

弹载磁测系统等效安装误差的在线标定与补偿

张莺莺¹, 张晓明^{1,2}, 高丽珍^{1,2}, 薛羽阳¹, 刘俊^{1,2}

(1. 中北大学 电子测试技术国家重点实验室, 太原 030051;

2. 中北大学 仪器科学与动态测试教育部重点实验室, 太原 030051)

摘要: 针对旋转弹用磁测系统在飞行过程中, 存在由机械安装误差以及固定磁干扰带来的测量系下三轴磁矢量与弹体系不平行问题, 提出一种磁测系统与弹体之间等效安装误差角的在线标定补偿法; 通过分析磁测系统实时输出的三轴地磁矢量信息, 建立测量信息与误差的误差模型, 利用类正弦信号特征值求取误差角, 进而补偿磁测信息中的误差项, 最终提高磁测系统解算输出的滚转角精度; 实验结果表明, 当弹体仅做滚转运动时, 经过该方法补偿后磁测系统解算的滚转角比补偿前解算的滚转角精度可提高 6 倍以上, 滚转角解算误差保持在 2° 以内, 可以满足制导弹药对滚转角的精度需求。

关键词: 地磁测姿系统; 等效安装误差角; 在线标定补偿; 滚转角解算

On-line Calibration and Compensation of Equivalent Installation Error of Magnetic Measurement System on Missile

ZHANG Yingying¹, ZHANG Xiaoming^{1,2}, GAO Lizhen^{1,2}, XUE Yuyang¹, LIU Jun^{1,2}

(1. State Key Laboratory for Electronic Measurement Technology, North University of China,

Taiyuan 030051, China;

2. Ministerial Key Laboratory of Instrumentation Science & Dynamic Measurement,

North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: In order to solve the problem that the magnetic vector of three axes under the measuring system is not parallel to the missile system caused by the mechanical installation error and fixed magnetic interference during the flight of the magnetic measuring system for rotating missile, an online calibration and compensation method for the equivalent installation error angle between the magnetic measuring system and the missile body was proposed. The error model of measurement information and error is established by analyzing the real-time output of the magnetic survey system's triaxial geomagnetic vector information, and the error angle is obtained by using the characteristic value of sinusoid-like signal, and then the error term in the magnetic survey information is compensated, and the accuracy of the output roll angle of the magnetic survey system is finally improved. The experimental results show that when the projectile body only rolls, the accuracy of roll angle calculated by the magnetic measuring system after compensation is more than 6 times higher than that before compensation, and the error of roll angle calculation is kept within 2°, which can meet the precision requirement of guided ammunition for roll angle.

Keywords: geomagnetic attitude measurement system; equivalent installation error angle; on-line calibration compensation; calculation of roll angle

0 引言

随着现代战争向智能化、信息化方向的转变, 常规弹药已经难以满足作战的要求。弹丸需要的不仅仅是足够的射程, 而且需要更精准、更可控的远程攻击。因此, 弹丸的制导化、信息化改造是常规弹药发展的必然趋势, 也是当今世界精确制导武器发展的重要方向。弹丸制导首先要得到弹丸准确的偏航、俯仰、滚转姿态信息, 尤其对于旋转弹而言, 由于弹体自旋不仅影响控制系统对尾翼的控

制, 同时也会带来俯仰、偏航的相互耦合。因此旋转弹药的制导化改造中, 弹体滚转角参数的实时准确获取是弹药实现精确制导控制的前提条件。

在旋转弹姿态获取时常用的测姿系统有惯导测姿系统、地磁测姿系统^[1]以及太阳敏感测姿系统。对于飞行过程高旋、发射条件高过载的旋转弹, MEMS 惯导技术存在高过载性能退化、误差随时间累计的技术瓶颈以及初始对准的问题; 太阳敏感测姿存在受天气气候影响较大的问题。另

收稿日期: 2021-01-14; 修回日期: 2021-02-08。

基金项目: 国家自然科学基金(61873247); 山西省研究生教育创新项目(2020SY379)。

作者简介: 张莺莺(1995-), 女, 山西运城人, 硕士研究生, 主要从事动态测试及组合导航方向的研究。

引用格式: 张莺莺, 张晓明, 高丽珍, 等. 弹载磁测系统等效安装误差的在线标定与补偿[J]. 计算机测量与控制, 2021, 29(8): 158-162.

