup>[2]</sup>,因此在水下机器人、井下钻探设备、海洋测绘、声呐浮标、天线姿态、红外测距夜视成像、无人机等领域得到广泛应用<sup>[3]</sup>。磁罗盘在使用过程中,通常是固定安装在各种载体平台上,而载体平台上存在的各种铁磁性物体将不可避免地对磁罗盘产生磁干扰,进而影响方位角精度<sup>[4]</sup>,因此需要对这些磁干扰进行有效校准,否则将无法发挥出磁罗盘应有的性能,造成精度严重下降<sup>[5]</sup>。

现有文献提出了几种可行的磁罗盘误差校准方法,文献[6]分析了最佳椭圆拟合的磁罗盘误差补偿算法,得出的结论是该方法未充分考虑软磁干扰的影响,只适用于软磁干扰较小的场合。文献[7]分析了磁干扰和仪表误差等影响磁罗盘精度的因素,提出了校准磁罗盘方位角的方法和步骤,但只在水平状态下进行了验证。文献[8]对磁罗盘的误差做了充分分析,提出了基于椭球拟合算法的误差补偿方法,但需要采集大量数据,不易工程实现。文献[9]提出了一种基于模拟退火算法的空间椭球校准方法,对灵敏度与硬磁干扰、软磁干扰与零偏进行整体校准,对磁罗盘方位角解算精度有明显提高,但数据采集量大,运算量也较大,不易在载体平台上现场实施。

针对各种载体平台安装使用磁罗盘时对方位角高精度测量的应用需求,本文详细分析了磁罗盘工作原理、自身误差影响因素、载体平台磁干扰误差影响因素,给出了适用于不同载体平台便于现场实施的磁罗盘平面圆周校准方法和空间校准方法,并用实测数据验证了该方法的有效性和适用性,为海洋浮标、海洋拖缆、UUV、单兵观瞄装备、固定翼飞机、直升机、无人机等海、陆、空应用领域磁罗盘高精度测量提供了有力的技术支撑。

## 1 磁罗盘工作原理及其系统主要构成

在自然环境中,通常认为地球及其表面存在的地磁场在相对较长的一段时间内是恒定的,地磁场水平分量大体上指向地理北极(地磁南极)方向,磁北方向与真北向之间的偏差(即磁偏角)随地理位置不同而不同,但在一定的地理范围内磁偏角是恒定的。磁罗盘就是利用地磁场的这一特性测量磁方位角,磁方位角经过磁偏角修正,即可得到相对于地理北的方位角(真北角)。

磁罗盘应具备在不同姿态下对方位角进行测量的能力,因此需要利用三轴加速度传感器首先计算出俯仰角及横滚角,再利用旋转矩阵将磁罗盘载体坐标系下三轴磁传感器数据变换到标准坐标系下,最后利用标准坐标系下水平 2 个方向的磁场数据即可求解出方位角。因此,磁罗盘主要构成包括:三轴磁传感器、三轴加速度传感器、温度传感器、电源模块、通信接口、微处理器以及相应的外围电路等,其功能框图如图 1 所示。

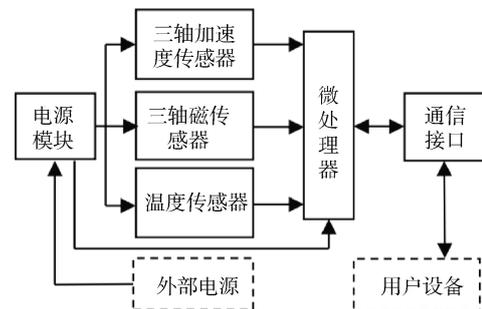


Fig. 1 Functional block diagram of magnetic compass

磁罗盘坐标系定义如图 2 所示,  $X$  轴磁传感器正方向沿磁罗盘长度方向,  $Y$  轴磁传感器正方向沿磁罗盘右侧方向,  $Z$  轴磁传感器正方向垂直向下, 3 个方向构成右手坐标系, 磁传感器方向均为指北输出为正。3 个加速度传感器 ( $A$  轴  $B$  轴  $C$  轴) 方向与 3 个磁传感器 ( $X$  轴  $Y$  轴  $Z$  轴) 方向对应, 加速度传感器方向均为垂直向下输出为正。

其中,三轴加速度传感器主要用于测量地球重力加速度,按公式(1)即可求出俯仰角  $\beta$  及横滚角  $\gamma$ 。俯仰角测量范围定义为  $-90^\circ \sim 90^\circ$ , 水平时

