

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2010.03.026

基于磁阻传感器的弹体姿态测量系统

侯宏录¹, 王赛¹, 张雄星²
(西安工业大学 光电工程学院, 陕西 西安 710032)

摘要: 为实时准确获取弹体俯仰和滚转参数, 提出一种利用磁阻传感器获取地磁场强度, 结合微机电陀螺精确求解弹体姿态的方法。介绍了基于地磁场的姿态测量系统原理和硬件设计, 对存在的各种误差进行了分析, 并提出了相应的误差补偿方法。最后, 对所设计的系统进行了验证。结果表明, 其测量姿态角精度优于 1°。

关键词: 姿态测量系统; 弹体; 磁阻传感器; 误差补偿

中图分类号: TP274; TP212.9 **文献标识码:** A

Missile Attitude Measurement System Based on Magnetic Resistance Sensor

HOU Hong-lu¹, WANG Sai¹, ZHANG Xiong-xing²
(College of Optoelectronics Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710032, China)

Abstract: To acquire projectile body pitch and roll parameters on real-time, put forward a new projectile body attitude method, using to obtain geomagnetic field intensity and combine microcomputer gyroscope. Firstly, the principles of attitude measurement system and hardware design based on geomagnetic field distribution are introduced. Secondly, the various error factor and influence are analyzed, and the relevant to compensation methods are put forward. Finally, testing and verification for the designed system is carried out. The experiment results show that attitude measurement accuracy is better than 1°.

Keywords: Attitude measurement system; Missile; Magnetic resistance sensor; Error compensation

0 引言

地球表面及近地空间存在磁场, 其强度大约为 0.5~0.6 Gauss, 有一分量平行于地球表面, 且该分量总指向地球磁场的北极。随着电子学和地球物理学以及计算机技术等科学的快速发展, 利用地磁场探测技术可以解决目标相对于参考坐标系的方向^[1], 有望实现姿态测量。目前, 国内外对弹体姿态探测的方法很多, 例如利用太阳方位角遥测法^[2], 其原理简单, 但易受大气环境干扰, 安装较为复杂, 成本较高, 不可能在现有“笨”弹的基础上大量装备; 而利用加速度计方法测量时存在着误差积累效应^[3]; 基于光电测量的外测法^[4], 其精度较低。因此, 研制能有效提高弹体姿态探测精度、抗高过载, 并能充分利用现有弹药的方法及组件迫在眉睫。故提出一种新的弹体姿态测量方法, 以地磁场为参考进行姿态探测。

1 测量原理

当弹体处于弹体坐标系的三维空间中, 其坐标系与地理坐标不重合, 各轴分量会产生耦合, 采用磁阻传感器和微机电陀螺组合, 三轴地磁强度测量系统用于检测地磁场在弹体坐标系 3 个轴上的分量

X、Y 和 Z, 用微机电陀螺获取俯仰角 ϕ 和翻滚角 θ 。根据测量值 X、Y、Z、 ϕ 和 θ , 经过坐标变换, 将测量值转化到地理坐标系上, 从而可求得弹体的姿态角。

$$H_x = X * \cos(\phi) + Y * \sin(\phi) * \sin(\theta) - Z \cos(\theta) * \sin(\phi) \quad (1)$$

$$H_y = Y * \cos(\theta) + Z * \sin(\theta) \quad (2)$$

计算出 H_x 、 H_y 。

由式 (3) 即可解算弹体的偏航角。

$$\alpha = \arctan\left(\frac{H_y}{H_x}\right) \quad (3)$$

由于地球的地理北极和磁北极并不重合, 两者间相差一个磁偏角 β , 所以由式 (3) 计算出的值, 再加上当地的磁偏角, 才能准确得到弹体相对于地理北极的姿态角。

2 磁阻传感器测量系统总体设计

2.1 系统要求及条件

由于弹体发射过程的高过载和强干扰环境, 磁强度无法得到稳定输出, 因此适用于弹体飞行稳定后的姿态求解, 同时还应满足下列假设条件:

1) 弹的外形和质量均为轴对称分布, 任取过质

收稿日期: 2009-10-12; 修回日期: 2009-12-04

基金项目: 国防科技重点实验室基金项目“榴弹轴向加速度精确测量方法与试验研究”(9140C3606100904)

