

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2108095

多泵磁流体动力学角速度传感器的低频拓展设计研究*

纪 越^{1,2}, 闫国忠^{1,2}, 李醒飞³, 张彦鹏^{1,2}

(1. 天津工业大学控制科学与工程学院 天津 300387; 2. 天津工业大学天津市电气装备智能控制重点实验室
天津 300387; 3. 天津大学精密测试技术及仪器国家重点实验室 天津 300072)

摘要:针对磁流体动力角速度传感器对低频(<1 Hz)信号检测性能差的问题,在原有的角速度传感器的基础上提出了一种含多磁流体动力泵的角速度传感器。采用改进传感器机械结构的方法,在流体通道边缘周向上均匀构建多个磁流体动力泵,并优化了流体泵磁极形状,以提高流体传感环中径向流速分布大小与稳定性,增强低频下科里奥利力效应。仿真与实验结果表明设计的多泵结构传感器相比于单泵结构,径向流速分布提高了20.28%,流体泵通道磁场均匀度增加了38.36%。测试实验中施加补偿电流后,传感器可以实现对低频角速度信号的检测,全通带范围内幅值波动误差小于0.5%,相位差减小到0~10°范围内。

关键词:角速度传感器;磁流体动力学;低频检测;多磁流体泵结构;科里奥利力

中图分类号: TH73 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 460.4020

Research on low frequency extension design of the magnetohydrodynamic angular velocity sensor with multiple magnetohydrodynamic pump

Ji Yue^{1,2}, Yan Guozhong^{1,2}, Li Xingfei³, Zhang Yanpeng^{1,2}

(1. School of Control Science and Engineering, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300387, China;

2. Tianjin Key Laboratory of Intelligent Control of Electrical Equipment, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300387, China;

3. State Key Laboratory of Precision Measuring Technology and Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: To improve performance of the magnetohydrodynamic angular velocity sensor in detecting signals at low frequency (<1 Hz), a new magnetohydrodynamic angular velocity sensor with multiple magnetohydrodynamic pumps is proposed, which is based on the magnetohydrodynamic angular velocity sensor. In the aspect of improving the mechanical structure, three magnetohydrodynamic pumps are constructed uniformly around the edge of the fluid channel. To enhance the Coriolis force effect at low frequency, the magnetic pole shape of the fluid pump is optimized to improve the magnitude and stability of the radial flow velocity distribution. Compared with the single pump structure, the simulation and experiment results of the designed structure with multiple MHD pumps show that the radial velocity distribution is increased by 20.28%, and the magnetic field uniformity of fluid pump channel is increased by 38.36%. Results indicate that the modified sensor with the applied low frequency compensation current can detect the angular velocity signal at low frequency. Through the whole bandwidth, the amplitude fluctuation error is less than 0.5%, and the phase difference is reduced to the range of 0~10°.

Keywords: angular velocity sensor; magnetohydrodynamics; low frequency detection; multiple magnetohydrodynamic pump structure; Coriolis force

0 引言

目前,高精度航天器在轨工作期间受空间物理环境

和挠性部件机械运动的影响,会产生宽频带、低幅值的微振动^[1],称为空间结构微角振动,限制了航天器有效载荷技术与高精度姿态稳定精度进一步的提升^[2]。基于磁流体动力学效应(magnetohydrodynamics, MHD)的角速度传

收稿日期:2021-06-15 Received Date: 2021-06-15

*基金项目:国家自然科学基金(62173245, 61733012)项目资助

感器具有低噪声、宽频带和抗冲击等特性,适合于宽频带、低幅值空间结构微角振动的测量^[3]。美国 ATA 研究机构研发了一系列型号的 MHD 角速度传感器已得到广泛应用,如 1991 年,美国中继卫星反射镜实验 RME^[4-5],2006 年,美国海洋大气局(NOAA)与宇航局(NASA)新一代静止轨道卫星 GOESN^[6],2013 年美国 NASA 在月球激光通信演示系统 LLCD^[7]上,均使用了 MHD 角速度传感器进行微角振动信息测量。