外还有卫星导航系统, 它可以直接用于弹体导航, 但是在高动态运动环境中需要经历较长时间的卫星信号捕获、跟踪, 才能输出导航数据, 且无法提供弹体的实时姿态角。因此旋转弹的制导化改造多利用地磁测姿系统进行弹丸姿态获取。通过弹载地磁传感器测量的地磁场矢量信息, 实时解算出弹体的姿态滚转角。地磁测姿系统是建立在准确获取弹体任意时刻所处位置的地磁场矢量来确定弹丸的姿态信息的^[2], 具有测量误差累积、抗过载能力强、体积小、低成本等优势, 已成为弹载导航测姿的主要测量方案之一^[3]。但是地磁测姿系统也存在一些问题, 在弹载磁测系统姿态解算过程中, 滚转角实时解算精度受到磁传感器测量精度、磁传感器机械安装误差^[4-5]以及弹体干扰磁场^[6]因素的影响, 其中磁传感器精度可通过事先标定进行补偿。而由于弹载磁矢量传感器芯片体积小, 在硬件电路焊接中难于保证其敏感轴的方向, 并且磁测系统与弹体轴间存在一定的装配误差, 主要为机械安装误差角。另外在飞行过程中, 弹体干扰磁场会随弹体在外弹道飞行中的工作状态变化, 造成地磁信息的实际测量矢量与弹体坐标系不对准, 表现为地磁信息不对准误差角。因此磁矢量传感器敏感轴与弹体坐标轴间存在磁场测量信息的机械安装误差和地磁信息不对准误差角, 严重影响地磁测量滚转角的精度。度级的安装误差可导致滚转角解算十几度甚至几十度的测量误差。

在传统的安装误差标定方法中, 主要有基于高精度无磁转台的多位置标定法^[7-8]和基于三维椭球拟合的无基准标定法^[9-12]。但这两种方法中主要标定磁场矢量测量单元与壳体的机械安装误差。该类方法整弹标定困难且均为事先标定, 无法解决磁测信息的敏感轴和弹体坐标系轴不平行的弹载安装误差问题。方旭、王良明^[13-14]等人分别提出了通过弹体特定的摆放位置来标定安装误差角的方法。该类方式操作简单, 解决了整弹标定的问题, 但同样仅适用于弹体发射前的机械安装误差标定, 无法解决标定弹体飞行过程中由弹体干扰磁场引起的地磁信息不对准问题。另外由朱兴乐提出的通过放置另一标准磁传感器来矫正的方法^[15], 对于小型的、体积要求严格的制导弹药而言并不适用。因此, 需要一种可实时在线标定补偿地磁传感器等效安装误差的方法。

本文通过建立旋转弹体外弹道飞行中, 地磁测量信息与弹体坐标系的等效误差角模型, 提出一种基于类正弦信号特征的实时在线补偿磁测系统与弹体之间等效安装误差角的方法, 以解决由磁测系统的敏感轴与弹体坐标系不平行带来的磁测系统测量弹体坐标系磁场信息不准确的问题。