作者简介: 侯宏录(1960-), 男, 陕西人, 博士, 教授, 从事光电测试、信息融合、复杂系统建模、仿真与作战效能评估研究。

心垂直于纵轴的坐标轴所测得的赤道转动惯量没有明显差异；

2) 弹体在稳定飞行时弹轴和质心运动速度矢量的夹角（攻角）很小，对于姿态的求解可认为恒为零；

3) 气动力和推力矢量所产生的推力偏心为零。

该测试系统要求对旋转轴对称弹体的姿态参数实现实时准确的测量。其参数的技术指标要求如下：

电源电压：5 V；测量背景：某高射榴弹；飞行高度：1 000 m；稳定转速：5~30 r/s；测量范围：0~360°；测量精度：弹体瞬时姿态角误差≤1°；环境温度：-40~85 ℃；响应时间：40 μs。

2.2 磁探测电路设计

磁探测模块是引信的重要组成部分，由传感器、放大电路、信号处理电路和微控制器电路组成，工作原理如图 1。

磁阻传感器的输出为毫伏级，信号较小，需要放大器；信号为模拟信号，需将模拟信号转化为数字信号以后才能被单片机处理，单片机可以实现对模数转化芯片的定时和逻辑控制功能，由于驱动各

个模块的电压不同，还需电压转换模块。

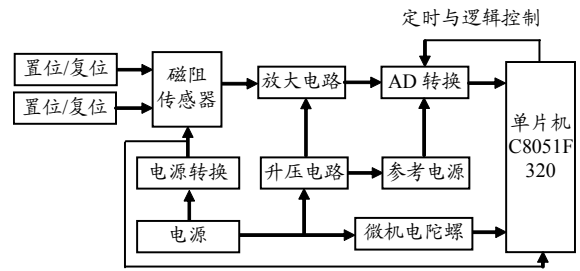


图 1 系统原理图

3 系统硬件模块化设计

1) 磁信号采集电路设计

磁阻传感器是利用合金电阻对某一个方向磁场敏感的原理制成的。磁阻传感器本身是固态，电阻的体积可以做得很小，且无活动部件，配合选用体积小、功耗低的外围器件，可将探测系统微型化，有逐步取代磁通门的趋势。

系统采用的是 Honeywell 公司的 HMC1002 双轴磁阻传感器和 HMC1041Z 单轴磁阻传感器组合，2 个传感器的敏感方向相互垂直。即三轴正交。传感器的主要技术参数^[5]如表 1。

表 1 磁阻传感器 HMC1002 的主要技术参数表

特性	条件	典型值	单位
电桥电源	电桥电压，参照于接地电压	5	V
工作温度		-40 ~ +125	℃
磁场范围	FS，总外加磁场	-2 ~ +2	Gauss
线性误差	25 ℃ 时最符合直线	0.5	% FS
可重复性误差	25 ℃ 时 ±2 Gauss 之间扫描 3 次	0.05	% FS
滞后误差	25 ℃ 时 ±2 Gauss 之间扫描 3 次	0.05	% FS
灵敏度	电桥电压 = 8 V	3.2	mV/V/Gauss
分辨率	带宽 = 10 Hz，电桥电压 = 5 V	27	μGauss
带宽	磁信号（下限为 DC）	5	MHz

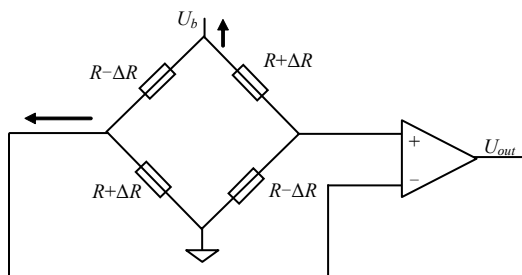


图 2 磁阻传感器工作原理

图 2 为磁阻传感器工作原理图，给电阻器施加箭头方向的正交偏置磁场，会导致电阻器发生磁化，进而阻值发生变化。同向放置的 2 个电阻器阻值增加 ΔR，另 2 个与其反向放置的电阻器阻值减小 ΔR，电桥的输出为：

$$\Delta U_{out} = (\Delta R / R) U_b \quad (4)$$

2) 磁阻传感器的置位/复位电路

姿态测量系统需安装在被测弹体上，大多数低磁场传感器会受到大的磁场的干扰影响，可能导致输出信号的衰变，传感器元件会分成若干方向随机的磁区域，从而导致灵敏度衰减。峰值电流高于最低要求电流的脉冲电流（置位），通过置位/复位电流带产生一个强磁场，该磁场可以重新将磁区域对准到一个方向上，置位/复位电路能把磁阻传感器恢复到测量磁场的高灵敏度状态。设计应用场合中的最小可测磁场低于 100 μGauss，则要求 4 A（最小值）的脉冲。在无外磁场作用下，磁阻传感器的失调电压通常为 -10~25 mV，同时，置位/复位电路也能使失调电压减小。

