

双轴地磁传感器的参数标定与误差补偿*

张平安¹, 汪伟¹, 高敏², 王毅²

(1.陆军工程大学石家庄校区火炮工程系 石家庄,050003)

(2.陆军工程大学石家庄校区导弹工程系 石家庄,050003)

摘要 针对在双轴地磁传感器与卫星组合测量弹丸姿态的系统中双轴地磁传感器容易受外界误差因子干扰的问题,通过分析影响地磁传感器测量精度的误差因子,提出了一种参数标定和基于椭圆旋转的误差补偿算法。首先,假设双轴地磁传感器存在虚拟 x 轴,对传感器的误差因子进行建模,得到误差补偿模型;其次,对传感器双轴输出表达式中的参数进行标定;对双轴的测量值集合形成的椭圆进行旋转;最后,计算误差补偿模型中的6个参数。三轴无磁转台实验数据分析表明,该方法可以将双轴地磁传感器测量滚转角的误差精度控制在 $\pm 2^\circ$ 之间,基本满足了弹丸姿态测量的要求。

关键词 兵器科学与技术;双轴地磁传感器;参数标定;椭圆旋转;误差补偿

中图分类号 TH76

引言

地磁场是地球固有的基本物理场,地磁强度存在于近地空间的任一地点,随着经度、纬度及高度的不同,强度和方向会发生变化,但在相对短时间、小空间内,其差异不大。利用地磁场的这一特性,地磁传感器可以测量出地磁矢量在载体坐标系上的投影,从而得到载体的姿态,为导航控制提供技术支持^[1]。姿态测量技术是定位导航技术的关键部分,在地磁导航中,地磁传感器是姿态测量系统的核心,具有较高的可靠性和精度、较好的性能稳定性、无累积误差、制作体积较小、有效降低成本,承受高冲击和高过载的特点,广泛应用于制导控制、导航和磁测量等领域^[2-5]。由于地磁场是弱磁场,地磁传感器在测量过程中容易受到外部干扰磁场的影响。地磁传感器由薄膜合金制成,易产生变形,使姿态解算精度较低,地磁传感器的误差补偿算法研究一直是地磁制导的一个关键问题,文献[6-11]对此进行了研究。由于双轴地磁传感器不能单独直接测出当地的地磁强度,必须依靠其他测量元件进行辅助测量,因此不能用类似于三轴地磁传感器的误差补偿方法。

笔者基于双轴地磁传感器的输出特性,对三轴地磁传感器的误差补偿方法进行了改进,建立了误差补偿模型和参数标定算法,对双轴地磁传感器2

个敏感轴的测量值集合形成的椭圆进行了旋转,再计算误差补偿模型中的6个参数,能够有效提高地磁传感器测量滚转角的精度。

1 误差分析及建模

为了研究地磁传感器的误差,笔者引入3个坐标系,分别是北天东坐标系、地磁传感器坐标系和载体坐标系。北天东坐标系用NSE表示,载体坐标系用 $x_d y_d z_d$ 表示。由于双轴地磁传感器只有2个敏感轴,为了方便对误差模型的分析,引入一个虚拟 x 轴,虚拟 x 轴垂直于地磁传感器平面,地磁传感器坐标系用 xyz 表示。地磁传感器的安装方式是2个敏感轴分别与载体坐标系 y_d 轴和 z_d 轴重合。由于地磁传感器受制造材料和工艺的影响,本身存在制造误差,且环境和安装精度等因素对传感器精度有影响,无法规避产生误差。根据误差产生的原因可分为3类:①传感器本身受制造材料、制造工艺和制造环境等因素的影响,造成传感器灵敏度与标准值产生偏差,2个敏感轴在制造过程中不能达到完全地相互正交;②安装工艺误差,包括安装误差、灵敏度误差和放大电路增益值误差;③磁测量误差,包括硬磁误差和软磁误差。图1为安装误差模型。由于传感器安装时敏感轴不能与对应的载体坐标系的坐标轴完全平行,因此产生安装误差。