1 旋转弹载环境地磁测量等效误差角模型

地磁测姿系统的解算弹体姿态角, 其主要就是通过磁传感器测得弹体在任意时刻任意位置的三轴地磁场矢量信息, 为测量系或弹体系下的地磁场矢量。当不存在误差时,

弹体系与测量系重合。因此需要设立对应坐标系。

首先设定弹轴坐标系(后简称为 f 系)为‘前一右一下’坐标系, 即 X_f 轴指向弹轴方向, Y_f 轴在弹丸质心横截面内指向右, Z_f 轴与 X_f 、 Y_f 轴构成右手坐标系。 f 系的地磁场三分量表示为 $[H_x^f H_y^f H_z^f]^T$, 将 f 系绕 X 轴旋转后可得到弹体坐标系。弹体坐标系简称 b 系, 该坐标系与弹体固定, 随弹丸的运动而转动, 而 f 系不随发射过程运动而运动, 其与 b 系仅相差一个滚转角。当滚转角为 0 时, f 系与 b 系重合。 b 系的三分量表示为 $[H_x^b H_y^b H_z^b]^T$ 。另外还有磁测系统测量三轴磁场信息的测量系 m 系, 用来表示磁传感器实际测得的三轴地磁场矢量。当三轴磁传感器与弹体之间存在机械安装误差或者有弹体固定干扰磁场导致磁传感器测量的三轴磁场信息与弹体坐标系不平行, 存在等效安装误差角时, 弹轴坐标系 f 、弹体坐标系 b 以及测量系 m 之间的转换关系如图 1 所示。

图 1 中弹体系 b 系到测量系 m 系中间存在安装误差角 α , 其旋转顺序按照“偏航—俯仰—滚转”的顺序旋转, 即弹体系先绕 Z 轴转动偏航误差角 α_z 到 m_1 , 再绕 Y 轴转动俯仰误差角 α_y 到 m_2 , 最后绕 X 轴转动滚转误差角 α_x 到 m_3 , 转动结果如图 1 所示。

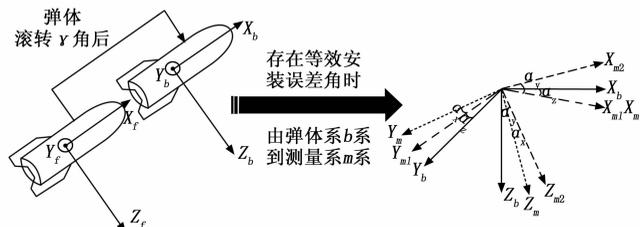


图 1 坐标系转换

H^b 和 H^f 之间可由发射坐标系到弹体坐标系的转换矩阵关联。

$$H^b = C_f^b H^f \quad (1)$$

b 系是由 f 系转动滚转角 γ 得到, 根据“前一右一下”的坐标系旋转规律, 可得到转换矩阵如下:

$$C_f^b = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\gamma & \sin\gamma \\ 0 & -\sin\gamma & \cos\gamma \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中: $\gamma = \omega t$, 则:

$$H^b = C_f^b H^f = \begin{bmatrix} H_x^f \\ A \sin(\omega t + \varphi) \\ A \cos(\omega t + \varphi) \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中:

$$A = \sqrt{(H_y^f)^2 + (H_z^f)^2}, \varphi = \arctan\left(\frac{H_y^f}{H_z^f}\right) \quad (4)$$

在飞行过程中受固定干扰磁场影响导致的磁测信息不对准误差, 等效于磁传感器和弹体间存在安装误差角, 因此设三轴地磁传感器的等效安装误差角为:

$$\alpha = [\alpha_x \quad \alpha_y \quad \alpha_z]^T \quad (5)$$

当按照“偏航—俯仰—滚转”的旋转顺序得到测量系下三分量时，由于等效安装误差角均为小角度，所以根据坐标系旋转关系简化后可得其对应的等效安装误差阵为：

$$\mathbf{M}_{\text{install}} = \begin{bmatrix} 1 & \alpha_z & -\alpha_y \\ -\alpha_z & 1 & \alpha_x \\ \alpha_y & -\alpha_x & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

即当存在等效安装误差时，最终测量的三轴矢量信息为包含误差信息的：

$$\mathbf{H}^m = \mathbf{M}_{\text{install}} \mathbf{H}^b \quad (7)$$

将式 (3) 代入式 (7) 中可得磁测系统测量的包含误差项的弹体系三轴磁场矢量如式 (8)：

$$\begin{aligned} \mathbf{H}_x^m &= \mathbf{H}_x^f + \alpha_z A \sin(\omega t + \varphi) - \alpha_y A \cos(\omega t + \varphi) \\ \mathbf{H}_y^m &= -\alpha_z \mathbf{H}_x^f + A \sin(\omega t + \varphi) + \alpha_x A \cos(\omega t + \varphi) \\ \mathbf{H}_z^m &= \alpha_y \mathbf{H}_x^f - \alpha_x A \sin(\omega t + \varphi) + A \cos(\omega t + \varphi) \end{aligned} \quad (8)$$

