

【引用格式】伍东凌, 邓超凡, 孟诚. 舰载直升机中磁罗盘方位角测量误差分析[J]. 数字海洋与水下攻防, 2023, 6(5): 569-574.

舰载直升机中磁罗盘方位角测量误差分析

伍东凌^{1, 2, 3}, 邓超凡^{1, 2, 3}, 孟诚^{1, 2, 3}

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

摘要 舰载直升机上安装的磁罗盘方位角测量精度不仅会受直升机自身的磁干扰影响, 在舰载直升机起飞、降落以及低空飞越舰船时, 还会受舰船上存在的磁干扰影响。论述了磁罗盘工作原理以及方位角测量误差产生的机理, 并对舰载直升机中磁罗盘的磁干扰校准给出了可行的方法。同时, 对舰载直升机以不同方位角、不同高度在舰船上空飞越时, 磁罗盘方位角受舰船磁干扰的影响进行了深入分析, 并通过 MATLAB 仿真进行了验证。

关键词 磁罗盘; 方位角; 误差分析

中图分类号 TN966

文献标识码 A

文章编号 2096-5753(2023)05-0569-06

DOI 10.19838/j.issn.2096-5753.2023.05.006

Analysis of Azimuth Measurement Error of Magnetic Compass in Shipborne Helicopter

WU Dongling^{1, 2, 3}, DENG Chaofan^{1, 2, 3}, MENG Cheng^{1, 2, 3}

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

Abstract The azimuth measurement accuracy of the magnetic compass installed on the shipboard helicopter is not only affected by the magnetic interference of the helicopter itself, but also by the magnetic interference existing on the ship when the shipboard helicopter takes off, lands and flies over the ship at low altitude. In this paper, the working principle of the magnetic compass and the mechanism of azimuth measurement error are discussed, and a feasible method for magnetic interference calibration of the magnetic compass in the shipboard helicopter is proposed. At the same time, the influence of the ship magnetic interference on the azimuth of the magnetic compass when the shipboard helicopter flies over the ship at different azimuth angles and heights is analyzed. It is then verified through MATLAB simulation.

Key words magnetic compass; azimuth; error analysis

0 引言

地磁场具有不易被大范围屏蔽、无累计误差和精度适中等优点, 作为一种无源自主指向基准, 非常适用于对方位角精度测量要求较高的应用场合。磁罗盘就是利用地磁场指北原理研制而成, 具有体积小、功耗低、精度高等优点^[1-2], 已广泛应用于航空、海洋观测、手持观测设备、天线指向等领域,

能够为载体平台提供实时的方位角、俯仰角、横滚角等信息^[3]。

舰载直升机在执行相关任务时, 需要经常在甲板上起飞、降落或在舰船上空飞越。在此过程中, 舰载直升机上安装的磁罗盘因受舰船磁干扰的影响会导致其方位角测量误差变大^[4-5]。因此, 有必要对舰载直升机以不同高度、不同相对方位角飞越舰船或悬停在舰船上空时, 舰船磁干扰对舰载直升

机中磁罗盘方位角测量精度的影响进行分析。

1 磁罗盘系统构成及其工作原理

地球是一个天然磁体，地球表面上每一处的磁场都有相应的大小和方向，并且在绝大多数区域，地磁场在相对较长时间内是恒定的。在地球上的某一点，把含有这一点的磁场矢量的垂直面叫做磁子午面，地理子午线与当地地磁场在水平面上的投影之间的夹角称为磁偏角。从地磁图上的等偏线可以看出，在一定的地理范围内，磁偏角基本一致，而且在一段相对较长的时间内也是基本不变的，因此地磁场是一个天然的导航标尺。磁罗盘就是利用这一特性来确定载体的磁方位角，磁方位角经过磁偏角修正后，可以获得相对地理北的方位角^[6-7]。