图 3 的电路是在微处理器控制下生成强置位/复位脉冲 (>4 A)。置位/复位信号由微处理器生成，A1、A2 与单片机接口连接，并控制 P 和 N 通道

HEXFET 驱动器电流 (IRF7105), 输出信号接入磁阻传感器的复位/置位引脚, 基本上是一种先断后通的开关切换方式。

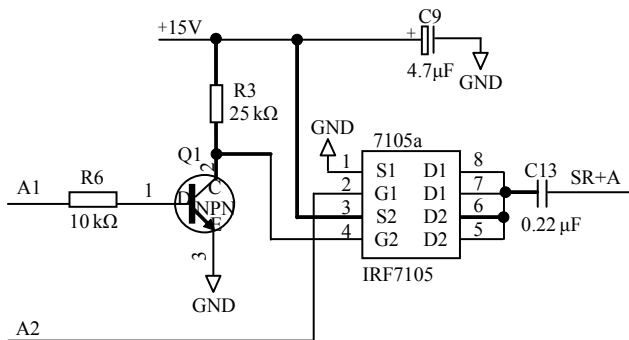


图3 复位/置位电路

磁阻传感器片内的复位/置位 (S/R) 电流带通过脉冲电流重新对准, 或者翻转传感器内的磁畴方向。利用 S/R 电流带可以消除或减小误差的影响, 包括: 温度漂移、非线性误差、交叉轴影响和由于高磁场的存在而导致信号输出的丢失。

3) 信号放大电路设计

地磁场的典型值为 $0.5 \sim 0.6$ Gauss, 由传感器输出特性曲线可知: 磁场范围为 ± 2 Gauss 时输出电压信号为毫伏级, 为提高采样精度, 需要采用高精度运算放大器对传感器的输出电压进行放大, 故选用 AD8556 芯片, 其放大倍数可以通过编写软件程序设定, 输出电压为:

$$V_{OUT} = GAIN(V_{POS} - V_{NEG}) + VD_{AC} \quad (5)$$

$$\text{其中, } GAIN = 4 \times \left(\frac{6.4}{4}\right)^{\left(\frac{Code}{127}\right)}, \quad VD_{AC} \approx \left(\frac{Code + 0.5}{256}\right)(V_{DD} - V_{SS}) + V_{SS}.$$

式中: V_{OUT} —输出电压; $GAIN$ —放大增益; V_{POS} —放大器正向输入; V_{NEG} —放大器反向输入; VD_{AC} —数模转换器输出电压。

4) AD 转换电路

滤波后的数据需要经过 AD 转换才能送入单片机, 系统设计要求测角精度为 1° , 则传感器的精度应优于 0.1° , 由 $\arctan\left(\frac{H_y}{H_x}\right) < 0.1^\circ$ 可知, $\frac{H_y}{H_x} < \frac{1}{573}$, 故至少应采用 10 位 AD 转化器, 为保证系统精度, 应增加 AD 转换的位数, 选用 MAXIM 公司的 MAX1168, 它是一种 16 位的 AD 转换器, 具有 8 位输入通道, 200kbPS 的吞吐率。其特点是功率低, 具有 SPI/QSPI/MICROWIRE、单片机兼容的串行接口, 能工作于多种软件可编程工作模式及电源管

理模式, 是目前体积最小的 16 位 ADC。

5) 电源设计

直流电源也是整个设计的重要组成部分, 其精度直接影响系统的性能。电源设计要求: 传感器采用单电源 +3.3 V 供电; 置位/复位电路和 AD 转换参考源电压采用 +9~+15 V 供电。

为满足系统的电源设计要求, 减小电源自身的工作噪声对器件的干扰, 放大电路采用 +5 V 供电; AD 转换电路采用 3.3 V 供电; 单片机 C8051F320 需要 3.3 V, 系统所需要的 +5 V 电源采用开关电源, 选用 MAX762 芯片, 设计升压电路, 如图 4。