*国防基础加强计划资助项目

收稿日期:2020-12-28;修回日期:2021-12-27

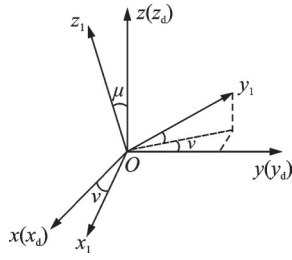


图1 安装误差模型

Fig.1 Installation error model

图1中,坐标系 $O-xyz$ 为传感器三轴的理想安装位置(与载体坐标系完全重合),坐标系 $O-x_1y_1z_1$ 为传感器三轴的实际安装位置, μ 和 ν 为安装误差角。 μ 为 x_1 轴与 Oxz 平面的夹角, x_1 轴在 Oxz 平面内的投影与 x 轴的夹角为 ν , z_1 轴在 Oxz 平面内并与 z 轴的夹角为 ν , y_1 轴垂直于 Ox_1z_1 平面并与 y 轴的夹角为 μ 。地磁矢量在坐标系 $O-x_1y_1z_1$ 三轴的分量为

$$\begin{bmatrix} B_{x1} \\ B_{y1} \\ B_{z1} \end{bmatrix} = C_a \begin{bmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \mu \cos \nu & \sin \mu & -\cos \mu \sin \nu \\ -\sin \mu \cos \nu & \cos \mu & \sin \mu \sin \nu \\ \sin \nu & 0 & \cos \nu \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中: B_x, B_y 和 B_z 为地磁传感器三轴测得的理想地磁强度; B_{x1}, B_{y1} 和 B_{z1} 为带有安装误差的地磁传感器三轴测得的地磁强度。

地磁传感器的三轴在设计上是正交的,然而在实际应用中,传感器的3个敏感轴不能达到严格正交,故产生非正交误差。非正交误差的数学模型为

$$\begin{bmatrix} B_{x2} \\ B_{y2} \\ B_{z2} \end{bmatrix} = C_f \begin{bmatrix} B_{x1} \\ B_{y1} \\ B_{z1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B_{x1} \\ B_{y1} \\ B_{z1} \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中: B_{x2}, B_{y2} 和 B_{z2} 为带有安装误差和非正交误差的地磁传感器三轴测得的地磁强度。

传感器敏感轴的灵敏度是传感器的固有属性,用来衡量输出量与输入量的关系。通常在测量电路设计中,传感器的敏感轴会串联一个放大电路,目的是增大输出电压的变化范围。灵敏度误差和放大电路增益值误差是由传感器各轴间的灵敏度不同和测量信号的电路特性不完全相同而引起的测量误差。由于分析计算误差时,无法将灵敏度误差和放大电路增益值误差区分,因此将灵敏度和放大电路增益值的乘积看成一个变量进行分析,设为变量 L ,表达式为 $L=S*K$ 。变量 L 的误差模型为

$$\begin{bmatrix} B_{x3} \\ B_{y3} \\ B_{z3} \end{bmatrix} = C_l \begin{bmatrix} B_{x2} \\ B_{y2} \\ B_{z2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_x & 0 & 0 \\ 0 & l_y & 0 \\ 0 & 0 & l_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B_{x2} \\ B_{y2} \\ B_{z2} \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中: B_{x3}, B_{y3} 和 B_{z3} 为存在安装误差、非正交误差和灵敏度误差的地磁传感器三轴测得的地磁强度; l_x, l_y, l_z 为地磁传感器三轴对应的灵敏度和放大电路增益值乘积的误差。

