

# 星载 MHD 传感器灵敏度特性误差分析与模型验证<sup>\*</sup>

周海佳, 李得天

(兰州空间技术物理研究所真空技术与物理重点实验室 兰州, 730000)

**摘要** 磁流体动力学(magneto-hydro-dynamic,简称 MHD)传感器是测量航天器平台宽频微角颤振的关键器件之一。鉴于 MHD 传感器的误差与噪声特性会影响星载惯性导航系统的精度与分辨率,对所设计的 MHD 传感器进行误差分析与试验验证。采用样机数据分析与组件物理建模相结合的方法,分析与验证 MHD 传感器灵敏度特性与误差模型。结果表明:传感器的误差主要受到重力方向与温度条件的影响,并且该项误差对无温控 MHD 传感器的误差起决定作用;当温度变化较小时,变压器磁芯磁导率的工艺误差占总误差的一半;差分放大器的噪声对传感器噪声具有显著影响。

**关键词** 磁流体动力学传感器; 误差分析; 灵敏度; 模型验证

**中图分类号** TH825

## 引言

相对于航天器质心的幅度不大于 1"、频率为 1 Hz~1 kHz 的微角颤振,对高分辨率有效载荷的指向与性能具有显著影响<sup>[1]</sup>。在颤振源振动抑制与传递路径被动隔离等措施的基础上,采用适当方式的主动控制技术,例如快速导引镜<sup>[2]</sup>、主动式基座<sup>[3]</sup>等,是改善有效载荷指向精度的合理途径。MHD 传感器具有精度高、无机械活动件及结构紧凑等特点,不仅能满足卫星载荷主动控制回路信号反馈的要求,还可以用于激光通讯、地震监测等其他领域<sup>[4-5]</sup>。

MHD 传感器是基于液态金属 MHD 效应,通过由相对于磁场运动的导电流体表面电势差测量平台角速率的测量器件<sup>[6-7]</sup>。2006 年 1 月日本发射的先进对地观测卫星,采用了基于 ARS-12 测量的高带宽姿态估计方法<sup>[8]</sup>。2011 年,美国 Ball Aerospace & Technologies 公司提出了一种基于 ARS-15 的视轴稳定与后向扫描综合处理技术<sup>[2]</sup>。美国 ATA 公司采用 ARS 系列传感器设计了惯性测量单元 MIRU 系列,用于地面车辆瞄准、空基与天基飞行器以及深空卫星通讯的视轴颤振抑制<sup>[9-11]</sup>。

本研究的对象为 MHD 传感器的灵敏度误差估计与噪声结构。通过研究 MHD 效应的建模方

法,讨论了所设计 MHD 传感器的灵敏度特性,分析该传感器的误差来源,并提出相应的解决途径。通过试验与数据处理,对噪声模型进行了试验验证。

## 1 数学模型与试验方法

MHD 传感器包括磁回路组件、电极组件、变压器以及信号调理电路等,如图 1 所示。它的磁场由 2 块相对安装的钕铁硼永磁体产生,并且经过磁轭传导在导电流体内产生均匀的径向磁场。当导电流体与外壳(直接固连在平台上)产生相对转动时,导电流体上、下端产生感应电势<sup>[7]</sup>。该电压信号经过变压器与调理电路放大后变为输出电压数据。

### 1.1 MHD 效应数学模型

根据 Boussinesq 近似, MHD 传感器内的液态金属满足动量守恒方程<sup>[12-13]</sup>

$$\frac{D(\rho \mathbf{u})}{Dt} = -\nabla p + \mu_f \Delta \mathbf{u} + \mathbf{f} \quad (1)$$

其中: $D/Dt$ 为随体导数或者物质导数; $\mathbf{u}$ 为液态金属的速度矢量; $p$ 为压强; $\mu_f$ 为流体黏度系数; $\mathbf{f}$ 为流体所受到的外部作用力。

