

DOI:10.19651/j.cnki.emt.1801984

# 基于磁传感器的温度误差补偿方法

张聪聪 管雪元 姜博文

(南京理工大学瞬态物理国家重点实验室 南京 210096)

**摘要:** 随着科学技术的发展,传感器技术尤其是磁传感器技术在军事领域得到更为广泛的应用,很多武器炮弹在进行远程打击时,会通过自身内部的传感器测定周围环境变量,由计算机进行控制以进行更为精确的打击,而在测定环境变量的过程中传感器不可避免的会出现一些误差,影响打击的精确度,因而提出了基于磁传感器的温度误差补偿方法。先通过对传感器的温度误差的研究分析设计出温度误差漂移模型,然后由温度传感器和地磁传感器来测得不同温度下地磁在两个敏感轴上的分量数据,在拟合出温度漂移系数之后结合模型得出在温度补偿后的各敏感轴数据。仿真分析温度补偿前后磁传感器的输出对比,验证该方法能有效对温度误差进行补偿。

**关键词:** 磁传感器;温度误差漂移模型;误差补偿

**中图分类号:** TN967.2   **文献标识码:** A   **国家标准学科分类代码:** 510.4030

## Compensation method of the thermal error based on magnetic sensor

Zhang Congcong Guan Xueyuan Jiang Bowen

(State Key Laboratory of Transient Physics, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210096, China)

**Abstract:** With the development of science and technology, sensor technology, especially magnetic sensor technology, has been more widely used in the military field. When many weapons and shells are used for long-range strikes, their own internal sensors will measure the surrounding environment variables, then the computer will control them to make more accurate strikes. In this process, the sensors will inevitably have some errors, which affects the accuracy of the military strike. Therefore, a compensation method of the thermal error based on magnetic sensor is proposed. Firstly, the thermal error drift model is designed by analyzing the thermal error of the sensor. Then the temperature sensor and the geomagnetic sensor are used to measure the component data of the geomagnetism on the two sensitive axes at different temperatures, and the model derives the data for each sensitive axis after fitting the temperature drift coefficient. The simulation compares the different outputs of the magnetic sensor, and verifies that the method can effectively compensate the thermal error.

**Keywords:** magnetic sensor; thermal error drift model; error compensation

## 0 引言

当前磁传感器技术在武器炮弹打击中占据着越来越重要的地位,通过它测定周围磁场的分布变化来判断被测物体的运动姿态等信息,由此来相应地改变炮弹打击的轨迹,有着安全、高效的特点<sup>[1-7]</sup>。但是磁传感器在抗干扰方面还有着一定的不足,当温度发生较大变化时,磁传感器的精确度和灵敏度会受到相应的影响<sup>[8-10]</sup>,目前最常见的温度补偿方法有灵敏系数温度补偿和零点温度补偿等,这些方法在进行温度补偿时需要串并联元件,相对较为复杂,针对此种情况,本文研究了一种简单的温度补偿方案,通过建立温度误差漂移模型以及拟合温度漂移系数进行补偿,这种方

案计算量较小,易于实现,对于提高磁传感器测量的精度有着一定的现实意义。

## 1 载体坐标系和地磁传感器的位置关系

### 1.1 载体坐标系

先以一飞行器模型来说明载体坐标系,找出模型的中心点,以此为原点,将  $ox$  轴正向定位模型中心到头的方向,将  $oy$  轴正向定位为模型右翼的方向,而  $oz$  轴则是垂直于  $ox$ 、 $oy$  轴组成的平面,并且方向由平面指向下方,如图 1 所示。