舰载直升机在飞行过程中处于动态运动状态，因此磁罗盘应具备在动态条件下对方位角进行高精度测量的能力。由此，可利用三轴 MEMS 加速度传感器以及三轴 MEMS 陀螺仪的数据计算出载体平台的俯仰角及横滚角，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方向的磁场数据即可求解出方位角^[8-9]。

根据以上原理，磁罗盘主要硬件构成包括：三轴磁传感器、三轴加速度传感器、三轴 MEMS 陀螺仪、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^[10]，其功能框图如图 1 所示。

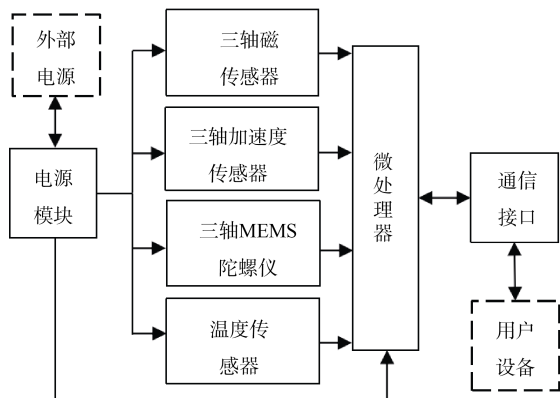


图 1 磁罗盘功能框图

Fig. 1 Functional block diagram of magnetic compass

磁罗盘载体坐标系定义如图 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，磁传感器方向均为指向北时输出为正；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时输出为正；3 个 MEMS 陀螺仪（ G_x 轴、 G_y 轴、 G_z 轴）方向也与 3 个磁传感器方向对应，绕对应轴系旋转时，顺时针旋转该轴输出角速率为正，逆时针旋转该轴输出角速率为负。

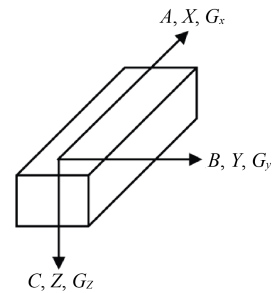


图 2 磁罗盘载体坐标系示意图

Fig. 2 Schematic diagram of magnetic compass carrier coordinate system

三轴加速度传感器用于测量地球重力加速度，根据测得的数据，利用公式（1）即可求解出载体俯仰角 β 及横滚角 γ 。俯仰角测量范围定义为 $-90^\circ \sim 90^\circ$ ，水平时为 0° ，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° ，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： β 为俯仰角； γ 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。

由于载体平台在运动过程中，自身也会产生加速度，因此三轴加速度传感器测得的数据中包含了地球重力加速度以及载体平台产生的加速度，这两者无法区分。这将导致在动态条件下，如果仅依靠三轴加速度传感器对载体平台的俯仰角及横滚角进行测量，会产生较大误差，因此还需要利用三轴 MEMS 陀螺仪实时测得的载体坐标系下三轴角速

率数据进行融合处理, 才能计算出动态条件下较为准确的俯仰角和横滚角数据。

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

算出俯仰角 β 和横滚角 γ 后可根据公式 (2), 利用旋转矩阵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。

式中: H_{x1} 、 H_{y1} 、 H_{z1} 分别为载体坐标系下磁罗盘 X、Y、Z 轴磁传感器测得的磁场数据; H_{x2} 、 H_{y2} 、 H_{z2} 分别为标准坐标系下水平 X 轴方向、Y 轴方向以及垂直 Z 轴方向的磁场数据。

方位角 α 可按公式 (3) 求出:

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

式中: α 为磁方位角; H_{x2} 为水平 X 轴方向的磁场; H_{y2} 为水平 Y 轴方向的磁场。

2 舰载直升机磁罗盘方位角误差来源

从以上分析可知, 磁罗盘在方位角解算过程中, 需要利用三轴磁传感器测量当地地磁场矢量信息, 但安装磁罗盘的舰载直升机等载体平台上不可避免的会存在各种铁磁干扰, 这将对磁罗盘方位角测量精度产生致命影响。