对于理想条件下的 MHD 效应,它所受到的外

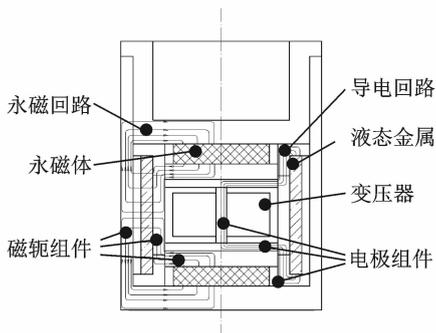


图1 MHD传感器的剖面图

Fig. 1 The profile of a MHD sensor

部作用力  $f$  为

$$f = \mathbf{J} \times \mathbf{B} \quad (2)$$

其中:  $\mathbf{J}$  为电流密度;  $\mathbf{B}$  为磁感应强度。

对于重力条件下的 MHD 效应,  $f$  可表达为

$$f = f_g + f_b + f_l = (\rho g + \rho g a (T - T_{\text{ref}})) \mathbf{n}_g + \mathbf{J} \times \mathbf{B} \quad (3)$$

其中:  $f_g$  为重力;  $f_b$  为浮力;  $\mathbf{n}_g$  为地表的重力方向矢量。

由于感生磁场  $\mathbf{B}_m$  相比外加磁场  $\mathbf{B}_{\text{out}}$  为高阶无穷小, 因此可以忽略磁场的变化量, 只考虑外加稳恒磁场的作用。根据 Boussinesq 近似, 忽略黏滞耗散和压强变化的贡献。电磁耗散所产生的热量相比热传导输送的热量也是无穷小, 可以忽略<sup>[14-15]</sup>。

MHD 的控制方程组可以表达为

$$\begin{cases} \rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho(\mathbf{u} \nabla) \mathbf{u} - \mu_f \Delta \mathbf{u} + \nabla p = f \\ \nabla \mathbf{u} = 0 \\ \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p \mathbf{u} \nabla T - \kappa \nabla^2 T = 0 \\ \varepsilon \nabla \mathbf{E} = 0 \\ \mathbf{E}_b = -\sigma \nabla V_m \\ \mathbf{J} = \sigma(\mathbf{E}_b + \mathbf{u} \times \mathbf{B}_0) \end{cases} \quad (4)$$

其中:  $\mathbf{E}$  为电场强度;  $\mathbf{E}_b$  为迁移电荷建立的电场强度;  $T$  为温度;  $V_m$  为电势;  $C_p$  为定压比热容;  $K$  为热导率。

对于理想 MHD 模型,  $\mu_f$ ,  $C_p$ ,  $\kappa$ ,  $\varepsilon$  和  $\sigma$  均为常数。对于地面 MHD 温度模型, 这些参数均为温度  $T$  的函数。

设边界的集合为  $\partial\Omega = \partial\Omega_1 + \partial\Omega_2 + \partial\Omega_3$ 。其中:  $\partial\Omega_1$ ,  $\partial\Omega_2$  分别为绝缘和导电边界;  $\partial\Omega_3$  表示入口与出口, 如图 2 所示。对于导电流体, 速度与电场的边界条件为

$$\begin{cases} \mathbf{u} \mathbf{n} |_{\partial\Omega_1} = 0 \\ \mathbf{u} |_{\partial\Omega_2} = 0 \\ \mathbf{u} \times \mathbf{n} |_{\partial\Omega_3} = \omega r \mathbf{n} \\ \mathbf{J} \mathbf{n} |_{\partial\Omega_1, \partial\Omega_2} = 0 \end{cases} \quad (5)$$

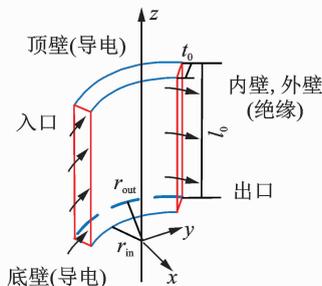


图2 导电环形流体的边界条件

Fig. 2 The boundaries of the annulus

对于恒定温度, 液态金属的温度边界条件设为

$$T |_{\partial\Omega} = T_0 \quad (6)$$

其中:  $T_0$  为边界温度值。

当顶壁与底壁存在温度梯度时, 液态金属的温度边界可以设为

$$\begin{cases} -\mathbf{n}(-\kappa \nabla T) |_{\partial\Omega_1, \partial\Omega_3} = 0 \\ T |_{\partial\Omega_2} = 293 + T'_0 \\ T |_{\partial\Omega'_2} = 293 \end{cases} \quad (7)$$