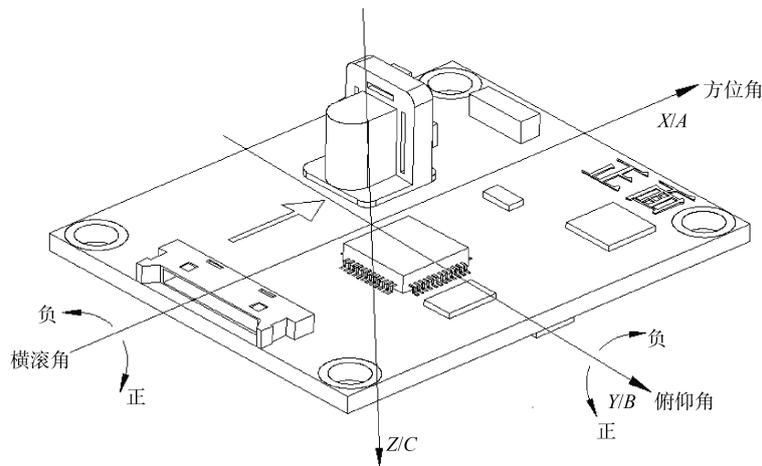


图 2 磁罗盘坐标系定义

Fig. 2 Definition of magnetic compass coordinate system

为  $0^\circ$ , 向上抬头为正, 向下低头为负; 横滚角测量范围定义为  $-180^\circ \sim 180^\circ$ , 水平时为  $0^\circ$ , 右倾为正, 左倾为负。

$$\begin{cases} \beta = -a \tan \frac{G_{a1}}{\sqrt{G_{b1}^2 + G_{c1}^2}} \\ \gamma = a \tan 2(G_{b1}, G_{c1}) \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $\beta$  为俯仰角;  $\gamma$  为横滚角;  $G_{a1}$  为磁罗盘 A 轴方向测得的加速度;  $G_{b1}$  为磁罗盘 B 轴方向测得的加速度;  $G_{c1}$  为磁罗盘 C 轴方向测得的加速度。

求解出俯仰角  $\beta$  和横滚角  $\gamma$  后可利用公式 (2) 将载体坐标系下三轴磁传感器测得的数据变换到标准坐标系下。

$$\begin{bmatrix} M_{x2} \\ M_{y2} \\ M_{z2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \gamma & -\sin \gamma \\ 0 & \sin \gamma & \cos \gamma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M_{x1} \\ M_{y1} \\ M_{z1} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中:  $M_{x1}$  为载体坐标系下磁罗盘 X 轴磁传感器测得的磁场;  $M_{y1}$  为载体坐标系下磁罗盘 Y 轴磁传感器测得的磁场;  $M_{z1}$  为载体坐标系下磁罗盘 Z 轴磁传感器测得的磁场;  $M_{x2}$  为标准坐标系下水平 X 轴方向的磁场;  $M_{y2}$  为标准坐标系下水平 Y 轴方向的磁场;  $M_{z2}$  为标准坐标系下垂直 Z 轴方向的磁场。

变换到标准坐标系下的 X 轴和 Y 轴处于水平面内, 理论上地磁场水平分量  $M_p$  在 X 轴和 Y 轴方向上的投影即为  $M_{x2}$  和  $M_{y2}$ , 如图 3 所示。

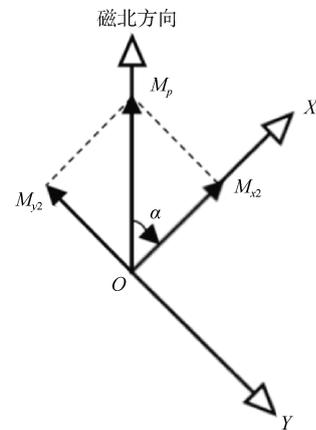


图 3 地磁场水平分量的投影

Fig. 3 Projection of horizontal component of geomagnetic field

因此, 方位角

$$\alpha = -a \tan 2(M_{y2}, M_{x2}) \quad (3)$$

式中:  $\alpha$  为磁方位角;  $M_{x2}$  为水平 X 轴方向的磁场;  $M_{y2}$  为水平 Y 轴方向的磁场。

## 2 磁罗盘误差影响分析及建模

造成磁罗盘测量误差的因素较多, 大体上可分为 2 种: 1) 由磁罗盘自身传感器测量误差引起, 主要包括磁传感器及加速度传感器的灵敏度误差、零偏误差、非正交误差; 2) 载体平台上存在的磁干扰引起, 主要包括硬磁干扰及软磁干扰。这些影响因素需要综合考虑, 并进行有效校准, 才能得到高精度的测量结果。