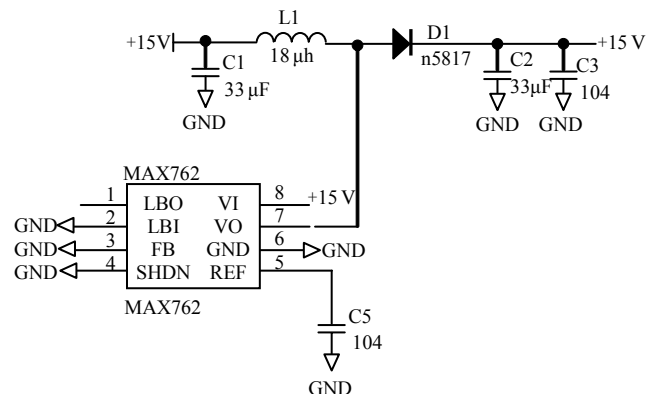


图4 升压电路

6) 微处理电路

为实现快速的响应和处理数据的能力, 信号处理电路选用单片机 C8051F320, 实现对输出信号的控制, 经处理的信号保存在单片机的存储器中, 存储器的容量有限, 需要时可以扩展 Flash, 并且和上位机进行串口通信, 该单片机时钟频率 24 MHz, 既可选择内部振荡源, 又可使用外部时钟, 可在运行中切换时钟源, 且体积小, 功耗低。

为提高磁探测系统的抗干扰能力, 不仅在采集信号之前需进行适当的滤波处理, 在采样后也要进行适当的软件滤波, 才能进行后续的处理与解算。程序设计主要包括主程序、中断服务程序和子程序。

4 系统误差及补偿

造成姿态测量系统误差的主要原因包括: 器件误差、安装误差、环境误差以及姿态信号误差等。

4.1 磁阻传感器引起的测角误差

传感器自身误差包括各轴间的正交误差、传感器的零位误差和灵敏度误差等, 使用置位/复位电路, 除了有利于恢复磁阻传感器的输出特性外, 还有利于减少磁阻传感器本身的干扰及相互间的耦合

干扰。

传感器的最大线性度误差为 0.5%FS, 因为地磁场的典型值为 0.5~0.6 Gauss, 则线性度误差换算成磁场误差为:

$$0.5\%FS \times (0.5 \sim 0.6 \text{ Gauss}) = (2.5 \sim 3.0) \text{ mGauss}$$

则由线性度导致的姿态最大误差为:

$$\arctan(0.003) = 0.1719^\circ$$

同理, 迟滞误差为:

$$0.05\%FS \times (0.5 \sim 0.6 \text{ Gauss}) = (0.25 \sim 0.30) \text{ mGauss}$$

$$\arctan(0.0003) = 0.0172^\circ$$

重复性误差为:

$$0.05\%FS \times (0.5 \sim 0.6 \text{ Gauss}) = (0.25 \sim 0.30) \text{ mGauss}$$

$$\arctan(0.0003) = 0.0172^\circ$$

噪声(灵敏度)误差 $\leq 0.001^\circ$

传感器总体误差为:

$$\sqrt{0.1719^2 + 0.0172^2 + 0.0172^2} = 0.1736^\circ$$

由于整个设计系统的主要器件误差均来源于磁阻传感器, 对于其它器件引起的误差可在后续设计中将会削弱, 在此不做详细说明。

4.2 安装误差

安装误差是由于安装传感器时, 不能保证传感器的 3 个测量轴与弹体坐标系的三轴平行而引起的误差。假如在传感器 HMC1041Z 上外加磁场 H_w , 由于横轴的影响会产生附加磁场 H_f , 如图 5。

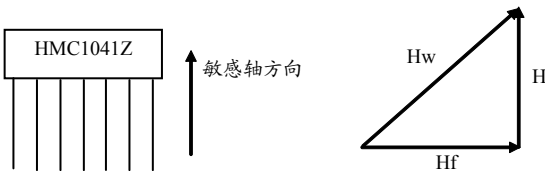


图 5 附加磁场示意图

则传感器的输出电压为:

$$V = \frac{aH}{H_s + H_f} \tag{6}$$

式中 V 为未消除传感器误差的输出电压; a 为常数因子; H_s 为磁场常数; H 为敏感轴方向的磁场。

在未使用置位/复位电路时, 由于耦合产生了较大的误差, 故在实际运用中一定要使用置/复位电路, 把误差控制在 $\pm 0.07\%$ FS, 有效地改善系统性能。