其中:  $T'_0$  为顶壁与底壁的温度差值;  $\partial\Omega'_2$  为液态金属的顶壁;  $\partial\Omega''_2$  为液态金属的底壁, 且  $\partial\Omega_2 = \partial\Omega'_2 + \partial\Omega''_2$ 。

## 1.2 试验测试与数据处理方法

2 个 MHD 传感器背靠背安装在转台上, 如图 3 所示。MHD 传感器原理样机的质量约为 1 kg, 外形尺寸为  $\varnothing 50 \text{ mm} \times 70 \text{ mm}$ 。所采用模数转换器为 12 比特, 采样频率为 2 kHz。

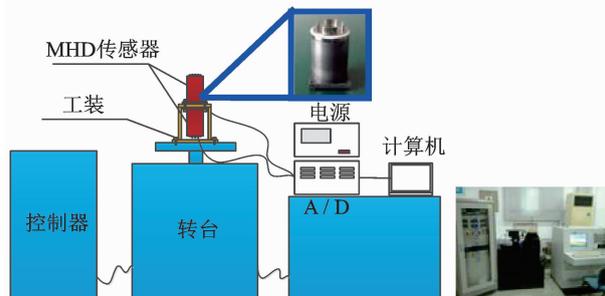


图3 MHD传感器测试系统

Fig. 3 Test system for MHD sensors

从噪声分析的角度看, 每组输出数据可以分为相干信号与非相干信号, 如图 4 所示。假设传感器随机噪声是各态历经、稳态随机的, 则通过相干函数, 可用 2 个输出电压数据 ( $V_{xx}(t)$  和  $V_{yy}(t)$ ) 提取

传感器噪声<sup>[16]</sup>。

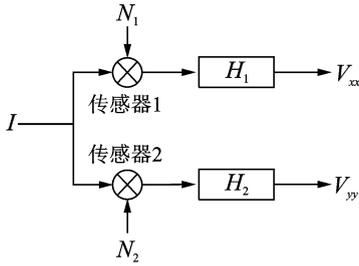


图 4 输出数据的结构模型

Fig. 4 The structure of signals in the output data set

2 组数据的振幅平方相干 (magnitude squared coherence, 简称 MSC)<sup>[17]</sup> 可以表达为

$$C_{xy}^2(\omega) = \frac{|P_{xy}(\omega)|^2}{P_{xx}(\omega)P_{yy}(\omega)} \quad (8)$$

其中:  $P_{xx}$  和  $P_{yy}$  为自噪声功率谱密度;  $P_{xy}$  为互噪声功率谱密度。

Welch 法被用来求解 MHD 传感器的 MSC 估计。该方法是一个有偏估计, 利用 Matlab 信号处理工具箱而实现<sup>[18]</sup>。

## 2 结果与讨论

### 2.1 基本模型

#### 2.1.1 MHD 效应

对于 0.01 Hz~10 kHz 之间的输入信号, 采用四参数最小二乘法进行拟合处理, 输出电压的幅频特性曲线<sup>[14]</sup> 如图 5 所示。经计算发现, 1 Hz~1 kHz 内的输出电压  $U$  与式(9)相符

$$U_p = \dot{\theta}_0 R_{\text{mean}} B_0 H_0 \quad (9)$$

其中:  $\dot{\theta}_0$  为输入角速率;  $R_{\text{mean}}$  为环形流体的平均半径;  $B_0$  为外加磁感应强度的实测值;  $H_0$  为环形流体的高度。