软磁误差的产生是由于地磁传感器感应外部磁场而导致自身产生磁场,从而影响地磁传感器的输出值。在地磁传感器标定实验中,采取固定地点静态标定,外部磁场大小和方向不发生变化,可以将软磁材料的响应看为呈线性变化,且没有滞后。假设软磁系数矩阵用 C_r 表示,其数学模型为

$$\begin{bmatrix} B_{x4} \\ B_{y4} \\ B_{z4} \end{bmatrix} = C_r \begin{bmatrix} B_{x3} \\ B_{y3} \\ B_{z3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B_{x3} \\ B_{y3} \\ B_{z3} \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中: B_{x4}, B_{y4} 和 B_{z4} 分别为地磁传感器三轴测得的带有安装误差、非正交误差、灵敏度及放大电路增益值乘积误差和软磁误差的实际地磁强度测量值。

与软磁误差不同的是,硬磁误差为恒定的,是环境中除去地磁场多余的磁场。数学模型为

$$\begin{bmatrix} B_{x5} \\ B_{y5} \\ B_{z5} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{x4} \\ B_{y4} \\ B_{z4} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} P_{x0} \\ P_{y0} \\ P_{z0} \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中: P_{x0}, P_{y0} 和 P_{z0} 为地磁传感器三轴的硬磁误差的补偿值; B_{x5}, B_{y5} 和 B_{z5} 分别为地磁传感器三轴测得的带有安装误差、非正交误差、灵敏度及放大电路增益值乘积误差、软磁误差和硬磁误差的实际地磁强度测量值。

由于 C_r, C_f, C_l 和 C_a 分别为软磁误差系数矩阵、灵敏度和放大电路增益值乘积误差系数矩阵、非正交误差矩阵和安装误差矩阵。由于 C_r, C_f, C_l 和 C_a 为 3×3 矩阵,其乘积必然为 3×3 矩阵,将式(1)~(4)代入式(5),得到误差模型为

$$\begin{bmatrix} B_{x5} \\ B_{y5} \\ B_{z5} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} P_{x0} \\ P_{y0} \\ P_{z0} \end{bmatrix} \quad (6)$$

双轴地磁传感器的误差模型为

$$\begin{bmatrix} B_{y6} \\ B_{z6} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{22} & a_{23} \\ a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B_y \\ B_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} P_{y0} \\ P_{z0} \end{bmatrix} \quad (7)$$

其中: B_{y6} 和 B_{z6} 分别为双轴地磁传感器测得的带有安装误差、非正交误差、灵敏度及放大电路增益值乘积误差、软磁误差和硬磁误差的实际地磁强度测量值; B_y 和 B_z 为传感器测得的理想值。

2 传感器输出参数标定

地磁传感器的直接输出量为电压值,无法直接给出地磁导航中需要的角度信息,进行转换的数学

模型为

$$\begin{cases} V_y = S_y K_y B \cos \theta_{By} + V_{y90^\circ} \\ V_z = S_z K_z B \cos \theta_{Bz} + V_{z90^\circ} \end{cases} \quad (8)$$

其中: V_y 和 V_z 为地磁传感器 y 轴和 z 轴的直接输出电压值; V_{y90° 和 V_{z90° 为当地磁传感器处于无磁环境时, 传感器双轴的输出电压值; S_y 和 S_z 为地磁传感器的灵敏度; K_y 和 K_z 为地磁传感器双轴对应的放大电路的增益值; B 为地磁场强度; θ_{By} 和 θ_{Bz} 为地磁传感器双轴与地磁矢量的夹角。

为了方便观察传感器输出值的变化, 通常在地磁传感器测量系统电路设计中, 地磁传感器的双轴分别与各自对应的放大电路串联联结。

已知三轴地磁传感器三轴上的地磁分量平方和等于当地地磁强度的平方, 则双轴地磁传感器的敏感轴测得地磁强度满足

$$\left(\frac{V_y - V_{y90^\circ}}{L_y}\right)^2 + \left(\frac{V_z - V_{z90^\circ}}{L_z}\right)^2 = B^2 - B_x^2 \quad (9)$$