4.3 环境引起的误差

由于传感器安装在弹体中, 周围的金属材料将影响地磁场强度输出, 可以认为是加在地磁场上的附加磁场。该磁场是稳定的, 在实验室通过软件校正法进行标定补偿。

4.4 姿态信号误差

姿态信号误差是由于俯仰角、翻滚角的误差而引起的姿态测量误差。尽管它不属于磁探测系统本身, 但其误差参与坐标转换后将引起方位角测量误差, 这部分误差要求微机电陀螺系统的精度较高。

此外, 还有舍入误差和截断误差, 以及其他器件引起的弱小误差。采用软件椭圆拟合算法补偿。

5 实验与结果分析

鉴于该项目目前未能进行外场试验, 在实验室对磁阻传感器进行了标定, 削弱系统误差。以双轴磁阻传感器输出 X 、 Y 为例, 测试 HMC1002 双轴输出角度的准确性和精度。

测试算法为:

$$\text{当 } Y > 0, \theta = \arccos\left(\frac{X}{\sqrt{X^2 + Y^2}}\right)$$

$$\text{当 } Y < 0, X > 0, \theta = \pi - \arccos\left(\frac{X}{\sqrt{X^2 + Y^2}}\right)$$

$$\text{当 } Y < 0, X < 0, \theta = 2 * \pi - \arccos\left(\frac{X}{\sqrt{X^2 + Y^2}}\right)$$

其中, X 、 Y 分别为所测地磁场的水平分量。 θ 为输出角度。

目前实验室标定角度的试验台为光学分度头, 由于该设计采用磁阻传感器, 其对磁场强度敏感, 试验台面为铸铁块, 会对地磁场产生干扰, 为配合试验, 将该测量系统固定在步进电机上, 比较磁阻传感器角度输出与步进电机角度输出, 验证磁阻传感器测得的角度值准确。步进电机每步 0.9° , 每执行 10 步记录 1 次数据, 共测试 40 组数据。

如图 6, 实线是理论步进角度, 星号线是未经过误差补偿的测角值, 点划线是经过误差补偿后的测角值, 横轴为载体旋转一周测角数。

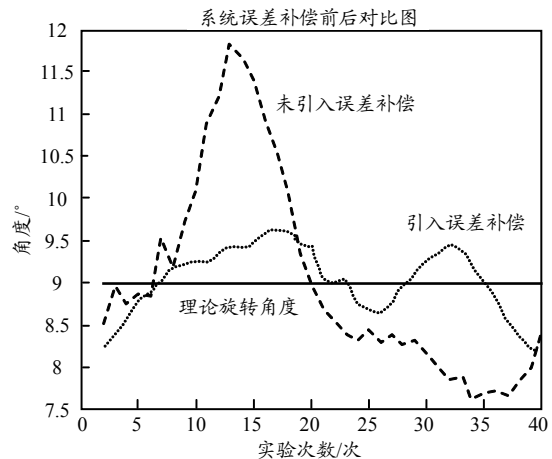


图 6 误差校正前后对比图

析 SID 包中 81 7F CC 64 可知该节点为 1 号节点，端口 0 和端口 2 没有连接，端口 1 连接至父节点；分析 SID 包中 82 7F CC DE 可知该节点为 2 号节点，端口 0 和端口 2 连接至子节点，端口 1 未连接，与拓扑图信息完全吻合。

实验中，PC1 发送命令从串口读取 28 个字节。实验结果如图 7、图 8，图 7 发送部分为串口收到命令后发送的数据，接收部分为接收到的 1394b 的目标标识包。图 8 为 1394b 主控机 (PC1) 接收到相应数据长度的数据。通过对比可知：1394b 可以正确无误地接收 RS232 数据。