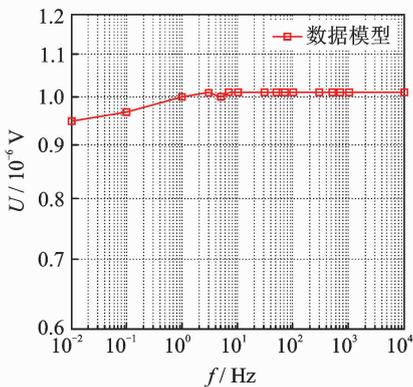


图 5 电压的幅频特性

Fig. 5 The magnitudes of the voltages in the frequency domain

#### 2.1.2 信号调理

MHD 传感器调理电路由模拟电路和数字电路构成, 如图 6 所示。模拟电路由内置变压器、差分放大器、放大器及低通滤波器等构成。

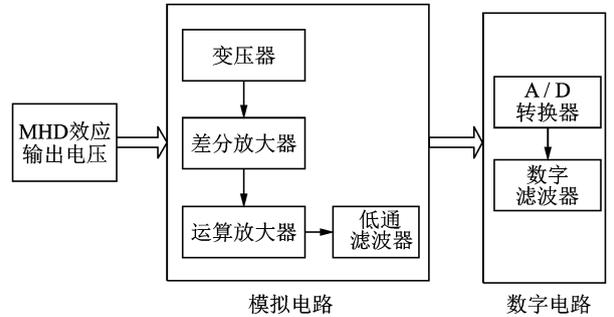


图 6 MHD 传感器调理电路的结构

Fig. 6 The structure of MHD sensor's conditioning circuit

模拟电路的传递函数<sup>[19]</sup> 可以表达为

$$H_c = \frac{A_{\text{ad}} A_{\text{op1}} A_{\text{op2}} (j\omega \sqrt{L_1 L_2})}{(R_1 + j\omega L_1)(1 + 3j\omega R_4 C_4 + (j\omega R_4 C_4)^2)} \quad (10)$$

其中:  $A_{\text{ad}}$ ,  $A_{\text{op1}}$  和  $A_{\text{op2}}$  分别为差分放大器、运算放大器和低通滤波器的通带放大倍数;  $L_1$ ,  $R_1$  和  $L_2$  分别为变压器的初级电感、初级电阻和次级电感;  $R_4$  和  $C_4$  分别为低通滤波的滤波电阻和电容。

采用 Matlab R2008a<sup>®</sup> 软件对调理电路传递函数模型的频谱特性进行分析, 如图 7 所示。从图中可以看出, 调理电路的通带放大倍数约为  $4.8 \times 10^5$ , 频带范围约为 1 Hz~1 kHz。

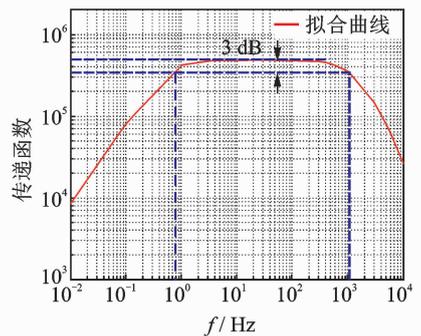


图 7 调理电路模型的传递函数频域曲线

Fig. 7 Transferring function of conditioning circuit model in the frequency domain

频率为 1 Hz~1 kHz 内的 MHD 传感器的灵敏度  $S$  可以表达为

$$S = \frac{U}{\dot{\theta}_0} = \frac{R_{\text{mean}} B_0 H_0 A_{\text{ad}} A_{\text{op1}} A_{\text{op2}} (j\omega \sqrt{L_1 L_2})}{(R_1 + j\omega L_1)(1 + 3j\omega R_4 C_4 + (j\omega R_4 C_4)^2)} \quad (11)$$

## 2.2 误差估计及其机制

### 2.2.1 结构误差对输出信号的影响

由于导电流体内壁的喷漆工艺带来了尺寸误差,因此  $R_{mean}$  的误差约为 0.071%。由于灌装水银时会引入直径约为 2 mm 的气泡,则高度误差约为 0.05%。根据式(9)可知

$$\frac{\Delta U_p}{U_p} = \frac{\Delta R_{mean}}{R_{mean}} + \frac{\Delta H_0}{H_0} = 0.121\%$$