将式 (8) 化简可得式 (9)：

$$\begin{aligned} \mathbf{H}_x^m &= \mathbf{H}_x^f + A \sqrt{(\alpha_y)^2 + (\alpha_z)^2} \sin(\omega t + \varphi - \theta_1) \\ \mathbf{H}_y^m &= -\alpha_x \mathbf{H}_x^f + A \sqrt{1 + (\alpha_x)^2} \sin(\omega t + \varphi + \theta_2) \\ \mathbf{H}_z^m &= \alpha_y \mathbf{H}_x^f + A \sqrt{1 + (\alpha_x)^2} \cos(\omega t + \varphi + \theta_2) \end{aligned} \quad (9)$$

其中：

$$\theta_1 = \arctan\left(\frac{\alpha_y}{\alpha_z}\right), \theta_2 = \arctan(\alpha_x) \quad (10)$$

由式 (9) 可得，当磁测系统测量的磁矢量信息与弹体系坐标系不平时，机械安装误差角和干扰磁场带来的类安装误差角 α ，使得测量系下 X、Y、Z 三轴磁矢量信息分别出现类正弦波动和零偏。

根据式 (9) 将 X、Y、Z 轴磁矢量信息表达为：

$$\begin{aligned} \mathbf{H}_x^m &= \mathbf{H}_{x0}^m + B1 \sin(\omega t + \varphi - \theta_1) \\ \mathbf{H}_y^m &= \mathbf{H}_{y0}^m + B \sin(\omega t + \varphi + \theta_2) \\ \mathbf{H}_z^m &= \mathbf{H}_{z0}^m + B \cos(\omega t + \varphi + \theta_2) \end{aligned} \quad (11)$$

其中： \mathbf{H}_{x0}^m 、 \mathbf{H}_{y0}^m 、 \mathbf{H}_{z0}^m 分别为 Y、Z 轴的直流分量， $\mathbf{H}_{x0}^m = \mathbf{H}_x^f$ ；B1 为 X 轴交流分量的幅值，B 为 Y、Z 轴交流分量的幅值。则由式 (9) 和式 (11) 可得：

$$\begin{aligned} \alpha_z &= -\mathbf{H}_{y0}^m / \mathbf{H}_x^f \\ \alpha_y &= \mathbf{H}_{z0}^m / \mathbf{H}_x^f \end{aligned} \quad (12)$$

当 Y 轴磁场值出现峰值时，此时根据 X 轴测得的磁场值可得出：

$$\omega t + \varphi - \theta_1 = \arcsin((\mathbf{H}_x^m - \mathbf{H}_{x0}^m) / B1) \quad (13)$$

即：

$$\omega t + \varphi = \arcsin((\mathbf{H}_x^m - \mathbf{H}_x^f) / B1) + \theta_1 \quad (14)$$

由于当 Y 轴磁场到达峰值时 $\omega t + \varphi + \theta_2 = \frac{\pi}{2}$ 。根据式 (14) 可得出 $(\omega t + \varphi)$ ，所以有：

$$\begin{aligned} \theta_2 &= \frac{\pi}{2} - (\omega t + \varphi) \\ \alpha_x &= \tan \theta_2 \end{aligned} \quad (15)$$

2 误差补偿模型建立

根据以上分析可知，当磁矢量传感器与弹体系之

间存在等效安装误差角时，通过分析测量系下的三轴地磁矢量信息就可得到误差角。

首先 \mathbf{H}^f 为弹轴坐标系下三分量，在旋转弹中即初始三分量，为初始已知量。根据测量系下测得的三轴磁场峰谷值，得到三轴磁场的直流分量以及交流分量幅值，由 Y、Z 轴的直流分量根据式 (12) 可求得 α_y 和 α_z 。之后再根据 X 轴磁场信息，利用式 (10)、(14)、(15) 即可求出 α_x ，从而得到等效安装误差角 $\alpha = [\alpha_x \ \alpha_y \ \alpha_z]^T$ 。