### 1.2 地磁传感器的安装

在测量时,本文用了两个 HMC1052 磁传感器来进行

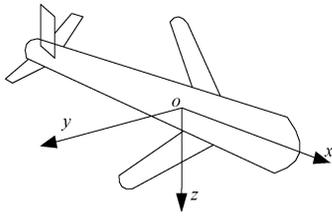


图 1 载体坐标系

实验,具体的原因会在后边的温度补偿工作中提及,HMC1052 磁传感器有着两个互相垂直的敏感轴,其安装位置如图 2 所示。

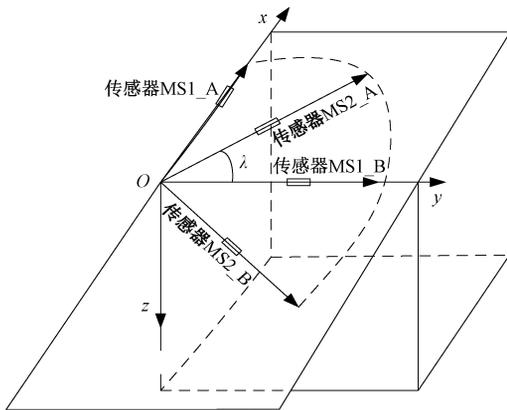


图 2 地磁传感器安装示意图

将传感器的两个轴分别称为 A, B 轴,对于传感器  $S_1$  可以将它的 A 轴与载体纵轴重合,然后让 B 轴与  $oy$  轴重合;对于传感器  $S_2$  它的两个轴和传感器  $S_1$  的两个轴处于同一个平面,并且它的 A 轴与  $oy$  的夹角为  $\lambda$ ,至此传感器的安装已完成。

## 2 温度误差分析

由于传感器受到外界干扰时不可避免的会产生一些误差,因而需要对产生的误差进行补偿。对于磁传感器来说,它在系统工作的时候容易受到外界因素的影响,使得测量的数据并不是非常精确,这个时候需要先进行误差分析,通过研究分析来得出相应的补偿方案<sup>[11-15]</sup>,本节主要介绍磁传感器的温度误差分析。

一方面,传感器制造材料本身具有一定的温度系数,这使得温度漂移的现象普遍存在,除此之外,传感器内部的电子器件也会有温度漂移,导致传感器的输出值会随着温度的变化而变化。在实验过程中,从系统刚上电的到稳定工作,温度有一个相对较大的变化,因此,地磁传感器的输出值也会有较大的变动,所以有必要对其进行温度补偿。

地磁传感器的温度漂移误差分为两个部分,一部分是偏置常数温度漂移,另一部分是比例系数温度漂移。建立如式(1)所示的温度漂移误差模型。

$$\begin{pmatrix} H'_x \\ H'_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 + C_1(t) & 0 \\ 0 & 1 + C_2(t) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} H_x \\ H_y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} B_1(t) \\ B_2(t) \end{pmatrix} \quad (1)$$

式中:参数  $H'_x$  和  $H'_y$  代表着受温度影响的传感器输出数值;参数  $H_x$  和  $H_y$  代表未受到温度影响的传感器输出值;参数  $C_1(t)$  和  $C_2(t)$  代表传感器比例系数温度漂移;参数  $B_1(t)$  和  $B_2(t)$  代表传感器的偏置系数温度漂移。 $C_1(t)$ 、 $C_2(t)$ 、 $B_1(t)$ 、 $B_2(t)$  均为温度  $t$  的二次函数,可以描述为  $F(t) = a_0 + a_1t + a_2t^2$ ,经过温度补偿后得到传感器的理论输出如式(2)所示。

$$\begin{pmatrix} H_x \\ H_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{H'_x - B_1(t)}{1 + C_1(t)} \\ \frac{H'_y - B_2(t)}{1 + C_2(t)} \end{pmatrix} \quad (2)$$

## 3 误差补偿实验

### 3.1 实验地区位置信息

具体位置信息如表 1 所示。

表 1 试验地区位置信息

说明	数值
北纬	N32.041 393°
东经	E119.034 560°
海拔	67 m
地磁强度	49 808.7 nT
水平强度	32 909.8 nT
北向地磁分量	32 750.1 nT
东向地磁分量	-3 238 nT
垂直地磁分量	37 398.7 nT
磁偏角	-5.39°
磁倾角	48.65°

### 3.2 温度补偿工作

在第 2 节内容中,本文介绍了传感器的温度漂移误差,并给出了式(1)所示的温度漂移补偿模型,在式(1)中,有  $C_1(t)$ 、 $C_2(t)$ 、 $B_1(t)$ 、 $B_2(t)$  4 个未知项,显然需要提供 4 组方程才能够求解,对于所用的 HMC1052 地磁传感器,其有两轴输出,一个姿态可以提供两组方程,那么两个姿态就可以提供 4 组方程,便可求解未知数。