虽然 MHD 角速度传感器的带宽可达 1 kHz,但面临着低频(<1 Hz)信号检测性能不佳的问题^[8]。为解决低频性能差的问题,国内外相关机构做了大量研究。1990 年,ATA 研究机构的 Laughlin 等使用低频角速度陀螺仪与 MHD 传感器相配合,对两个传感器的输出信号进行融合实现卫星稳定平台低频角速度测量^[9]。2006 年,日本的先进陆观测卫星 ALOS^[10-11],将 MHD 角速度传感器与星敏感器和陀螺仪配合进行低频角速度的测量。2013 年,美国 NASA 在月球激光通信演示系统 LLCD 上,将高精度 MEMS 陀螺仪配合 MHD 角速度传感器 ARS-14 输出信号完成组合测量^[12]。国内对低频拓展技术的研究开展较晚,2015 年,北京遥测技术研究所设计了 MHD 角速度传感器检测电路^[13],以提高微弱信号检测性能,拓展传感器的工作带宽。2015 年,天津大学张少强等^[14]对卡尔曼滤波算法改进,使用 MEMS 陀螺仪与 MHD 传感器完成信号的融合,提高了 MHD 角速度传感器在低频区的性能。2018 年,天津大学周新力等^[15]通过混叠滤波器融合 MHD 角速度传感器与 MEMS 陀螺仪信号的方法,补偿 MHD 角速度传感器的低频误差。以上利用补偿电路、采用低频陀螺仪进行信号融合方法均为在信号输出端处理,受传感器自身特性影响较大,并且不适合在快速的系统环境中应用^[16],限制了 MHD 角速度传感器的应用领域,并未从根本上改进传感器的低频性能。

想从根本上改善传感器的低频性能,就要通过改进 MHD 传感器机械结构实现传感器的低频拓展。1993 年,Laughlin 等^[17]设计了一种双层流体环的结构,并采用泵送流体径向流速的方法,引入科里奥利力效应,来解决传感器低频性能不佳的问题,但未见实验结果的详细数据。2018 年,天津大学与天津工业大学设计了一种与科里奥利力效应相结合的 MHD 角速度传感器,通过设计中心磁流体泵泵送流体在流体环内产生径向流速的方法有效地改善了传感器的低频性能^[18],并发现了科氏力效应与 MHD 效应叠加时在频域上存在抖动误差。

为了更有效地实现两种效应的叠加,本文设计一种含多磁流体动力泵结构的 MHD 角速度传感器,通过在传感器流体通道边缘周向上均匀构建多个磁流体动力泵,提高传感流体环内径向流速的分布大小与稳定性,低频下诱导更稳定的科里奥利力效应,达到提高 MHD 传感器低频检测性能。

1 多泵 MHD 角速度传感器工作原理及控制方程组

1.1 MHD 传感器工作原理

MHD 角速度传感器的工作原理是利用导电流体在旋转磁场中切割磁感线产生电动势^[19],如图 1 所示。导电流体位于环形封闭流道内,流体通道上下壁面绝缘,内外壁面导电。当传感器以角速度 ω 旋转时,由于导电流体惯性较大相对惯性坐标系静止,同永磁体形成相对速度切割轴向磁感线,产生与角速度成正比的径向感应电动势 E 。

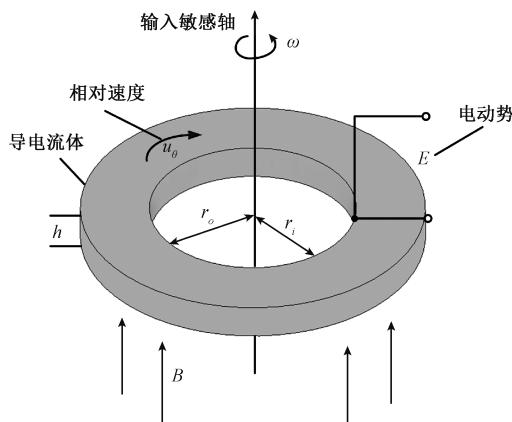


图 1 MHD 角速度传感器工作原理

Fig. 1 Working principle of the MHD angular velocity sensor

1.2 MHD 传感器控制方程组

MHD 角速度传感器模型,研究的是导电流体在磁场作用下的运动规律,需将控制导电流体运动的流体力学方程与导电流体电磁学方程耦合求解^[20]。根据磁流体力学理论,主要遵循以下形式的控制方程组:

$$\frac{dp}{dt} + \rho \nabla \cdot \mathbf{v} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \frac{d\mathbf{v}}{dt} = -\nabla p + \nabla \cdot (2\mu_f \mathbf{S}) - \frac{2}{3} \nabla (\mu_f \nabla \cdot \mathbf{v}) + \mathbf{J} \times \mathbf{B} \quad (2)$$

$$\mathbf{J} = \sigma (\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) \quad (3)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (4)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = \mu \mathbf{J} \quad (5)$$