最后根据式 (6) 得到等效误差阵 $\mathbf{M}_{\text{install}}$ 。将后续测量系下的磁场值按照如式 (15) 进行误差补偿，可得到准确的弹体系下地磁场三分量 \mathbf{H}^b 。之后再利用标准弹体系磁场矢量 \mathbf{H}^b 进行滚转角解算，即可得的弹体准确的滚转角，为旋转弹控制系统提供更准确的姿态滚转角。

$$\mathbf{H}^b = [\mathbf{H}_x^b \ \mathbf{H}_y^b \ \mathbf{H}_z^b]^T = \mathbf{M}_{\text{install}}^{-1} \mathbf{H}^m \quad (15)$$

3 实验验证

3.1 仿真验证

为验证模型的准确性，仿真生成一组弹体系测量系下三轴磁矢量传感器测得的磁场值，即带有安装误差的磁场测量值。其中设置弹体运动的滚转角速率为 5 r/s，系统采样频率为 1 kHz，时间为 5 s。同时设置弹轴坐标系下初始三分量 \mathbf{H}^f 为 $[81234019712462] \text{ nT}$ ，加入的安装误差角为 $\alpha = [5.4, -4.53, -6.11]^\circ$ ，仿真生成测量系下三分量后加入适当的测量噪声。得到磁场值如图 3 中 X、Y、Z 所示。之后根据上述等效安装误差模型进行误差角的解算及补偿得到误差补偿后的弹体系下磁场值：X1、Y1、Z1 如图 2 所示。

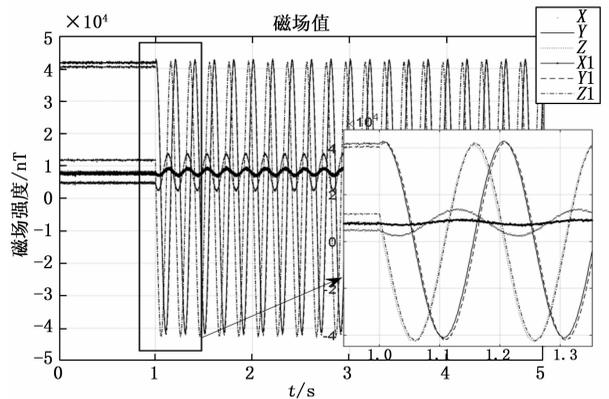


图 2 三轴磁场值

由图 2 的 X、Y、Z 可以看出当存在安装误差时，测得的弹体系三轴磁场存在零点偏移和波动幅值的变化。利用上述模型的方法补偿后，X 轴波动幅值明显减小，Y、Z 轴的零偏和波动赋值也进行了补偿。利用补偿前后的磁场值进行滚转角解算，与初始设置滚转角相比，得到补偿前后的滚转角解算误差如图 3 所示。

由图 3 可以看出等效安装误差补偿前，滚转角的解算误差最大值为 8.64° ，误差峰峰值为 13.94° 。可以看出 5° 左

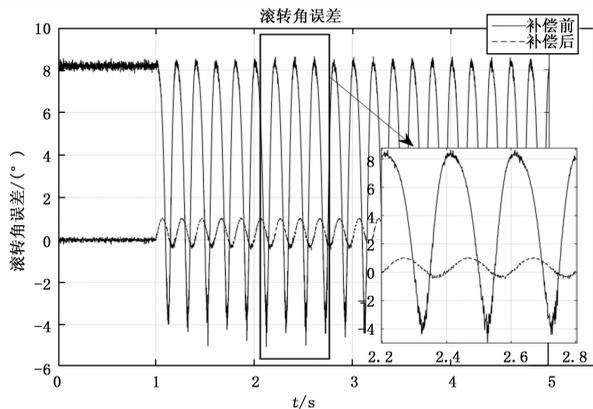


图 3 补偿前后的滚转角误差

右的安装误差角对磁测系统滚转角解算精度影响在 8° 。通过分析三轴磁场信息, 标定补偿等效安装误差角后解算的滚转角误差最大值为 1.04° , 误差峰峰值为 1.41° 。精度提高了 $8\sim 10$ 倍。满足旋转弹药制的导控制系统对滚转角精度的需求, 同时验证了模型的准确性。