既然是温度补偿,就要选取一个温度作为基准,可以根据工作环境的不同,选取不同的温度基准,在这里本文选择 20 °C 作为基准温度进行补偿,在确定磁北方向后,考虑到实验地区磁倾角为 48.65°,选取弹体北向抬头 41.35°和弹体北向低头 48.65°两个方向进行实验,在实验前需要对系统进行保温处理,之后利用干冰缓慢降温,采集降温过程中的数据。

#### 1) 弹体北向抬头 41.35°

选取弹体北向抬头 41.35°,此时地磁传感器 X 轴理论上会出现地磁的最小值,保持弹体的方向不变并进行旋转,

地磁传感器 Y 轴会出现地磁的最大值和最小值,成正弦周期性波动,当地磁传感器 Y 轴与地磁场方向重合的时候会出现最大值,测得此时的实验数据。地磁传感器安装位置如图 3 所示。图 4 所示显示了北向抬头 41.35° 状态下两个轴的实验数据。为方便起见,将纵轴统一为 AD 点数,这是结合传感器供电电源以及 AD 模数转换芯片的工作模式计算出的从零到最大地磁强度之间的对应的 AD 点数。

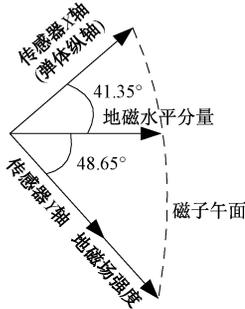
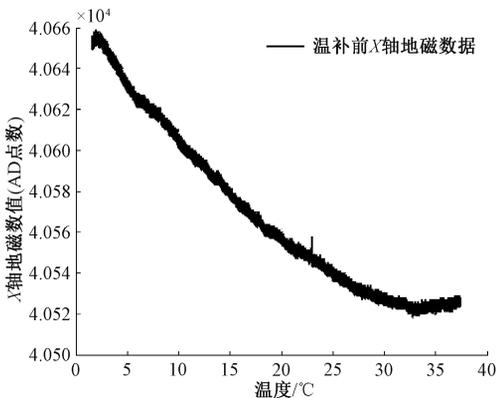
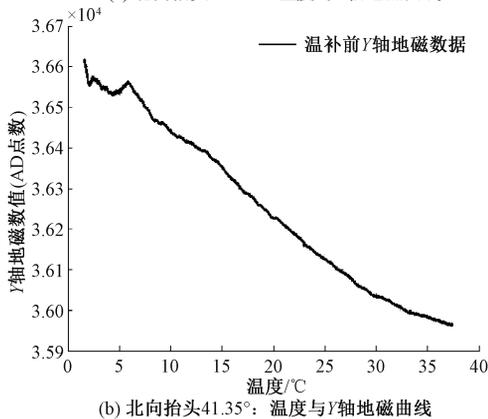


图 3 弹体北向抬头 41.35°



(a) 北向抬头 41.35°: 温度与 X 轴地磁曲线



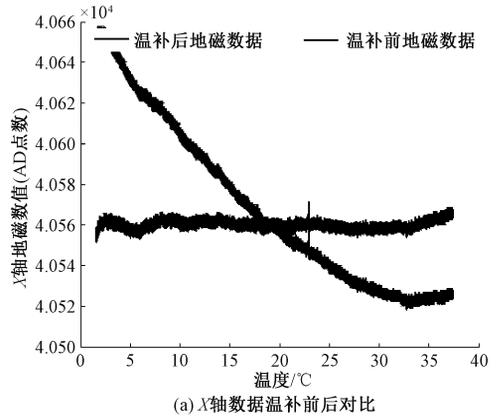
(b) 北向抬头 41.35°: 温度与 Y 轴地磁曲线

图 4 北向抬头 41.35° 状态下 X 轴和 Y 轴地磁数据

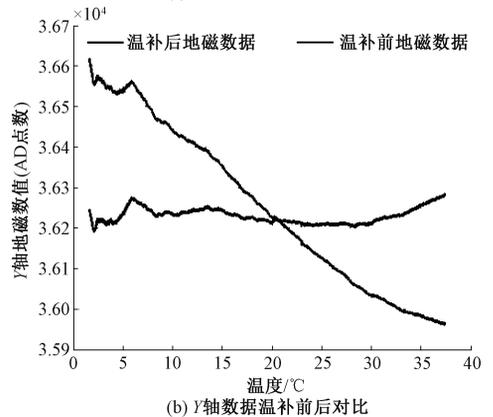
从图 4 中可以看出,随着温度的升高,X 轴和 Y 轴地磁数据呈下降趋势。可以根据此实验数据完成传感器 Y 轴比例系数温度漂移  $C_2(t)$  和传感器 X 轴偏置系数温度漂移  $B_1(t)$  的计算。 $B_1(t)$  和  $C_2(t)$  可以描述为温度  $t$  的二次函数。