## 2.1 磁罗盘自身误差影响

磁罗盘自身误差主要包括：三轴磁传感器的灵敏度、零偏以及非正交误差，三轴加速度传感器的灵敏度、零偏以及非正交误差等。根据这些误差产生的机理，可以得到三轴磁传感器误差校准公式

$$\begin{bmatrix} m_{x1} \\ m_{y1} \\ m_{z1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 \cos \theta_3 & 0 & 0 \\ \cos \theta_1 \sin \theta_3 & \cos \theta_2 & 0 \\ \sin \theta_1 & \sin \theta_2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_{mx} m_{x0} + x_0 \\ k_{my} m_{y0} + y_0 \\ k_{mz} m_{z0} + z_0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中： $m_{x0}$ ， $m_{y0}$ ， $m_{z0}$ 为误差校准前的三轴磁场输出； $m_{x1}$ ， $m_{y1}$ ， $m_{z1}$ 为误差校准后的三轴磁场输出； $k_{mx}$ ， $k_{my}$ ， $k_{mz}$ 为 3 个磁传感器的灵敏度校准参数； $x_0$ ， $y_0$ ， $z_0$ 为 3 个磁传感器的零偏校准参数； $\theta_1$ ， $\theta_2$ ， $\theta_3$ 为 3 个磁传感器之间的非正交校准参数。

同理可得三轴加速度传感器误差修正公式

$$\begin{bmatrix} g_{a1} \\ g_{b1} \\ g_{c1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_4 \cos \theta_6 & 0 & 0 \\ \cos \theta_4 \sin \theta_6 & \cos \theta_5 & 0 \\ \sin \theta_4 & \sin \theta_5 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_{gx} g_{a0} + a_0 \\ k_{gy} g_{b0} + b_0 \\ k_{gz} g_{c0} + c_0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中： $g_{a0}$ ， $g_{b0}$ ， $g_{c0}$ 为误差校准前的三轴加速度输出； $g_{a1}$ ， $g_{b1}$ ， $g_{c1}$ 为误差校准后的三轴磁场输出； $k_{gx}$ ， $k_{gy}$ ， $k_{gz}$ 为 3 个加速度传感器的灵敏度校准参数； $a_0$ ， $b_0$ ， $c_0$ 为 3 个加速度传感器的零偏校准参数； $\theta_4$ ， $\theta_5$ ， $\theta_6$ 为 3 个加速度传感器之间的非正交校准参数。

按式(4)和式(5)在磁罗盘出厂前对其自身误差进行校准后，磁罗盘即可输出准确的方位角、俯仰角及横滚角。

## 2.2 载体平台磁干扰误差影响

载体平台上可能存在的电池、电机、磁性金属等物体产生的磁干扰主要为硬磁干扰场及软磁干扰场。硬磁干扰场的特征是：大小及方向不随载体运动姿态的改变而改变，也就是它相对于载体坐标系而言是不变的；软磁干扰场的特征是：大小及方向将随载体运动姿态和地磁场的变化而发生变化，也就是随着载体与地磁场矢量相对关系的改变，软磁干扰场也会发生变化。

由以上分析可知硬磁干扰场  $\vec{T}_1$  数学模型可定义为

$$\vec{T}_1 = H_x \vec{i} + H_y \vec{j} + H_z \vec{k} \quad (6)$$

式中： $\vec{i}$ ， $\vec{j}$ ， $\vec{k}$ 分别为磁罗盘载体坐标系  $x$ 轴、 $y$ 轴、 $z$ 轴上的单位矢量； $H_x$ ， $H_y$ ， $H_z$ 为载体坐标系 3 个方向的硬磁干扰校准参数。

软磁干扰场  $\vec{T}_2$  数学模型可定义为

$$\vec{T}_2 = (a_{11}T_x + a_{12}T_y + a_{13}T_z)\vec{i} + (a_{21}T_x + a_{22}T_y + a_{23}T_z)\vec{j} + (a_{31}T_x + a_{32}T_y + a_{33}T_z)\vec{k} \quad (7)$$