3.2 试验验证

模型验证后, 进一步进行物理试验验证。本实验采用霍尼韦尔公司生产的 HMC1053 芯片作为磁敏感单元, ST 公司生产的 stm32f405rgt6 为处理单元。根据上述模型的计算方式将等效安装误差角的在线标定补偿方法移植到上位机中。

由模型可知, 该误差角在线标定补偿方法需要磁测单元至少滚转一周, 得出三轴磁场峰峰值, 进而得出交流、直流量, 之后才能计算出误差角。因此, 在线标定过程中, 第一圈的滚转角误差与未补偿前解算的滚转角误差相同。将系统安装在高精度三轴飞行仿真转台上进行在线误差角标定补偿验证。

在高精度飞行仿真转台上, 以转台反馈的滚转角为标准; 地磁测姿系统解算输出的滚转角为在线标定补偿后的滚转角; 系统输出的原始电压值解算的滚转角为未补偿的滚转角, 得到滚转角及滚转角误差如图 4、图 5 所示。

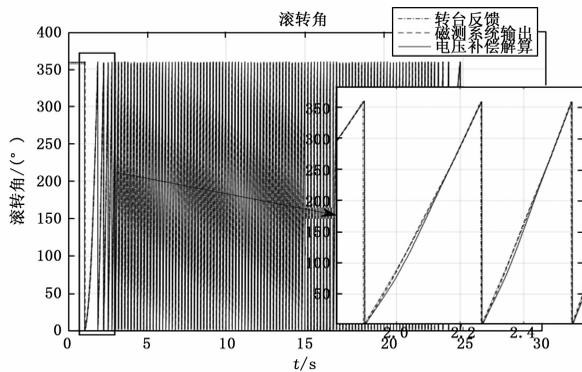


图 4 仿真转台验证滚转角

由图 4、图 5 可以得出, 在三轴飞行仿真转台上, 第一转补偿前后解算的滚转角相同, 与转台反馈的滚转角相比

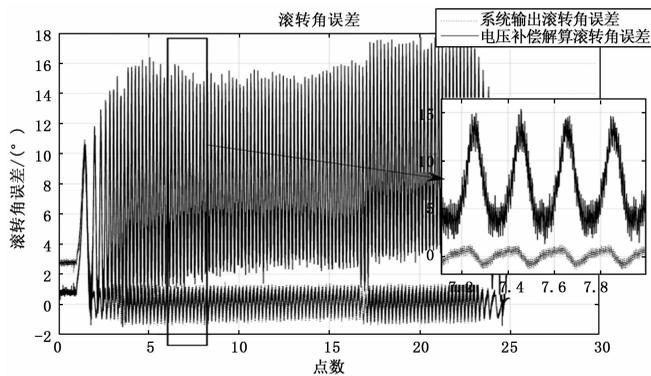


图 5 仿真转台验证滚转角误差

误差较大, 这是因为第一转正在进行误差角的标定。一转之后进行在线误差角补偿, 补偿后的滚转角解算误差最大值为 1.5° , 误差峰峰值为 2.92° 。直接用电压值补偿未补偿等效安装误差解算得到的滚转角误差最大值为 17.87° , 误差峰峰值为 18.38° 。在线标定补偿比未补偿误差解算的滚转角精度提高了 6 倍以上, 极大提高了滚转角的解算精度。并且补偿后滚转角解算误差在 2° 以内, 可以满足旋转弹等制导弹药对滚转角精度的需求。