经典电磁理论认为, 载体复杂磁环境对磁传感器的影响, 可以简化为硬铁效应和软铁效应。因此干扰磁场也主要由 2 部分组成, 分别为硬磁干扰场和软磁干扰场。前者由载体平台上的永久性磁铁和被磁化的钢铁物体组成, 其特点是当载体位于某一固定位置时, 磁传感器与硬磁物体之间没有相对运动, 测得的磁场强度为固定值, 不随载体姿态的变化而变化。后者主要由地球磁场与磁传感器周围的软磁物体相互作用产生, 对磁罗盘中三轴磁传感器的作用, 体现在影响磁场大小和方向 2 个方面^[11-12]。

首先考虑舰载直升机自身存在的磁干扰对磁罗盘方位角测量精度的影响, 将磁罗盘固定安装在舰载直升机上后, 使舰载直升机在磁罗盘专用校准场地水平旋转 1 圈。受载体平台上存在的硬磁干扰

的影响, X 轴和 Y 轴磁传感器输出如图 3 (a) 所示, 在 X 轴方向及 Y 轴方向均有固定零偏, 因此该圆心偏离坐标原点; 受载体平台上存在的软磁干扰的影响, X 轴和 Y 轴磁传感器输出如图 3 (b) 所示, 在不同方位下, X 轴和 Y 轴输出均不一样, 因此呈现出椭圆形状^[13-14]。

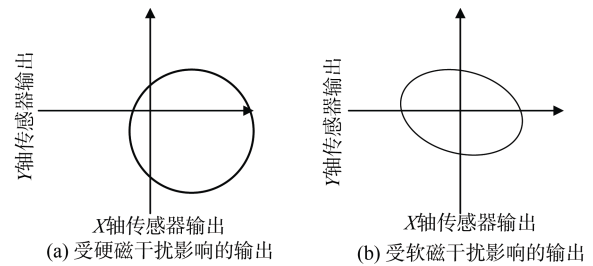


图 3 硬磁干扰与软磁干扰对磁场测量的影响
 Fig. 3 Influence of hard magnetic interference and soft magnetic interference on magnetic field measurement

通过建立数学模型, 可以证明当载体平台原地旋转 1 周后, 其三轴磁传感器测得的数据在水平面的分部理论上应为正圆。然而, 在硬磁干扰和软磁干扰的共同作用下, 载体平台上干扰磁场的大小和方向都会随载体方位角不同而发生一定的变化, 理想的正圆分布往往遭到破坏, 变成了中心偏离坐标原点的近似椭圆的分布。为了准确求解出方位角, 必须从磁场测量数据中消除载体上存在的硬铁干扰和软铁干扰的影响。

磁罗盘固定安装到载体平台上之后, 受硬磁干扰与软磁干扰的影响, 三轴磁传感器实际测得的磁场数据如式 (4) 所示:

$$B = \begin{bmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_x & S_{xy} & S_{xz} \\ S_{yx} & k_y & S_{yz} \\ S_{zx} & S_{zy} & k_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_{x0} \\ B_{y0} \\ B_{z0} \end{bmatrix} = SM + B_0 \quad (4)$$

式中: B 为三轴磁传感器测得的实际磁场值; M 为当地地磁场的值; S 与 B_0 分别表示软磁干扰与硬磁干扰对磁场的影响。

经过相关研究, 目前已有多种现场校准方法可有效消除载体平台上存在的磁干扰, 具体包括: 磁场空间多点校准方法、磁场空间旋转校准方法、平面多点校准方法、平面圆周校准方法等。不同领域

用户可根据磁罗盘所安装载体的实际环境,选择合适的方法现场开展载体平台磁干扰校准工作。考虑到舰载直升机体积重量较大,且在实际飞行过程中,大部分时间为水平飞行,因此可以选用平面多点校准方法或平面圆周校准方法对舰载直升机上存在的硬磁干扰及软磁干扰进行修正。因此,直升机自身的磁干扰可以通过平面校准的方法进行消除。