由于包围导电流体结构的加工与装配误差将使得感应轴(即导电流体的对称轴)与传感器的名义轴(即设计的理想对称轴)存在误差,记为  $\theta_1$ ,如图 8 所示。由于传感器外加角速度的输入轴与传感器名义轴也存在失准,记为  $\theta_2$ 。因为目前传感器装配存在较大误差,因此只考虑  $\theta_1$ ,约为 0.3%。

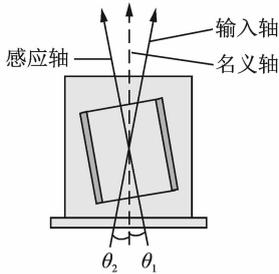


图 8 输入失准角

Fig. 8 Sketch of the mislignment angle

半径误差与输入角失准可以通过喷涂工艺优化进一步减小,而消除气泡可以降低高度误差。

### 2.2.2 温度对 MHD 效应的影响分析

图 9 给出了不同重力方向下温度和温差对导电流体输出特性的影响。当重力平行于  $-x$  轴时,输出电压在 20℃ 出现最小值,并且在 0℃ 和 40℃ 出现最大值。与平行于  $-x$  轴相比,当重力平行于  $-z$  轴时输出电压的变化较小。而在温差条件下,重力平行于  $-z$  轴的输出电压变化量要大于重力平行于  $-x$  轴。

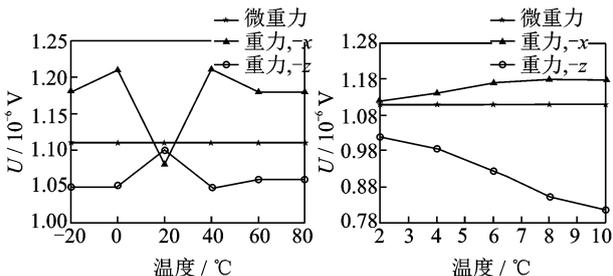


图 9 输出电压随恒定温度与温差的变化<sup>[14]</sup>

Fig. 9 Voltages on constant temperatures and under temperature differences<sup>[14]</sup>

当温度被控制在  $(20 \pm 0.5)^\circ C$ ,温度引起的 MHD 效应输出误差等于 3.7%。如果施加更加严格的温度控制,该误差可以更低。

### 2.2.3 温度对导磁回路的影响

温度对导磁回路影响的关键因素是永磁体的温度系数<sup>[14]</sup>。当 MHD 传感器温度控制在  $(20 \pm 0.5)^\circ C$ ,则磁场温度漂移引起的 MHD 效应输出变化误差约为 0.002%。

### 2.2.4 电路误差分析

变压器传递函数的误差可以表达为

$$\frac{\Delta H_i}{H_i} = \frac{\Delta L_2}{L_2} + \frac{\Delta R_1 + j\omega\Delta L_1}{R_1 + j\omega L_1} \quad (12)$$

$\Delta L_1$  和  $\Delta L_2$  均与磁芯磁导率的误差有关,并且最大误差可以控制在 3% 以内。磁芯磁导率的误差可以通过磁芯材料制作工艺的优化来降低。

变压器电阻与电感的温度漂移误差也需要考虑。根据式(12)可以得出,变压器传递函数误差约为 0.1%。

根据噪声在级联放大器中的传输规律可知<sup>[20]</sup>,MHD 传感器电路噪声与运算放大器之后的放大电路无关。噪声电路模型如图 10 所示。

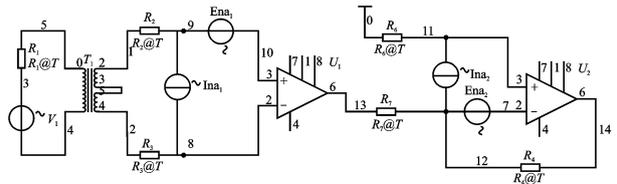


图 10 噪声电路模型

Fig. 10 Noise model of the circuit

均方输出噪声  $N_o$  可以表达为

$$N_o = (4kTR_1n^2m^2 + 4kT(R_2 + R_3)n^2m^2 + (2I_{na1}^2R_2^2 + E_{na1}^2)m^2 + (2I_{na2}^2R_7^2 + E_{na2}^2)m^2 + 4kT(R_6 + R_7)m^2 + 4kTR_4)B \quad (13)$$