式中： $a_{11}$ ， $a_{12}$ ， $a_{13}$ ， $a_{21}$ ， $a_{22}$ ， $a_{23}$ ， $a_{31}$ ， $a_{32}$ ， $a_{33}$ 分别为软磁干扰校准参数； $T_x$ ， $T_y$ ， $T_z$ 分别为磁罗盘载体坐标系  $x$ 轴、 $y$ 轴、 $z$ 轴 3 个方向上的地磁场大小。

综合考虑磁载体平台硬磁干扰及软磁干扰误差影响，结合式(6)和式(7)可以得到磁干扰补偿数学模型

$$\begin{bmatrix} m_{x2} \\ m_{y2} \\ m_{z2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 & A_2 & A_3 \\ A_4 & A_5 & A_6 \\ A_7 & A_8 & A_9 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_{x1} \\ m_{y1} \\ m_{z1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} A_{10} \\ A_{11} \\ A_{12} \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中： $m_{x1}$ ， $m_{y1}$ ， $m_{z1}$ 为载体平台磁干扰校准前的磁罗盘三轴磁场输出； $m_{x2}$ ， $m_{y2}$ ， $m_{z2}$ 为载体平台磁干扰校准后的磁罗盘三轴磁场输出； $A_1 \sim A_9$ 为与软磁干扰相关的 9 个误差校准参数； $A_{10} \sim A_{12}$ 为与硬磁干扰相关的 3 个误差校准参数。磁罗盘安装到载体平台上之后，进行现场校准，磁罗盘才能输出准确的方位角。

## 3 磁罗盘校准方法

由于对载体平台上磁干扰的校准必须在磁罗盘安装到载体平台上之后，连同载体平台一起开展，才能有效提高磁罗盘方位角测量精度。因此磁罗盘应具备强大的现场校准能力，才能适用于不同载体平台。

磁罗盘开展校准时，对开展校准区域的环境磁场要求为磁场环境均匀、稳定，一般而言，在自然环境下，均可满足该要求。可以利用这一特征对磁罗盘误差修正模型进行求解。从式(8)中可以看出，磁罗盘校准后的三轴磁场输出为  $m_{x2}$ ， $m_{y2}$ ， $m_{z2}$ ，利用磁罗盘不同姿态下校准后的三轴磁场输

出合成的总场应为一个固定值, 如下式所示:

$$m_{x2}^2 + m_{y2}^2 + m_{z2}^2 = M^2 \quad (9)$$

式中:  $m_{x2}$ ,  $m_{y2}$ ,  $m_{z2}$  为磁罗盘校准后的三轴磁场输出;  $M$  为当地地磁总场。

将式 (8) 带入式 (9) 中, 化简后可得

$$B_1 m_{x1}^2 + B_2 m_{y1}^2 + B_3 m_{z1}^2 + B_4 m_{x1} m_{y1} + B_5 m_{x1} m_{z1} + B_6 m_{y1} m_{z1} + B_7 m_{x1} + B_8 m_{y1} + B_9 m_{z1} + B_{10} = M^2 \quad (10)$$

式中:  $B_1 \sim B_{10}$  为需求解的 10 个校准参数。

从式 (10) 中可以看出, 这是一个多元线性回归模型,  $B_1 \sim B_{10}$  为回归系数, 可以利用最小二乘回归算法对模型求解。通过采集多组磁罗盘不同姿态下的数据, 寻找参数  $B_1$ ,  $B_2$ ,  $\dots$ ,  $B_{10}$  的估计值  $\hat{B}_1$ ,  $\hat{B}_2$ ,  $\dots$ ,  $\hat{B}_{10}$ , 使残差平方和达到极小值, 即寻找  $\hat{B}_1$ ,  $\hat{B}_2$ ,  $\dots$ ,  $\hat{B}_{10}$  满足:

$$Q(\hat{B}_1, \hat{B}_2, \dots, \hat{B}_{10}) = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{B}_1 x_{i1} - \hat{B}_2 x_{i2} - \dots - \hat{B}_{10})^2 = \min_{B_1, B_2, \dots, B_{10}} \sum_{i=1}^n (y_i - B_1 x_{i1} - B_2 x_{i2} - \dots - B_{10})^2 \quad (11)$$