方程组中分别是连续方程、运动方程、欧姆定律、法拉第电磁感应定律和安培定律,其中 \mathbf{v} 为流速, p 为压强, \mathbf{J} 为电流密度, \mathbf{B} 为磁感应强度, \mathbf{E} 为电场强度。 ρ , μ_f , σ 和 μ 分别代表的是流体的密度、动力粘度、电导率和磁导率。

1.3 MHD 传感器简化模型

在传感器模型中,周向流动是流体环主要的流动方向,且各分量关于 z 轴对称。在简化中,针对流体环需要进行以下3种假设:

1) 流体轴向流速相对周向流速足够小,径向流速为恒定值,忽略二次流现象。

2) 流体环内周向流动等效为泊肃叶流动。

3) 忽略流体流动引起的诱导磁场和诱导电场。

根据以上3个假设条件可得输出电动势与输入角速度的关系。

1) 简单流体环简化模型

在理想情况下,MHD 角速度传感器简化传递函数表达式^[21]为:

$$\frac{E(s)}{\omega(s)} = \frac{\mathbf{B}Wrs}{s + \nu(1 + H^2)/h^2} \quad (6)$$

其中: \mathbf{B} 为磁感应强度(T); E 为感应电动势(V);如图1所示, W 为流体通道有效宽度, $W = r_o - r_i$ (m); r 为流体环半径均方值 $r = \sqrt{r_o^2 + r_i^2}$ (m); ω 为敏感轴输入角速度(rad/s); ν 为导电流体的运动粘度系数(m²/s); h 为流体环通道的高度(m); H 为流体在环形通道结构下的哈特曼常数, $H = Bh/\sqrt{\rho\nu\eta}$ 无纲量; ρ 为磁流体的密度(kg/m³); η 为导电流体的电阻率(Ω·m)。

由式(6)可知MHD 角速度传感器的幅频特性类似于高频滤波器,交接频率为

$$\omega_{bs} = \nu(1 + H^2)/h^2 \quad (7)$$

当输入信号频率低于 ω_{bs} 时,传感器标度因数较差且存在着相位差。

2) 带泵流体环简化模型

当角速度 ω 为低频(<1 Hz)时,导电流体难以与惯性空间保持相对静止,通过磁流体动力泵在流体环中引入径向流速 u_r ,低频下引发导电流体的科里奥利力效应(Coriolis force effect),增加相对速度^[21],如图2所示。实现MHD 角速度传感器对低频检测性能的提高。本文中,将此传感器简写为C-MHD 角速度传感器。

由于流体环中引入了径向流速 u_r ,在进行简化模型推导中,将流体环中的径向流速视作恒定量,与施加的角速度等参量无关。

此时,带磁流体泵的C-MHD 角速度传感器简化传递函数表达式为:

$$\frac{E(s)}{\omega(s)} = \frac{\mathbf{B}W(rs + 2u_r)}{s + \frac{\nu}{h^2} + \frac{\sigma\mathbf{B}^2}{\rho}} = \frac{\mathbf{B}Wrs + 2\mathbf{B}Wu_r}{s + \nu(1 + H^2)/h^2} \quad (8)$$

径向流速 u_r 满足 $u_r = r \cdot \nu(1 + H^2)/2h^2$ 时,式(8)可

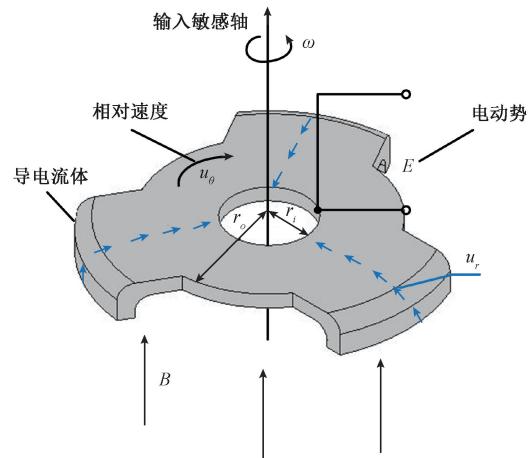


图2 C-MHD 角速度传感器工作原理

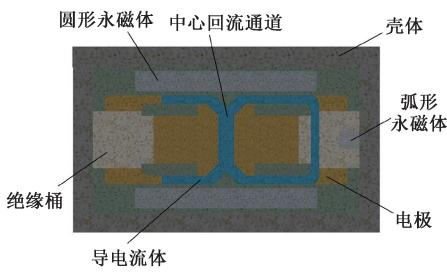
Fig. 2 Working principle of the C-MHD angular velocity sensor