其中:  $k$  为玻尔兹曼常数;  $T$  为热力学温度;  $n$  为变压器放大倍数;  $m$  为运放的放大倍数;  $I_{na1}$  和  $E_{na1}$  为差分放大器的偏置电流和噪声电压;  $I_{na2}$  和  $E_{na2}$  为运放的偏置电流和噪声电压;  $B$  为传递函数等效赫兹噪声带宽。

电路噪声可以通过提高差分放大器的放大倍数、改善调理电路的电磁兼容特性等措施来改善。

MHD 传感器的误差统计如表 1 所示。

## 2.3 试验验证

假设输出电压为  $U$ ,输入角位移振幅为  $\theta_0$ ,信号频率为  $f$ ,则传感器灵敏度  $S$  可以表达为

$$S = U/2\pi f\theta_0 \quad (14)$$

传感器灵敏度的不确定度  $\delta S$  可以表达为

$$\delta S = \frac{1}{2\pi\theta_0} \delta U + \frac{U}{2\pi f^2 \theta_0} \delta f + \frac{U}{2\pi f \theta_0^2} \delta \theta_0 \quad (15)$$

其中:  $\delta U, \delta f$  和  $\delta \theta_0$  分别为输出电压、信号频率和输入角位移振幅的不确定度。

表 1 MHD 传感器的误差统计  
Tab. 1 Error budget for MHD sensor

误差源		绝对值 误差/%	噪声/ %
结构误差	半径与高度	0.121	—
	输入轴失准	0.300	—
磁流体动力学, 温度波动	平行于 $z$ 轴	0.910	—
	平行于 $x$ 轴	3.700	—
磁流体动力学, 温差	平行于 $z$ 轴	0.910	—
	平行于 $x$ 轴	1.900	—
温度引起的磁场波动效应		0.002	—
变压器误差	工艺误差	6.000	—
	温度漂移引起误差	0.100	—
差分放大器		0.589	0.025
运算放大器		0.026	—
低通滤波器		0.520	—
A/D 转换器		—	0.007
合计		13.300	0.032

5~500 Hz 时 MHD 传感器原理样机灵敏度的幅频特性如图 11 所示。从图中可以看出,物理模型与原理想机的误差带发生叠加。在该频段内,原理样机与物理模型的灵敏度平均值分别为 48 和 47 V/(rad · s<sup>-1</sup>)。原理样机的误差平均值约为 5.2 V/(rad · s<sup>-1</sup>),而物理模型的误差平均值为 5.3 V/(rad · s<sup>-1</sup>)。

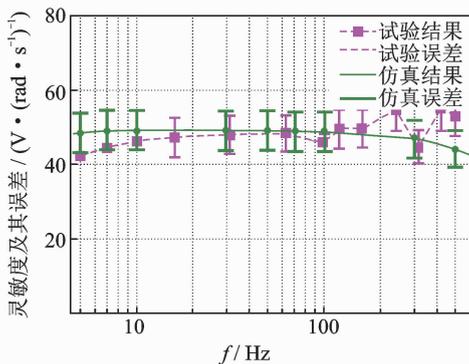


图 11 物理模型与原理想机输出电压与误差的幅频特性  
Fig. 11 Sensitivity of the model's and the prototype sensor in the frequency domain

图 12 为灵敏度因子随输入角速率幅值的变化。从图中可以看出,物理模型给出的灵敏度因子与输入角速率的幅值基本呈线性关系。2 条拟合直线的斜率分别约为 -5 和 -10 V/(rad · s<sup>-1</sup>)<sup>2</sup>, 它们的误差带基本重合, 并且原理样机的误差平均值约为