选取 20 °C 作为温度补偿基准,拟合地磁变化量关于温度的二次函数,结合补偿后的传感器理论输出模型进行补偿。系数计算结果如式(3)所示,补偿后的数据对比如图 5 所示。

$$\begin{cases} B_1(t) = 0.1005t^2 - 7.6908t + 110.3767 \\ C_2(t) = (2.0228 \times 10^{-6})t^2 - (5.9351 \times 10^{-4})t + 0.0113 \end{cases} \quad (3)$$



(a) X 轴数据温补前后对比



(b) Y 轴数据温补前后对比

图 5 北向抬头 41.35° 温补前后地磁数据

2) 弹体北向低头 48.65°

选取弹体北向低头 48.65°, 此时地磁传感器 X 轴测得的实验数据为最大值。而 Y 轴因为始终保持与地磁场方向垂直使得测得的实验数据一直为零。测得此时的实验数据。地磁传感器的安装位置如图 6 所示。图 7 所示为北向低头 48.65° 状态下两轴的实验数据。

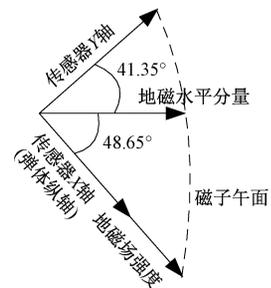
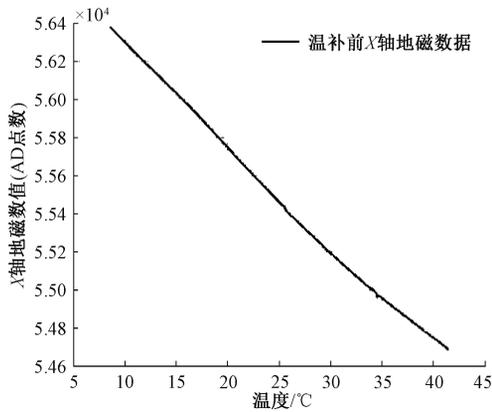
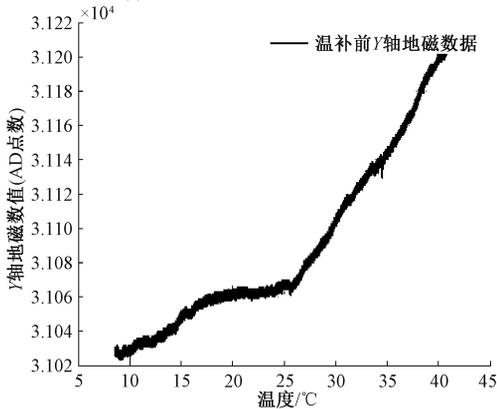