其中: V_y 和 V_z 分别为传感器双轴的输出电压; V_{y90° 和 V_{z90° 分别为地磁传感器双轴与地磁矢量垂直或者是处于无磁环境时的输出电压值; L_y 和 L_z 分别为地磁传感器双轴的灵敏度和放大电路增益值的乘积; B_x 为虚拟 x 轴上测得的地磁分量, 虚拟 x 轴为无误差轴, 即 B_x 与理论值相等。

载体在飞行过程中的任何姿态都可以由初始姿态转换而来, 图 2 为坐标系转换示意图。

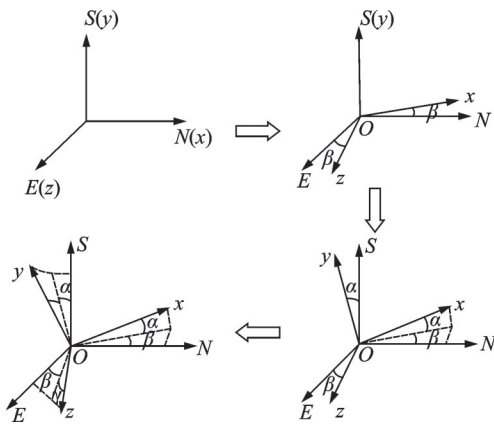


图 2 坐标系转换示意图

Fig.2 Schematic diagram of coordinate system transformation

图 2 中, α , β 和 γ 分别为载体飞行过程中的俯仰角, 偏航角和滚转角(俯仰角在水平面的上方为正, 偏航角以北向偏西为正, 滚转角以绕着 x 轴右螺旋为正), 分别绕载体坐标系的 z 轴, y 轴和 x 轴旋转得到。在地磁传感器与卫星组合测量弹丸姿态系统中, 将弹道倾角与弹道偏角近似为俯仰角和偏航角, 利用卫星进行测量。载体坐标系中 x 轴测得的地磁

分量用数学模型表示为

$$B_x = B_N \cos \alpha \cos \beta + B_S \sin \alpha - B_E \cos \alpha \sin \beta \quad (10)$$

其中: B_N , B_S 和 B_E 分别为北天东坐标系三轴上的地磁分量。

地磁矢量在北天东坐标系上的位置关系可以由磁倾角和磁偏角表示。磁倾角 I 和磁偏角 D 可通过测量实验地点的经度、纬度和海拔高度, 代入国际地磁学和高空物理协会给出的最新国际地磁参考场计算得到。

$$\begin{cases} B_N = B \cos D \cos I \\ B_S = B \sin I \\ B_E = -B \sin D \cos I \end{cases} \quad (11)$$

式(10)可改写为

$$B_x = B \cos I \cos \alpha \cos(D - \beta) + B \sin I \sin \alpha \quad (12)$$

由式(9)可看出, 当地磁传感器绕着 x 轴旋转一圈, 双轴地磁传感器的 2 个输出电压构成一个椭圆, 通过图形拟合求解得到敏感轴的零位漂移值和变量 L 。

3 误差补偿参数计算

通过文献[12-13]和实验数据分析, 在外界误差因子的干扰下, 地磁传感器 y 轴与 z 轴测量的地磁分量值的集合形成了一个圆心偏离原点的椭圆。因此在进行误差补偿参数计算之前, 需要将椭圆进行旋转放正。图 3 为椭圆旋转示意图, 椭圆圆心旋转角 ϕ 使椭圆长轴由原来的 R' 转到 R 位置。此时, 椭圆长轴为

$$R = R' = \max(\sqrt{B_{wy}^2(i) + B_{wz}^2(i)}) \quad (13)$$

当长短轴取最大值时, 得到对应的 $B_{wy}(i)$, $B_{wz}(i)$, $B_{wy}(i)$, $B_{wz}(i)$ 分别为椭圆上各点对应的坐标值。 ϕ 的计算式为

$$\begin{cases} \sin \phi = |B_{wz}(i)|/R' \\ \cos \phi = |B_{wy}(i)|/R' \end{cases} \quad (14)$$