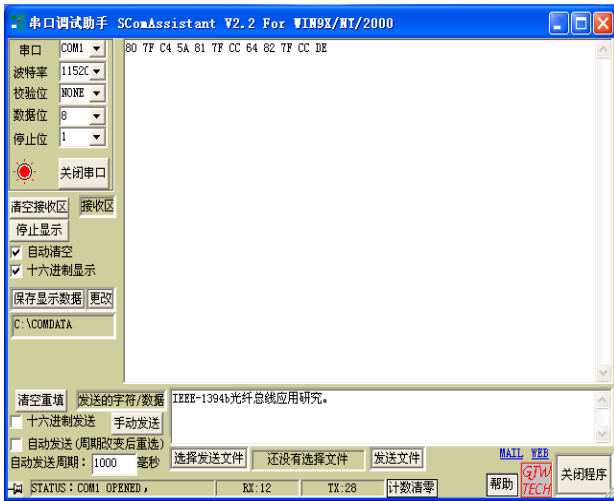


图 7 串口发送及接收的数据

RS232 串行总线之间的可靠数据传输。该设计提供了 1394b 光纤总线与通用接口设备的兼容，对该总线的扩展应用具有重要意义。

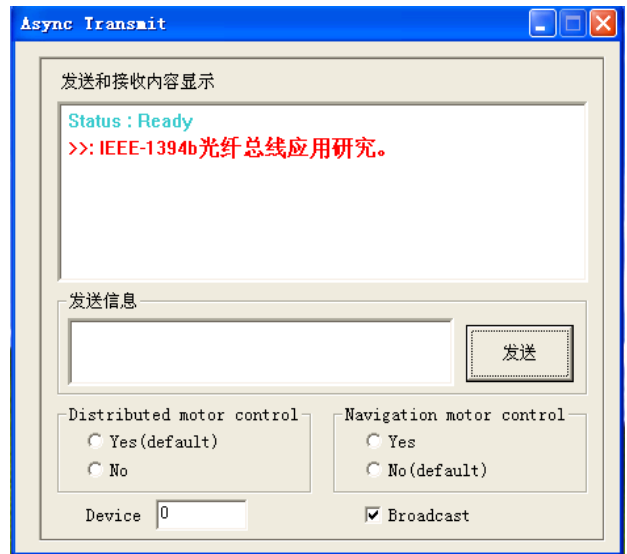


图 8 1394b 接收的数据

5 结束语

通过实验，系统可以实现 1394b 光纤总线和

(上接第 78 页)

通过实验，解算超定方程计算出 X、Y 轴灵敏度比值为 1.005，调整两轴输出，减小灵敏度误差带来的测角偏差。根据补偿后的结果和理论步进值比较可知，输出角度的绝对误差可以控制 0.58°，局部误差为 1°，符合设计要求。

对于姿态的测量，实时性至关重要，当弹体的滚转速率为 30 r/s 时，如果测量角度达到 1°，那么

$$\text{每度的响应时间为 } t \leq \frac{1}{\omega \times 360} \leq 92.6 \mu\text{s}.$$

整个测量系统响应时间分配为：磁阻传感器的响应时间，A/D 转换时间，通信输出时间以及解算算法时间。经过公式和实验可满足所设计的角度测量装置的响应时间小于 40 μs，远小于 92.6 μs 的系统要求。

6 结论

经过误差传递分析，并对载体在水平状态下进

参考文献：

- [1] 张大朴, 王晓, 张大为, 等. IEEE 1394 协议及接口设计 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2004: 15-18.
- [2] 段靖远, 史浩琴, 张春熹. 基于 IEEE-1394b 协议带有自诊断功能的光电转换实现[J]. 陕西师范大学学报(自然科学版), 2006, 34(6): 108-109.
- [3] Microprocessors and Microcomputer Standards Committee of the IEEE Computer Society. IEEE Standard for a High-Performance Serial Bus-Amendment 2[S]. 2002: 12.

行 0~360° 实测，结果表明其姿态测角精度优于 1°，可以为弹道修正弹姿态角探测所利用。该方法具有原理简单，无累积误差，高精度，以及良好的频率响应特性等诸多优点。虽然在实验室调试，系统稳定且达到预期精度，但实际中还应考虑由于地球表面不同海拔，不同纬度及弹体在不同的高度飞行时，周围环境问题都会引起磁阻传感器的输出误差。

参考文献：

- [1] 徐晓东, 赵忠, 李丽锦. 采用磁阻传感器与加速度计的电子罗盘设计[J]. 兵工自动化, 2005, 24(5): 21-22.
- [2] 桂延宁, 杨燕. 基于太阳方位角原理的炮弹飞行姿态遥测[J]. 兵工学报, 2003, 24(2): 250-252.
- [3] 魏颖. 利用加速度计确定弹道修正弹的滚转姿态[D]. 南京理工大学, 2006.
- [4] 杜振宇, 石庚辰. 弹体飞行姿态测量方法探讨[J]. 探测与控制学报, 2002, 24(1): 53-56.
- [5] Honeywell. 1- and 2-Axis Magnetic Sensors HMC1001 / 1002.2001. [http:// www. Magnetic- sensors.com](http://www.Magnetic-sensors.com).