这样, 便可对磁干扰补偿数学模型中的参数进行求解, 得到磁罗盘校准参数, 实现在载体平台上磁罗盘方位角高精度的测量。

在实际应用中, 安装磁罗盘的载体大体上可分为 2 类: 1) 飞机、舰艇、汽车等大型设备; 2) 单兵手持设备、小型 UUV、拖缆等小型设备。

在上述大型设备中应用时, 考虑到大型设备不易实施大倾斜状态下的校准数据采集, 并且在大部分情况下, 大型设备上安装的磁罗盘均是在接近水平状态下工作, 针对这一情况, 专门开发了平面圆周校准方法和平面多点校准方法。该方法操作简单, 只需要将大型设备匀速缓慢旋转一圈即可完成, 且无需其他基准设备参与。但需注意的是, 采用该方法校准完成后, 只能保证磁罗盘在接近水平状态下的方位角精度。

在上述小型设备中应用时, 考虑到小型设备较为容易实施大倾斜状态下的校准数据采集, 并且小型设备在实际使用过程中, 需要在不同倾斜状态下对方位角进行测量, 针对这一情况, 专门开发了空

间多点校准方法和空间旋转校准方法。该方法操作简单, 最少仅需采集 12 组磁罗盘不同姿态下的数据, 即可完成相关校准, 也不需要其他基准设备参与, 校准完成后, 可保证磁罗盘在各种姿态下的方位角精度。

#### 4 试验验证

本文利用中国船舶集团第七一〇研究所自主研发的 MCL601 磁罗盘开展相关试验验证, 该磁罗盘集成了三轴磁传感器、三轴加速度传感器以及温度传感器等, 具有体积小、重量轻、功耗低、精度高等优点, 实物照片如图 4 所示。



图 4 MCL601 磁罗盘  
Fig. 4 MCL601 magnetic compass

MCL601 磁罗盘内置上述提及的空间多点校准方法、空间旋转校准方法、平面圆周校准方法以及平面多点校准方法, 适用于多种载体平台, 可对载体平台上存在的磁干扰进行快速校准。还具备输入当地经纬度及时间信息, 自动解算出当地磁偏角, 完成磁北与真北之间的转换的功能。此外, 针对手持单兵观瞄设备等集成度高、安装空间有限的小型设备, 设计了 24 种安装方式, 便于用户根据实际情况进行横平竖直共 24 种安装, 无论采用哪种安装方式, 磁罗盘均能以载体平台的坐标定义输出正确的姿态角数据。

该磁罗盘可输出高精度的方位角、俯仰角、横滚角以及温度、三轴磁场、三轴加速度等数据, 其主要性能指标如表 1 所示。

**表 1 MCL601 磁罗盘主要性能指标**  
 Table 1 Main performance indexes of MCL601 magnetic compass

项目	指标
方位角测量范围/(°)	0~360
方位角精度/(°)	≤0.1 (RMS) @水平 ≤0.2 (RMS) (@-65≤俯仰角≤65)
俯仰角测量范围/(°)	-90°~90°
俯仰角精度/(°)	≤0.05 (RMS)
横滚角测量范围/(°)	-180~180
横滚角精度/(°)	≤0.05 (RMS) (@-65≤俯仰角≤65)
磁偏角自动解算功能	支持
尺寸/mm	长×宽: 40×14, 高≤11 (PCB 板)
重量/g	≤10 (PCB 板)
工作电压/V	DC 3.8~15
工作电流/mA	≤13

磁罗盘出厂校准完成后,即完成对其自身误差的修正。将完成出厂校准后的磁罗盘固定安装在无磁转台上,以无磁转台输出的角度为基准,对其方位角、俯仰角以及横滚角精度进行测试。在精度测试过程中,转台每转 30°即采集 1 次磁罗盘输出的角度数据,并与基准数据进行对比。

磁罗盘方位角精度测试数据如表 2 所示,从测试结果可以看出,磁罗盘方位角最大误差为 0.2°。

**表 2 MCL601 磁罗盘方位角精度测试数据**  
 Table 2 Azimuth accuracy test data of MCL601 magnetic compass (°)

转台方位角基准角度	磁罗盘输出方位角	差值
0.00	0.00	0.00
30.00	30.00	0.00
60.00	59.90	0.10
90.00	89.90	0.10
120.00	119.95	0.05
150.00	150.00	0.00
180.00	180.10	-0.10
210.00	210.10	-0.10
240.00	240.20	-0.20
270.00	270.10	-0.10
300.00	300.00	0.00
330.00	330.00	0.00
0.00	0.00	0.00