图 6 弹体北低头 48.65°



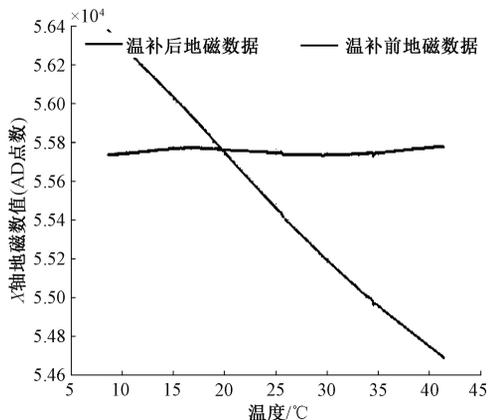
(a) 北向抬头48.65°: 温度与X轴地磁曲线



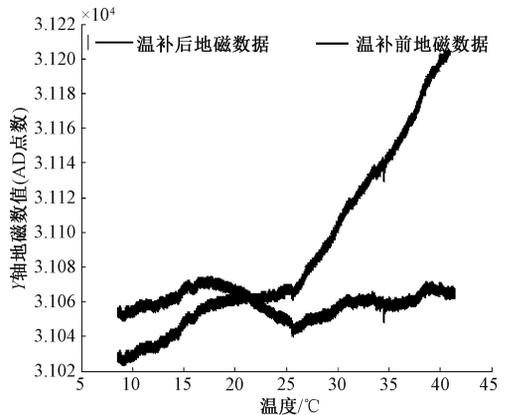
(b) 北向抬头48.65°: 温度与Y轴地磁曲线

图 7 北向低头 48.65°状态下 X 轴和 Y 轴地磁数据

由图 7 可以看出,随着温度升高,X 轴地磁数据呈下降趋势,Y 轴地磁数据呈上升趋势。可以根据此实验数据完成传感器 X 轴比例系数温度漂移  $C_1(t)$  和传感器 Y 轴偏置系数温度漂移  $B_2(t)$  的计算。 $B_2(t)$  和  $C_1(t)$  可以描述为温度  $t$  的二次函数。在 20 °C 温度补偿基准下对传感器输出值进行补偿,经过补偿后 X 轴和 Y 轴地磁数据都趋于平衡,系数计算结果如式(4)所示,补偿后的数据对比如图 8 所示。



(a) X轴数据温补前后对比



(b) Y轴数据温补前后对比

图 8 北向低头 48.65°温补前后地磁数据

$$\begin{cases} B_2(t) = 0.157 0t^2 - 2.654 8t - 14.747 3 \\ C_1(t) = (3.969 9 \times 10^{-6})t^2 - 0.001 114 7 t + 0.021 15 \end{cases} \quad (4)$$

#### 4 结 论

对磁传感器进行温度补偿能有效提高数据的测量精度,提升环境测量飞行控制精度。本文针对地磁传感器在较大温差下有着不同的输出结果来研究设计了完善的温度补偿方案,先利用温度数据求出温度系数,再用温度系数去修正传感器受到温度影响的输出数据,利用地磁数据仿真验证此方法的可行性和正确性。与其他方法相比,此方案简单高效,能很好地被工程实际应用,有着一定的现实意义。

#### 参考文献

- [1] 姜博文. 基于 SoC 的弹载小型化数据采集系统设计[D].南京:南京理工大学,2018.
- [2] 李文胜.基于比值法的磁阻传感器炮弹姿态测量系统研究[D].南京:南京理工大学,2017.
- [3] 邱荣剑.地磁传感器测量弹体滚转姿态方法研究[J].四川兵工学报,2014,35(10):103-106.
- [4] 高尚峰.基于地磁传感技术的场面运动目标检测及跟踪预测研究[D].南京:南京航空航天大学,2016.
- [5] 楼朝飞,张锐.地磁传感器在自旋导弹惯测组合中的应用研究[J].航天控制,2008(2):41-46,54.
- [6] 杨梦雨,管雪元,李文胜.基于 MEMS/GPS/地磁组合的弹体姿态解算[J].电子测量技术,2017,40(4):60-63.
- [7] 范淑端,王晓峰,张合.基于最小二乘拟合的地磁场测量误差补偿方法[J].探测与控制学报,2013,35(4):40-43.
- [8] 杭义军,李荣冰,刘建业.微型航姿系统中磁传感器温度漂移补偿研究[J].传感器与微系统,2010,29(1):30-32,35.
- [9] 杨雪,刘诗斌.压力传感器温度补偿各种算法的比较分

- 析[J].电子设计工程,2013,21(10):90-92,96.
- [10] 韩迪,袁正兴.压力传感器温度漂移及补偿方法研[J],测控技术,2013,32(增刊):280-282.
- [11] 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,2014,27(12):1649-1653.
- [12] 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.
- [13] 庞鸿锋.三轴磁通门传感器误差分析与校正[D].长沙:国防科学技术大学,2010.
- [14] 赵国荣,嵇绍康,杨飞,等.磁场信号检测误差分析及补偿算法[J].系统仿真技术,2012,8(2):153-157.
- [15] 黄学功,王炅.地磁信号检测系统误差分析与补偿方法研究[J].兵工学报,2011,32(1):33-36.

### 作者简介

张聪聪,工学硕士,主要研究方向为控制工程。

管雪元,硕士、高级工程师,主要研究方向为测试计量技术及仪器。

E-mail:njust\_gxy@163.com