简化为式(9),传感器通过引入的径向流速达到全频带上的测量。

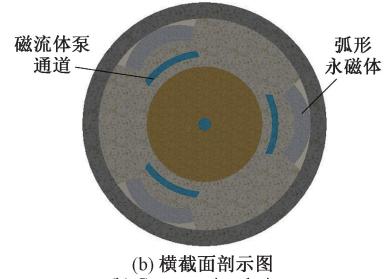
$$E(s) = \mathbf{B}Wr\omega(s) \quad (9)$$

2 MHD 角速度传感器结构设计

传感器的结构设计主要以永磁体为导电流体提供有效磁场区域为导向,图3(a)所示,上、下两个圆柱永磁体为传感器流体环提供轴向磁场。



(a) 轴截面剖示图
(a) Axial cross-sectional view



(b) 横截面剖示图
(b) Cross-sectional view

图3 多泵 C-MHD 角速度传感器结构
Fig. 3 Structure of the C-MHD angular velocity sensor with multi pumps

磁流体泵通道为弧形,如果使用圆柱形磁体,则磁铁边缘与流体通道相距较远,气隙较大,磁场利用率不高。如图 3(b)所示,径向磁场使用弧形永磁体,与流体泵通道贴合,减小气隙,提高磁场的利用率。

COMSOL 仿真得到的磁流体泵通道径向磁场的磁通密度对比如图 4 所示,不增加传感器直径的条件下,与圆柱形永磁体相比,采用弧形永磁体的流体泵通道有效磁感应强度区域更大,有效面积增加了 38.36%。

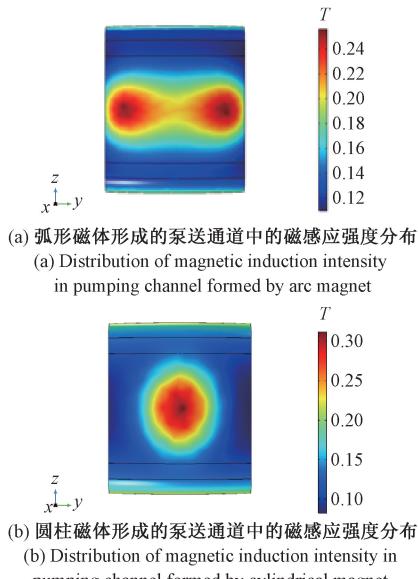


图 4 流体泵通道磁感应强度分布

Fig. 4 Distribution of magnetic induction intensity in fluid pump channel

C-MHD 传感器的闭合磁路由两部分构成,传感磁路由上传感环磁路与下传感环磁路组成;磁流体泵磁路为 3 个对称分布的磁流体泵。

COMSOL 仿真得到传感器磁通密度流线分布,如图 5(a)中,轴截面显示传感器内部形成上、下两组对称的闭合磁路,上、下传感环形通道中磁力线均匀竖直向上。图 5(b)中,横截面磁场分布较均匀,磁流体泵处的磁感线基本上均匀分布的垂直穿越了流体泵通道。

3 传感器数值仿真分析

课题组之前在文献[12]中的设计的中心单磁流体动力泵的 MHD 角速度传感器,以流体环圆周为回流通道,由于单泵的中心泵为狭窄的矩形通道。如图 6 所示,在环形通道内诱发的径向流速由中心向圆周流动时存在着不均匀问题,本文通过在流体环边缘上设计了 3 个以 120°对称分布的磁流体动力泵,提高传感流体环中的径

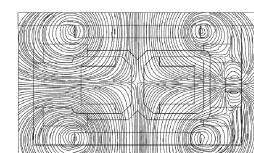


图 5 C-MHD 角速度传感器磁力线分布图

Fig. 5 Magnetic line distribution of the C-MHD angular velocity sensor

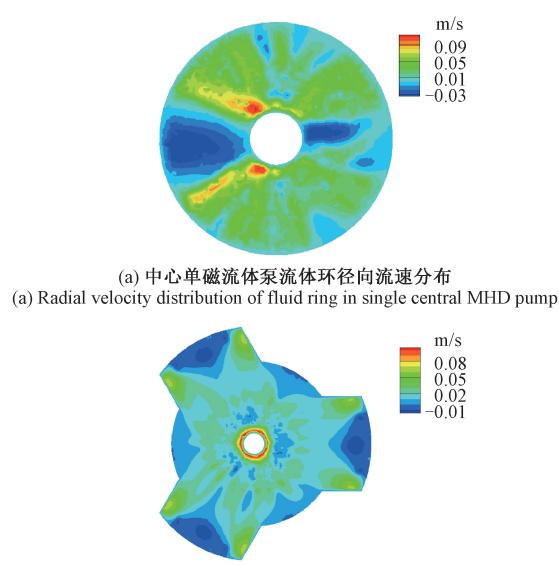


图 6 单泵与多泵结构流体环径向流速分布对比图
Fig. 6 Comparison of radial velocity distribution between the MHD sensors with single pump and multi pump