4.9 V/(rad · s<sup>-1</sup>), 物理模型的平均值约为 5.0 V/(rad · s<sup>-1</sup>)。

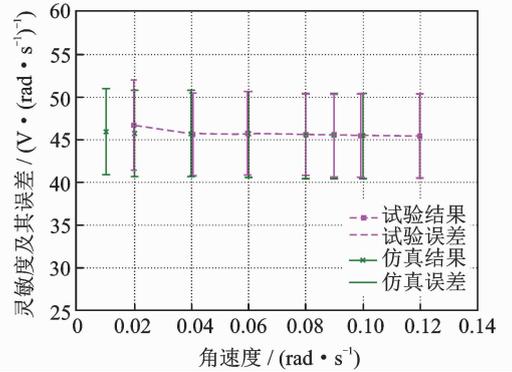


图 12 灵敏度误差的幅值线性度曲线

Fig. 12 Change rates of the sensitivities of the model and the prototype

采用数据长度为 8 192、重叠度为 1/2, black-man 窗函数的 welch 法, 对 MHD 传感器输出信号进行噪声分析<sup>[21]</sup>, 结果如图 13 所示。从图 13 中可以看出, 5~20 Hz 功率谱密度的最大值约为  $2.01 \times 10^{-3}$  V/Hz<sup>0.5</sup>, 20 Hz~1 kHz 之间的最大值约为  $2.31 \times 10^{-3}$  V/Hz<sup>0.5</sup>。

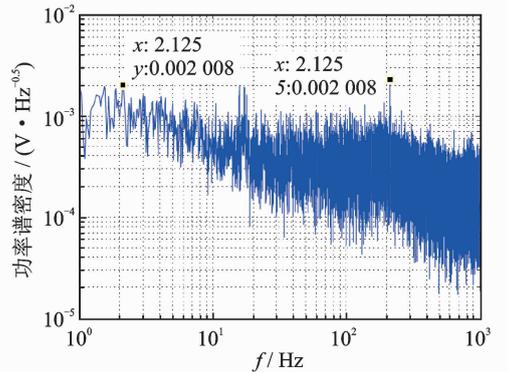


图 13 原理样机噪声的幅频特性

Fig. 13 Noises of the prototype sensor in the frequency domain

1 Hz~1 kHz 之间传感器的噪声水平约为 0.008 8 V/10 V=0.088%。该数值与理论模型的数值(0.032%)相接近, 说明噪声理论分析接近实际情况。1 Hz~1 kHz 之间原理样机的噪声比理论数值略大, 这可能是忽略了部分噪声源, 例如巴克豪森效应<sup>[22]</sup>、相干干扰等。