俯仰角精度测试数据如表 3 所示,从测试结果可以看出,当转台俯仰角为 ±90°时,磁罗盘俯

仰角最大误差为 0.03°,在其他角度时最大误差仅为 0.01°。

**表 3 MCL601 磁罗盘俯仰角精度测试数据**  
 Table 3 Pitch angle accuracy test data of MCL601 magnetic compass (°)

转台俯仰角基准角度	磁罗盘输出俯仰角	差值
0.00	0.00	0.00
30.00	29.99	-0.01
60.00	59.99	-0.01
90.00	89.97	-0.03
60.00	60.01	0.01
30.00	30.00	0.00
0.00	0.01	0.01
-30.00	-29.99	0.01
-60.00	-59.99	0.01
-90.00	-89.97	0.03
-60.00	-60.01	-0.01
-30.00	-30.00	0.00
0.00	-0.01	-0.01

横滚角精度测试数据如表 4 所示,从测试结果可以看出,磁罗盘横滚角最大误差为 0.01°。

**表 4 MCL601 磁罗盘横滚角精度测试数据**  
 Table 4 Roll angle accuracy test data of MCL601 magnetic compass (°)

转台横滚角基准角度	磁罗盘输出横滚角	差值
0.00	0.00	0.00
30.00	29.99	-0.01
60.00	60.00	0.00
90.00	90.00	0.00
120.00	119.99	-0.01
150.00	150.00	0.00
180.00	179.99	-0.01
-150.00	-150.01	-0.01
-120.00	-120.00	0.00
-90.00	-90.00	0.00
-60.00	-60.01	-0.01
-30.00	-29.99	0.01
0.00	0.00	0.00

为验证磁罗盘对载体平台上存在的磁干扰的校准能力,将磁罗盘与磁干扰物体一起固定在一个工装上,在进行校准前,对其方位角精度进行测试,数据如表 5 所示。从测试数据中可以看出,由于磁干扰的存在,方位角最大误差达到 12°,无法满足实际应用需求。

表5 MCL601 磁罗盘校准前方位角精度测试数据  
Table 5 Azimuth accuracy test data of MCL601 magnetic compass before calibration (°)

转台方位角基准角度	磁罗盘输出方位角	差值
0.00	355.00	5.00
30.00	27.50	2.50
60.00	58.40	1.60
90.00	88.60	1.40
120.00	117.80	2.20
150.00	145.65	4.35
180.00	172.70	7.30
210.00	200.05	9.95
240.00	227.65	12.35
270.00	260.10	9.90
300.00	291.30	8.70
330.00	322.85	7.15
0.00	355.00	5.00

采用 12 点空间校准方法进行校准后, 磁罗盘方位角精度测试数据如表 6 所示。从表中可以看出, 方位角最大误差仅为 0.3°, 说明了该校准方法的有效性。

表6 MCL601 磁罗盘校准后方位角精度测试数据  
Table 6 Azimuth accuracy test data of MCL601 magnetic compass after calibration (°)

转台方位角基准角度	磁罗盘输出方位角	差值
0.00	359.95	0.05
30.00	29.90	0.10
60.00	59.80	0.20
90.00	89.80	0.20
120.00	119.90	0.10
150.00	149.95	0.05
180.00	180.00	0.00
210.00	210.15	-0.15
240.00	240.20	-0.20
270.00	270.10	-0.10
300.00	300.05	-0.05
330.00	330.00	0.00
0.00	359.95	0.05

## 5 磁罗盘在海洋领域的应用

### 5.1 磁罗盘在声呐浮标中的应用

航空声呐浮标通常安装于反潜巡逻机、反潜直升机等装备上, 为一次性使用的消耗性器材。因其具有使用方便、搜潜速度快、搜索面积大、效率高、

隐蔽性强等特点, 成为航空反潜艇最常用的方法之一。利用声呐浮标进行水下目标定位首先需要进行浮标本身的定位, 浮标相对于飞机位置的精度, 将直接影响系统对水下目标的定位精度。

利用 GPS 对声呐浮标定位能大大缩短载机达到指定浮标的时间, 从而提高对水下目标的搜索速度。声呐浮标在海面工作时, 由于海流和海浪起伏等因素, 浮标的姿态是随机变化的, 这将影响系统的定位精度。此时, 磁罗盘可用于辅助 GPS 定位, 实时监测浮标的姿态和方位角, 对浮标姿态进行实时坐标更正。