但在实际舰载环境下,磁罗盘不仅会受直升机上存在的磁干扰物体的影响,在起飞、降落、低空飞越舰船时,还将不可避免地受到舰船上存在的磁干扰的影响,这种影响是无法消除的。因此,需要对舰载直升机在起降过程中直升机处于舰船上空不同高度、不同方位角条件下,舰船对磁罗盘方位角精度的影响进行分析。同时,还需对舰载直升机以不同方位角、不同高度超越舰船时,舰船对磁罗盘方位角精度的影响进行分析。

3 舰船磁场对磁罗盘精度影响的仿真分析

假设搭载直升机的舰船长度为 160 m,宽度为 20 m,用磁偶极子线阵列对舰船磁场进行模拟,如图 4 所示。每个磁偶极子之间间隔为 20 m,编号依次为 1-8 号,每个磁偶极子磁矩方向如图 4 所示。为了便于分析,本文仅从宏观角度分析舰船自身存在的磁干扰对舰载机上磁罗盘方位角测量误差的影响,因此这里忽略舰船所处的地理位置以及舰船在不同航向下产生的感应磁场。这里假定每个磁偶极子 X 轴方向磁矩大小为 $3 \times 10^5 \text{ A} \cdot \text{m}^2$, Y 轴方向磁矩大小为 $3 \times 10^3 \text{ A} \cdot \text{m}^2$, Z 轴方向磁矩大小为 $3 \times 10^4 \text{ A} \cdot \text{m}^2$ 。

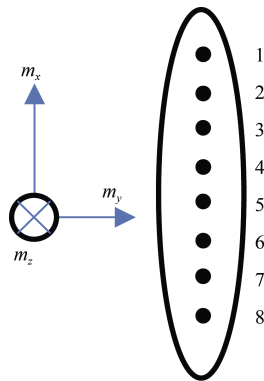


图 4 舰船磁偶极子线阵列模型

Fig. 4 A model of ship magnetic dipole linear array

每个磁偶极子在距离其 r 处产生的磁场可以表示为

$$B = \frac{3\mu_0(m \cdot r_0)r_0 - \mu_0 m}{4\pi r^3} \quad (5)$$

式中: m 为磁性目标的磁矩; μ_0 为真空磁导率; $r = |r|$ 为磁性目标到测量点的距离; $r_0 = r/r$ 为沿 r 的单位矢量。

第 i 个磁偶极子在距离其 r 处产生的磁场为 B_i , 因此磁偶极子线阵列目标磁场为

$$B_s = \sum_{i=1}^N B_i \quad (6)$$

3.1 舰载直升机起降时磁罗盘精度仿真分析

舰载直升机在起降过程中,舰船及飞机的方位角均可能处于任意方向,为了简化处理,这里假设起降过程中,直升机位于舰船,即在 1 号磁偶极子的正上方,在直升机起降过程中,船体和直升机均保持平稳状态。

假设舰船方位角及直升机方位角均为 $0^\circ \sim 360^\circ$ 的随机值,仿真运算 1 000 次,分别产生直升机位于舰船正上方 20 m、40 m 以及 60 m 时直升机方位角及舰船方位角随机组合的 1 000 组数据,3 个不同高度下仿真运算得到的方位角误差如图 5 所示。