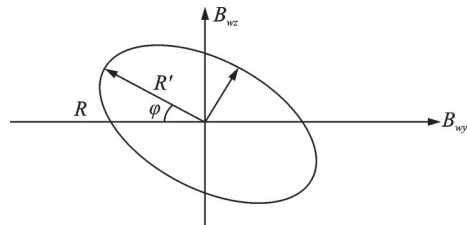


图 3 椭圆旋转示意图

Fig.3 Schematic diagram of ellipse rotation

参考坐标旋转理论, 将平面内的矢量 R' 转到处于同一平面的 R 位置, 数学模型为

$$\begin{bmatrix} B_{ry} \\ B_{rz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \phi & -\sin \phi \\ \sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B_{wy} \\ B_{wz} \end{bmatrix} \quad (15)$$

其中： B_{ry} 和 B_{rz} 为旋转后椭圆上各点的坐标值。

椭圆旋转后,由式(7)计算误差补偿参数

$$\begin{bmatrix} a_{22}^i \\ a_{23}^i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{yd}^{i+1} - B_{yd}^i & B_{yd}^{i+1} - B_{yd}^i \\ B_{yd}^{i+2} - B_{yd}^i & B_{yd}^{i+2} - B_{yd}^i \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} B_{hy}^{i+1} - B_{hy}^i \\ B_{hy}^{i+2} - B_{hy}^i \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$\begin{bmatrix} a_{32}^i \\ a_{33}^i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{zd}^{i+1} - B_{zd}^i & B_{zd}^{i+1} - B_{zd}^i \\ B_{zd}^{i+2} - B_{zd}^i & B_{zd}^{i+2} - B_{zd}^i \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} B_{hz}^{i+1} - B_{hz}^i \\ B_{hz}^{i+2} - B_{hz}^i \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$\begin{cases} P_{y0}^i = B_{hy}^i - a_{22}^i B_{yd}^i - a_{23}^i B_{zd}^i \\ P_{z0}^i = B_{hz}^i - a_{32}^i B_{yd}^i - a_{33}^i B_{zd}^i \end{cases} \quad (18)$$

其中： B_{yd}^i 和 B_{zd}^i 分别为第*i*个测量姿态对应的标准地磁分量值； B_{hy}^i 和 B_{hz}^i 分别为第*i*个测量姿态对应的地磁传感器测量得到的地磁分量值。

多次计算取平均值,得到 $a_{22}, a_{23}, a_{32}, a_{33}$ 以及 P_{y0}, P_{z0} ,由此误差补偿模型中的6个参数全部可以计算得到。

4 实验验证与数据分析

为了验证补偿算法的有效性,设计制作了一个三轴无磁实验转台和和一张可以调节高度的铝制桌,将转台放置于该桌上,并调节桌腿高度直至桌面水平,将双轴地磁传感器安装固定在转台上,图4为三轴无磁转台。选择成都的某一地点,通过经纬仪测量当地经度、纬度和高度,利用基于国际地磁学和高空物理协会给出的最新国际地磁参考场,得到如表1所示的实验地点地磁参数。

安装完成后,确定磁北方向,按照以下步骤进行数据采集:①俯仰角为 0° ,俯仰角以 5° 步长由 0° 到 360° 变化,每一个偏航角刻度,让转台滚转数圈,记录地磁传感器双轴输出电压最大值和最小值的平均值;②俯仰角为 20° ,俯仰角以 5° 步长由 0° 到 360° 变