图5 磁罗盘在声呐浮标中的应用  
Fig. 5 Application of magnetic compass in sonar buoy

### 5.2 磁罗盘在海洋浮标中的应用

海洋浮标是一种投放在相关海域中兼具观测和测量作用的信息采集设备, 其利用自身所携带的各类传感器, 来获取周围海洋环境中的相关数据, 包括海洋水文、气象等几十种参数, 磁罗盘与 GPS 模块配合使用, 可获取海洋浮标的姿态与位置信息。这些数据帮助人们研究和认识海洋, 对人类开发和利用海洋具有重要意义。



图6 磁罗盘在海洋浮标中的应用  
Fig. 6 Application of magnetic compass in ocean buoy

### 5.3 磁罗盘在海洋拖缆中的应用

我国拥有着广阔的“蓝色国土”, 海洋油气资源蕴藏丰富, 海洋地震勘探是通过人工方式向海底发射声波引起海底震动, 然后由拖缆上的水听器接收海底反射的地震波信号, 并将其转换为数字信号

上传至船上系统进行处理。通过声波阻抗反演,就可以获取海下地质地貌、油气分布等信息。

目前用于勘探的地震拖缆长度一般在 3 000~8 000 m,拖缆在海流、海浪的作用下易发生倾斜和旋转,需要利用磁罗盘实时监控拖缆的姿态信息为水听器提供相关信息。在借助拖缆进行海洋勘探的过程中,磁罗盘是对其姿态进行测量的重要器件,姿态信息的准确性将直接影响勘探的结果。



图7 磁罗盘在海洋拖缆中的应用

Fig. 7 Application of magnetic compass in marine streamer

#### 5.4 磁罗盘在水下机器人中的应用

水下机器人常在深不可测、还未探索的海域或环境恶劣的水下作业。水下机器人除了具备有自动控制系统、通讯系统和环境探测系统外,还必须有一套精确的导航定位系统。其中,磁罗盘在确定小型水下机器人的航向上具有重要的作用。为精确到达作业地点,自动控制系统和通讯系统探测环境,避开障碍物,对其运动进行控制和调节,磁罗盘可根据水下机器人所在位置进行



图8 磁罗盘在水下机器人中的应用

Fig. 8 Application of magnetic compass in underwater vehicle

航向测量,并将信息发送给中控系统,以便实时调整航向,向目的地推进。

## 6 结束语

磁罗盘在各种载体平台上应用时,将不可避免的被平台上各种磁干扰物体影响,从而造成方位角精度的严重下降。本文综合考虑磁罗盘自身测量误差以及载体平台上存在的硬磁干扰及软磁干扰影响,建立了磁罗盘误差补偿模型,并给出了相应的模型求解方法。同时充分考虑了磁罗盘在实际应用中面临的问题,针对大型载体平台及小型载体平台上分别给出了不同的易于在现场实施的磁罗盘校准方法,并通过开展实验,验证了该方法的有效性和实用性。

## 参考文献

- [1] 陈正想,熊莉丽,龚天平. 小型化技术与数字磁罗盘的开发[J]. 水雷战与舰船防护, 2005, 13(1): 26-29.
- [2] 李希胜,王家鑫,汤程,等. 高精度磁电子罗盘的研制[J]. 传感技术学报, 2006, 19(6): 2441-2444.
- [3] 孙倩,付虹. 椭圆拟合的电子罗盘磁差补偿[J]. 传感器与微系统, 2016, 35(9): 39-41.
- [4] 伍东凌,陈正想,王秀. 基于遗传算法的磁干扰补偿方法[J]. 探测与控制学报, 2012, 34(6): 16-20.
- [5] 陈正想,石超. 数字磁罗盘磁干扰补偿方法研究[J]. 水雷战与舰船防护, 2007, 15(3): 6-8.
- [6] 杨新勇,黄圣国. 磁罗盘的罗盘分析与验证[J]. 电子科技大学学报, 2004, 33(5): 547-550.
- [7] 晁敏,蒋东方,文彩虹. 磁罗盘误差分析与校准[J]. 传感技术学报, 2010, 23(4): 525-531.
- [8] 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.
- [9] 晁正正,张晓明,马喜宏,等. 一种新的电子罗盘校准算法研究[J]. 传感技术学报, 2019, 32(1): 106-110.

(责任编辑:曹晓霖)