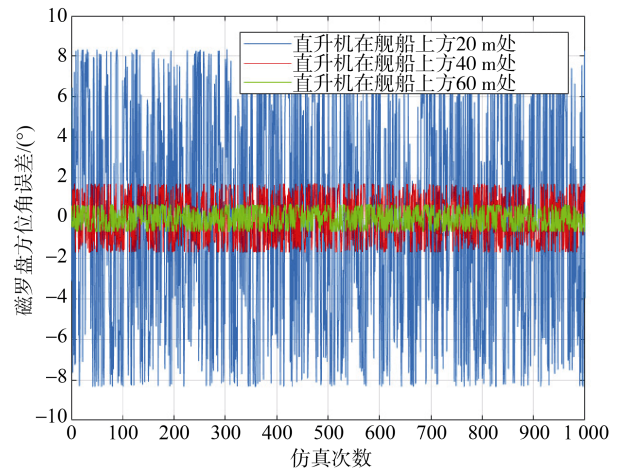


图 5 直升机在舰船上方 20 m、40 m、60 m 处时磁罗盘方位角误差

Fig. 5 Azimuth error of magnetic compass when helicopter is at 20 m, 40 m and 60 m above the ship

图中,蓝色线条表示的是在上述条件下直升机在舰船上方 20 m 处悬停时磁罗盘方位角误差,最

大误差约为 $\pm 8^\circ$; 红色线条表示的是在上述条件下直升机在舰船上方 40 m 处悬停时磁罗盘方位角误差, 最大误差约为 $\pm 1.6^\circ$; 绿色线条表示的是在上述条件下直升机在舰船上方 60 m 处悬停时磁罗盘方位角误差, 最大误差约为 $\pm 0.7^\circ$ 。

从以上分析可以得出: 舰载直升机在起降过程中, 位于舰船上方 60 m 及以上时, 其搭载的磁罗盘方位角精度受舰船磁干扰的影响将大幅降低, 舰船自身磁干扰对磁罗盘的影响可以忽略。

3.2 直升机飞越舰船时磁罗盘精度仿真分析

直升机执行相关任务时, 有时需要从舰船上方飞越, 为了便于分析, 这里仅按对方位角影响最大的飞越情况进行仿真分析。

假设舰船朝正东方向航行, 直升机以 200 km/h 的速度从船尾方向距离舰船中心 1 000 m 的位置分别以 20 m、40 m、60 m 的高度往正东方向飞行 2 000 m, 由于直升机飞行速度远大于舰船航行速度, 在此过程中, 可认为舰船处于静止状态。即直升机从船尾方向距离船中心 1 000 m 位置朝正东飞行, 飞到距离船头方向距离船中心 1 000 m 的位置。

当直升机以高于舰船 20 m 的飞行高度按上述条件飞越舰船时, 得到的方位角误差如图 6 中蓝色曲线所示, 从图中可以看出, 直升机飞到距离舰船中心 120 m 左右时, 磁罗盘方位角精度开始受到影响, 飞到舰船中心正上方时方位角误差最大, 约为 11° 。