图4 三轴无磁转台

Fig.4 Three axis non-magnetic turntable

表1 地磁参数

Tab.1 Geomagnetic parameters

磁倾角/ $^\circ$	磁偏角/ $^\circ$	磁场强度/nT
-48.17	2.32	50 986.1

化,每一个偏航角刻度,让转台滚转数圈,记录地磁传感器双轴输出电压的最大值和最小值的平均值;③俯仰角为 30° ,偏航角为 45° ,滚转角以 5° 步长由 0° 到 360° 变化,每一个滚转角刻度,记录地磁传感器双轴输出电压;④俯仰角为 30° ,偏航角为 -45° ,滚转角以 5° 步长由 0° 到 360° 变化,每一个滚转角刻度,记录地磁传感器双轴输出电压。

通过实验数据计算得到标定参数和误差补偿矩阵参数为

$$\begin{cases} L_y = 0.0091 \\ L_z = 0.0106 \end{cases}; \begin{cases} V_{y90} = 1884.4 \\ V_{z90} = 2235 \end{cases}; \begin{cases} P_{y0} \\ P_{z0} \end{cases} = \begin{bmatrix} 844.9206 \\ 378.1245 \end{bmatrix};$$

$$\begin{bmatrix} a_{22} & a_{23} \\ a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.8035 & 0.5555 \\ 0.4440 & 0.6602 \end{bmatrix}.$$

偏航角为 45° 和 -45° 的椭圆旋转前后对比如图5,6所示。图7和图8分别为经过椭圆旋转和误差补偿后,偏航角为 45° 和 -45° 的滚转角误差变化。通过分析误差变化曲线可知,滚转角误差在 $\pm 2^\circ$ 之间。

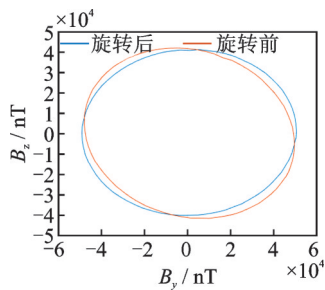


图5 偏航角为 45° 的椭圆旋转前后对比
Fig.5 Comparison before and after ellipse rotation with yaw angle of 45°

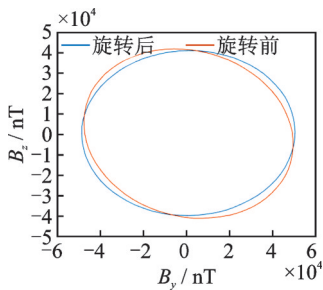


图6 偏航角为 -45° 的椭圆旋转前后对比
Fig.6 Comparison before and after ellipse rotation with yaw angle of -45°

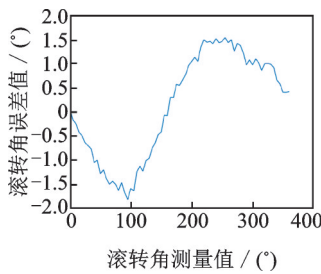


图7 经过补偿后偏航角为 45° 的滚转角误差变化
Fig.7 Variation of roll angle error with yaw angle of 45° after compensation

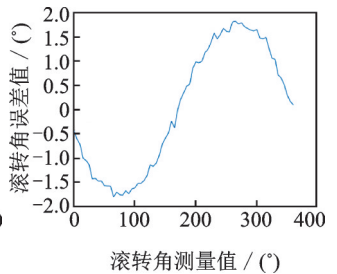


图8 经过补偿后偏航角为 -45° 的滚转角误差变化
Fig.8 Variation of roll angle error with yaw angle of -45° after compensation

5 结束语

笔者利用双轴地磁传感器测量弹丸飞行滚转角,通过分析地磁传感器在测量过程中的误差因子,建立了误差补偿数学模型。通过查阅文献和分析实验数据,发现双轴地磁传感器受外部磁场干扰,地磁传感器 y 轴和 z 轴测量值的集合会形成一个斜椭圆。因此,需要先对椭圆进行旋转放正,再计算误差补偿参数。实验表明,经过椭圆旋转和误差补偿之后的滚转角误差能够控制在 $\pm 2^\circ$ 之间,基本满足了弹丸姿态测量的要求。笔者提出的误差补偿方法可以适用于室外空间,减少了实验室的使用,从而可减少双轴地磁传感器标定和误差补偿过程的投入成本,具有较大的工程实用价值。