### 3 结 论

1) 所设计传感器的主要误差来源于生产工艺的不稳定, 例如变压器磁芯磁导率的不稳定性, 结构

误差等。当传感器制造工艺(变压器磁芯材料、装配工艺等)固化后,传感器误差可以大幅降低。

2) 在地面标定与测试过程中,温度波动对传感器灵敏度误差存在较大影响,通过增加温控措施可以降低温度的影响。

3) 传感器的噪声主要是由各部分电路结构放大倍数分配不合理造成的,适当提高差分放大器的放大倍数,改善调理电路的电磁兼容特性等,可以降低传感器的噪声水平。

### 参 考 文 献

- [1] 吕振铎,雷拥军. 卫星姿态测量与确定[M]. 北京:国防工业出版社,2013:1-20.
- [2] GUTIERREZ H L, GAINES J D, NEWMAN M R. Line-of-sight stabilization and back scanning using a fast steering mirror and blended rate sensors[C]// AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference. St. Louis, Missouri, USA; American Institute of Aeronautics and Astronautics Incorporation, 2011:1-8.
- [3] LIU C C, JING X J, DALEY S, et al. Recent advances in micro-vibration isolation [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2015, 56/57: 55-80.
- [4] LAUGHLIN D R. Angular motion sensor: US, 11/310, 4718276 [P],1988-01-12.
- [5] ROWLANDS N, ALDRIDGE D, ALLEN R, et al. The JWST fine guidance sensor [J]. Proceedings of SPIE, 2004, 5487:664-675.
- [6] MA H L, YAN Y C, WANG L L, et al. Laser frequency noise induced error in resonant fiber optic gyro due to an intermodulation effect [J]. Optic Express, 2015,23 (20):1-13.
- [7] 周海佳,李得天. 磁流体动力学角速率传感技术发展现状[J]. 真空与低温,2017,23(5):249-253.  
ZHOU Haijia, LI Detian. Research of magnetohydrodynamic angular rate sensing technology[J]. Vacuum and Cryogenics, 2017,23(5):249-253. (in Chinese)
- [8] IWATA T, KAWAHARA T, MURANAKA N, et al. High-bandwidth attitude determination using jitter measurements and optimal filtering[C]// AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference. Chicago, Illinois, USA; American Institute of Aeronautics and Astronautics Incorporation,2009:1-21.
- [9] ECKELKAMP-BAKER D, SEBESTA H R, BURKARD K. Magnetohydrodynamic inertial reference system[J]. Proceedings of SPIE, 2000, 4025: 99-110.
- [10] TAMERLER T, DOWLING J, DILLOW M, et al. A balloon payload for precision scoring of ground and airborne laser systems[C]// International Balloon Technology Conference. San Francisco, California, USA; American Institute of Aeronautics and Astronautics Incorporation,1997: 1-9.
- [11] KAUFMANN J, HAKIMI F, BOROSON D. Using a low-noise interferometric fiber optic gyro in a pointing, acquisition, and tracking system[J]. Proceedings of SPIE, 2013, 8610:86100.
- [12] 胡文瑞,徐昌硕. 微重力流体力学[M]. 北京:科学出版社,1999:67-153.
- [13] 吴其芬,李桦. 磁流体力学[M]. 长沙:国防科技大学出版社,2007:38-121.
- [14] 周海佳,李得天. MHD 传感器敏感结构地面温度特性数值分析[J]. 西北工业大学学报,2018,36:110-115.  
ZHOU Haijia, LI Detian. Numerical analysis of temperature sensitivity for sensitive mechanism of MHD sensor on ground[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2018, 36: 110-115. (in Chinese)
- [15] ZHOU H J, LI D T. The study of physical modeling and experimental method on the sensitivity of high-precision MHD sensor [C]// 2018 International Conference on Physics, Computing and Mathematical Modeling. Shanghai, China; DEStech Publication Incorporation, 2018:333-341.
- [16] PINNEY C, HAWES M A, BLACKBURN J. A cost-effective inertial motion sensor for short-duration autonomous navigation[C]// Proceedings of IEEE Position, Location and Navigation Symposium. Las Vegas, Nevada, USA; IEEE, 1994:591-597.
- [17] 周浩敏,王睿. 测试信号处理技术[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2009:56-103.
- [18] Matlab help: spectral estimation method [EB/OL]. [2016-12-10]. <http://cn.mathworks.com/help/signal/ug/spectral-analysis.html>.
- [19] HWEI P H. Schaum's outlines signals and systems[M]. New York: McGraw-Hill Company, 1995:75-108.
- [20] NORTHROP R B. Introduction to instrumentation and measurements [M]. Florida, USA: CRC Press, 2009:123-184.
- [21] 张振华,杨雷,庞世伟. 高精度航天器微振动力学环境分析[J]. 航天器环境工程, 2009,26(6):528-534.  
ZHANG Zhenhua, YANG Lei, PANG Shiwei. Jitter environment analysis for micro-precision spacecraft [J]. Spacecraft Environment Engineering, 2009, 26(6):528-534. (in Chinese)
- [22] LO C C H, KINSER E R, JILES D C. Analysis of barkhausen effect signals in surface-modified magnetic materials using a hysteretic-stochastic model[J]. Journal of Applied Physics, 2006, 9:1-3.



**第一作者简介:**周海佳,男,1983年1月生,博士生、工程师。主要研究方向为航天器微振动测量技术。

E-mail:zhouhj2001@163.com