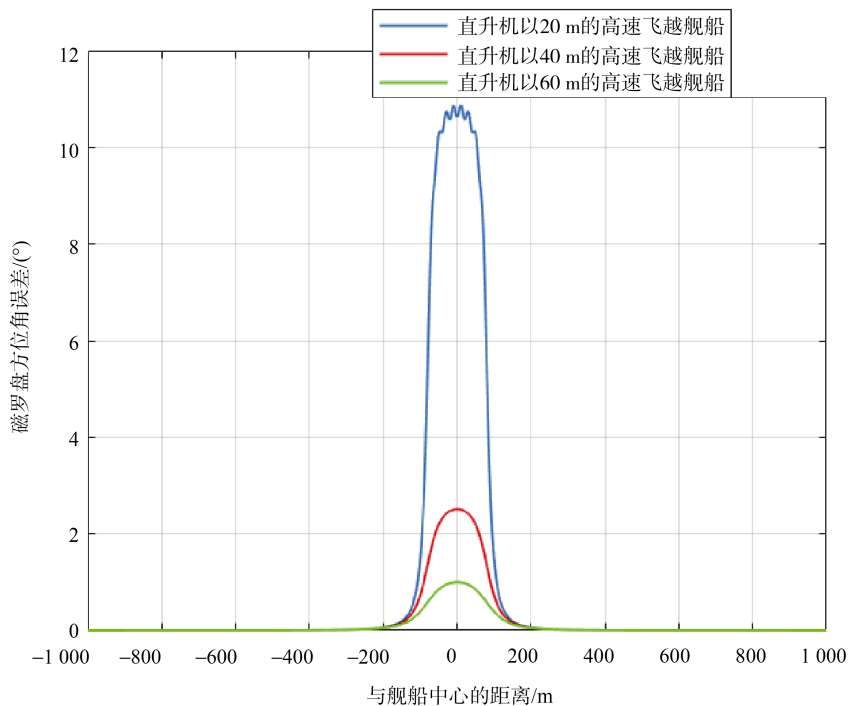


图 6 直升机以 20 m、40 m、60 m 的高度飞越舰船时磁罗盘方位角误差

Fig. 6 Magnetic compass azimuth error when helicopter flies over ships at altitudes of 20 m, 40 m and 60 m

当直升机以高于舰船 40 m 的飞行高度按上述条件飞越舰船时, 得到的方位角误差如图 6 中红色曲线所示。从图中可以看出, 直升机飞到距离舰船中心 110 m 左右时, 磁罗盘方位角精度开始受到影响, 飞到舰船中心正上方时方位角误差最大, 约为 2.5° 。

当直升机以高于舰船 60 m 的飞行高度按上述条件飞越舰船时, 得到的方位角误差如图 6 中

绿色曲线所示。从图中可以看出, 直升机飞到距离舰船中心 90 m 左右时, 磁罗盘方位角精度开始受到影响, 飞到舰船中心正上方时方位角误差最大, 约为 1° 。

4 结束语

通过对舰载直升机上磁罗盘原理、测量误差进

行分析,舰载直升机上的磁罗盘方位角精度在飞机起降以及飞越舰船时均会受到影响,主要影响因素包括:直升机飞行高度、舰船航向、直升机飞行航向、直升机与舰船之间的距离等。

从仿真分析的结果可以看出:直升机飞行高度在舰船上方 60 m 及以上时,磁罗盘方位角测量精度受舰船磁场的影响较小,可以忽略。因此,在舰载直升机起降以及飞越舰船时,如果飞行高度在舰船上方 60 m 及以上时,可以信赖磁罗盘给出的方位角数据;如果飞行高度在舰船上方 60 m 以下时,对磁罗盘给出的方位角数据仅供参考,还需要依赖其它手段获取更高精度的方位角数据。

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] 张艳艳. 一种应用于航空声呐浮标的磁罗盘设计[J]. 舰船科学技术, 2021, 43(21): 160-163.
- [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] 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.
- [6] 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.
- [7] 龙礼,张合,刘建敬. 姿态检测地磁传感器误差分析与补偿方法[J]. 中国惯性技术学报, 2013, 21(1): 80-83.
- [8] 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.
- [9] 唐劲飞,祁承超,王资. 无人机磁罗盘校准与航向解算实验系统设计与实现[J]. 空军预警学院学报, 2020, 34(5): 387-390.
- [10] 刘莹,蔡体菁,祝燕华. MIMU/GPS/磁罗盘组合导航系统算法研究[J]. 舰船电子工程, 2010, 30(4): 86-88.
- [11] 张琦,周冉辉,刘睿,等. 基于泊松方程的磁罗盘磁域自差修正[J]. 舰船电子工程, 2011, 31(9): 50-53.
- [12] 吕辰,张晓明,檀杰,等. 基于遗忘因子递推最小二乘的无人机在线磁补偿技术研究[J]. 传感技术学报, 2018, 31(2): 218-222.
- [13] 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.
- [14] 洪琪璐,张爱军,王昌明. 一种数字磁罗盘全罗差自主优化补偿方法[J]. 传感技术学报, 2017, 30(9): 1364-1368.

(责任编辑: 曹晓霖)