参 考 文 献

- [1] FINLAY C C, MAUS S, BEGGAN C D, et al. International geomagnetic reference field: the eleventh generation [J]. *Geophysical Journal International*, 2010, 183(3): 1216-1230.
- [2] DENG Z H, WANG J W, LIANG X Y, et al. A coupling method of geomagnetic aided inertial attitude errors [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2020, 20(23): 14282-14289.
- [3] PAPAFOOTIS K, SOTIRIADIS P P. A fast and accurate accelerometer and magnetometer alignment algorithm [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2020, 20(24): 15061-15067.
- [4] GRANDVALLET B, ZEMOUCHE A, BOUTAYEB M, et al. Real-time attitude-independent three-axis magnetometer calibration for spinning projectiles: a sliding window approach [J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2014, 22(1): 255-264.
- [5] PANG H F, PAN M C, WAN C B, et al. Integrated compensation of magnetometer array magnetic distortion field and improvement of magnetic object localization [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, 52(9): 5670-5676.
- [6] 钟浩, 章卫国, 刘小雄. 基于模值估计的三轴磁力计标定方法研究 [J]. *传感技术学报*, 2017, 10: 1512-1517.
- ZHONG Hao, ZHANG Weiguo, LIU Xiaoxiong. Research on calibration method of triaxial magnetometer based on modulus estimation [J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2017, 10: 1512-1517. (in Chinese)
- [7] 龙礼, 张合. 三轴地磁传感器误差的自适应校正方法 [J]. *仪器仪表学报*, 2013, 34(1): 161-165.
- LONG Li, ZHANG He. Adaptive correction method for error of three axis geomagnetic sensor [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2013, 34(1): 161-165. (in Chinese)
- [8] 龙达峰, 刘俊, 李杰, 等. 地磁传感器误差参数估计与补偿方法 [J]. *传感技术学报*, 2014(12): 1649-1653.
- LONG Dafeng, LIU Jun, LI Jie, et al. Error parameter estimation and compensation method of geomagnetic sensor [J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2014(12): 1649-1653. (in Chinese)
- [9] ZHOU Y, ZHANG X, XIAO W. Calibration and compensation method of three-axis geomagnetic sensor based on pre-processing total least square iteration [J]. *Journal of Instrumentation*, 2018, 13: T04006.
- [10] CRASSIDIS J L, LAI K L, HARMAN R R. Real-time attitude-independent three-axis magnetometer calibration [J]. *Journal of Guidance Control and Dynamics*, 2012, 28(1): 115-120.
- [11] VASCONCELOS J F, ELKAIM G, SILVESTRE C, et al. Geometric approach to strapdown magnetometer calibration in sensor frame [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2011, 47(2): 1293-1306.
- [12] 鲍宏平, 朱小东, 朱建良, 等. 基于椭圆旋转的磁传感器误差补偿算法 [J]. *计算机工程*, 2014, 40(4): 301-304.
- BAO Hongping, ZHU Xiaodong, ZHU Jianliang, et al. Magnetic sensor error compensation algorithm based on ellipse rotation [J]. *Computer Engineering*, 2014, 40(4): 301-304. (in Chinese)
- [13] 史连艳, 宋文渊, 王红云. 基于旋转因子的磁传感器误差补偿改进椭圆法 [J]. *探测与控制学报*, 2010, 32(2): 5-8.
- SHI Lianyan, SONG Wenyuan, WANG Hongyun. Improved ellipse method for error compensation of magnetoresistive sensors based on rotation factors [J]. *Journal of Detection & Control*, 2010, 32(2): 5-8. (in Chinese)



第一作者简介:张平安,男,1997年9月生,硕士生。主要研究方向为兵器性能测试与故障诊断。

E-mail: 1213782904@qq.com