4 结束语

通过分析三轴磁场信号, 建立三轴磁矢量信息与等效安装误差角的模型, 根据类正弦信号特征实时标定补偿磁矢量传感器的等效安装误差角。从而解决测量系下三轴磁矢量与弹体系地磁矢量不平行的问题, 最终提高滚转角解算精度。试验结果表明, 5° 左右的等效安装误差角可带来十几度的滚转角误差峰峰值, 说明等效安装误差对滚转角解算的精度影响较大。而经过该方法标定补偿后, 相比与未补偿等效安装误差解算的滚转角, 利用该方法补偿后, 滚转角解算精度可提高 6 倍以上, 解算误差保持在 2° 以内, 满足旋转弹制导弹药对滚转角的精度需求。

参考文献:

- [1] KIM H J, KWON K C, SHIM D S. Fast algebraic calibration of MEMS Triaxis magnetometer for initial alignment using least square method [J]. Journal of Electrical Engineering & Technology, 2020, 15: 2361 - 2372.
- [2] 刘宗源, 高敏, 宋卫东, 等. 基于地磁测姿的误差建模及仿真分析 [J]. 火力与指挥控制, 2019, 44 (9): 149 - 152, 158.
- [3] 袁广民, 苑伟政, 罗丹瑶, 等. 基于自适应遗传算法的三轴磁强计校准 [J]. 中国惯性技术学报, 2017, 25 (3): 382 - 386.
- [4] 贾文抖, 林春生, 林朋飞, 等. 基于正弦拟合的三轴磁力仪标定方法 [J]. 武汉大学学报, 2019, 44 (9): 1328 - 1333.
- [5] 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]. 传感器技术学报, 2014, 27 (12): 1649 - 1653.
- [6] 张朝阳, 衣军, 虞伟乔. 三分量磁传感器倾斜放置时的磁场测量方法 [J]. 探测与控制学报, 2017, 39 (2): 72 - 76.

[7] 嵇绍康, 高艳丽. 地磁信号误差模型分析及补偿算法 [J]. 舰船电子工程, 2019, 39 (12): 43-47.

[8] 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]. 传感器技术学报, 2019, 32 (1): 106-110.

[9] 张德文, 张琦, 田武刚, 等. 三轴磁传感器分量误差两步校正方法 [J]. 传感器技术学报, 2018, 31 (11): 1707-1713.

[10] 龙礼, 黄家才. 基于递推最小二乘法的地磁测量误差校正方法 [J]. 仪器仪表学报, 2017, 38 (6): 1440-1446.

[11] PAN D H, LI J, JIN C Y. A new calibration method for triaxial fluxgate magnetometer based on magnetic shielding room [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 67

(5): 4183-4192.

[12] 邹姗姗, 李杰, 车晓蕊. 惯性测量系统安装误差分析与补偿 [J]. 电子器件, 2017, 40 (4): 1000-1004.

[13] 方旭, 王良明. 地磁传感器标定方法研究及数值模拟 [J]. 弹箭与制导学报, 2018, 38 (1): 73-76.

[14] ZHOU Y K, ZHANG X Y, XIAO W. Spinning projectile's angular measurement using crest and trough data of a geomagnetic sensor [J]. Measurement Science and Technology, 2018, 29 (9): 1-9.

[15] 朱兴乐. 舰艇磁性检测中矢量磁传感器的姿态校正 [J]. 计算机测量与控制, 2019, 27 (6): 116-120.

(上接第 145 页)

表 2 不同系统的运动控制时间对比结果

实验次数/次	基于大数据聚类的运动控制系统/s	基于滑膜控制的运动控制系统/s	基于 STM32+FPGA 的运动控制系统/s
1	8.5	14.1	12.4
2	9.8	17.8	14.9
3	10.7	19.4	17.4
4	12.6	22.5	19.2
5	14.2	25.3	21.8
6	14.8	25.9	22.1
7	15.2	26.5	22.7
8	15.9	27.1	23.2
9	16.4	27.8	23.8
10	16.8	28.6	24.5

动控制系统的运动控制时间较短, 运动控制效率较高。因为本文研究的运动控制系统强化了内部控制硬件系统性能, 加强对中心硬件的管理程度, 同时有效缓解硬件系统与软件程序之间的关系, 调整软件控制平台内部的控制算法, 隐藏无关控制程序, 扩展操作空间, 减少内部系统的数据信息占用量, 从而提高系统运动控制效率。

综上所述, 本文研究的基于大数据聚类的智能探测机器人运动控制系统具有较强的运动控制性能, 提升整体控制精准程度, 实现系统控制操作, 能够有效减小运动轨迹误差, 提高系统运动控制效率。

4 结束语

为减小探测机器人运动轨迹误差, 提高运动控制效率, 设计基于大数据聚类的智能探测机器人运动控制系统。通过设计运动控制系统软、硬件结构设计, 采用大数据聚类技术, 获取精准运动轨迹数据, 实现智能探测机器人运动控制。本文设计的控制系统的控制精准程度较高, 运动轨迹误差较小, 能够有效提高运动控制效率。

参考文献:

[1] 黄正鹏, 王力, 张明富. 基于云计算的海量大数据智能清洗系统设计 [J]. 现代电子技术, 2020, 43 (3): 116-120.

[2] 王玉婷. 工业机器人运动控制系统设计研究 [J]. 微型电脑应用, 2020, 36 (10): 86-88, 116.

[3] 孙瑞, 谭秀芬. 基于滑膜控制的井下巡检机器人运动控制系统设计 [J]. 工业仪表与自动化装置, 2019 (1): 121-124.

[4] 陈亚, 史钊亮, 高锦宏, 等. 基于 STM32+FPGA 的六自由度机器人运动控制器设计 [J]. 机械设计与制造, 2020 (4): 240-243.

[5] 徐建明, 赵亚楠, 吴蜀魏, 等. 基于 CoDeSys 的全向移动机器人控制系统设计 [J]. 浙江工业大学学报, 2019, 47 (2): 230-236.

[6] 李荣, 栾贻青, 王海鹏, 等. 全向四驱变电站巡检机器人运动控制系统设计 [J]. 机床与液压, 2020, 48 (8): 112-116.

[7] 刘云恒. 云环境下基于群智能算法的大数据聚类挖掘技术 [J]. 现代电子技术, 2019, 42 (9): 65-67.

[8] 严亮, 舒志兵. 基于 ARM+FPGA 的机器人多轴运动控制器的设计与研究 [J]. 机床与液压, 2019, 47 (11): 21-27.

[9] 周磊, 党少佳, 郭瑞君, 等. 汽轮机旁路温度控制系统的优化 [J]. 内蒙古电力技术, 2019, 37 (1): 52-57.

[10] 卢献华, 王洪俊. 基于大数据计算框架的分布式新闻聚类系统设计 [J]. 计算机科学, 2019, 46 (Z2): 220-223.

[11] 刘陵顺, 胡光, 葛宝川, 等. 九开关变换器驱动的六相永磁同步电机两相断路时的容错控制 [J]. 大电机技术, 2019 (2): 24-28.

[12] 农丽丽, 钟琴, 卢志翔. 基于模糊 K-Means 聚类的光纤大数据分类平台设计 [J]. 激光杂志, 2020, 41 (8): 145-150.

[13] 徐胜华, 徐建明, 赵帅. 基于 PLCopen 的六轴工业机器人运动控制功能块设计 [J]. 计算机测量与控制, 2019, 27 (3): 103-108.

[14] 田华, 何翼. 基于绕质心聚类算法的大数据挖掘 [J]. 计算机应用研究, 2020, 37 (12): 72-75.

[15] 康耀龙, 张景安, 冯丽露. 基于约束满足的大数据聚类中心调度算法仿真 [J]. 计算机仿真, 2020, 37 (3): 390-393.

[16] 刘云楷, 邵昌尧, 李杰, 等. 智能安防机器人控制系统设计与研究 [J]. 电子测量技术, 2019, 42 (4): 25-29.

[17] 薛明. 基于超声图像的 PICC 智能穿刺医疗机器人控制系统设计 [J]. 计算机测量与控制, 2020, 28 (10): 91-95.

[18] 李慧真. 基于大数据处理技术的界面交互设计研究 [J]. 现代电子技术, 2019, 42 (1): 46-49.