向流速分布均匀性,优化低频下径向流速诱导的科里奥利力效应,多泵传感环内径向流速均匀度相比单泵提高了 20.28%。

当未施加补偿电流,频率为 0.01 Hz 时,流体环内绝对周向流速分布呈层流特征,如图 7 所示,角速度峰值时流体环内流速由环内向环外逐渐递增;角速度谷值时流体环内流速由环内向环外逐渐递减,流体呈现为层流特性。

当施加补偿电流 3 A,频率为 0.01 Hz 时,流体环内引入了径向流速产生了科里奥利力效应,加速周向流体

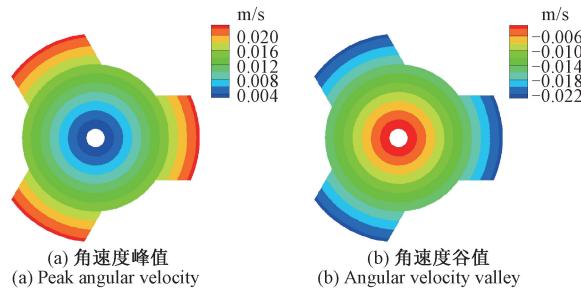


图 7 0.01 Hz 电流 0 A 流体环绝对周向流速
Fig. 7 The absolute circumferential flow rate of 0.01 Hz and 0 A fluid ring

流动,流体环内的周向流速分布更加均匀。如图 8 所示,径向流速从流体泵通道流入上下流体环,对称突出分布的流体泵通道的流速绝对值大于环内周向流速。

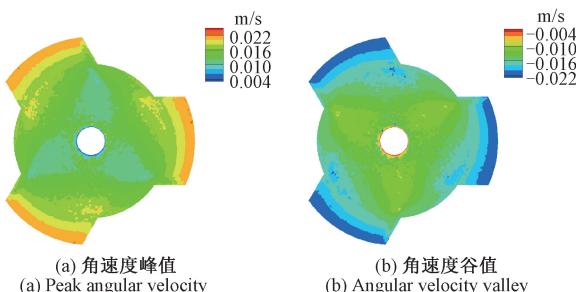
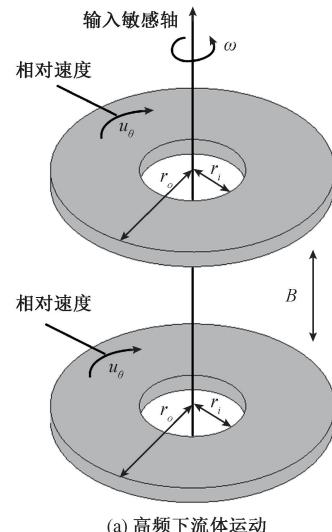


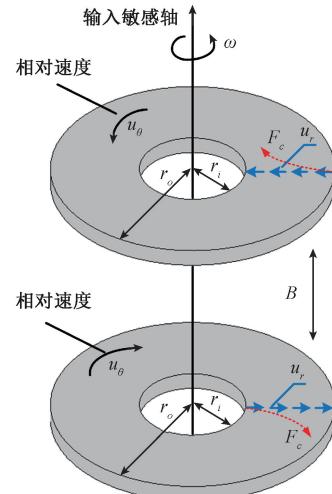
图 8 0.01 Hz 电流 3 A 流体环绝对周向流速
Fig. 8 0.01 Hz and 3 A fluid ring absolute circumferential flow rate

C-MHD 角速度传感器上、下流体环彼此平行且同轴,所受磁极反向相反。当高频段 $\omega > 1 \text{ Hz}$ 时,上、下流体环内周向流速为惯性相对流动方向相同,则瞬时切割磁感线所产生的电动势为反向,如图 9(a)所示,当低频段 $\omega < 1 \text{ Hz}$ 时,磁流体动力泵在流体环引入径向流速,在低频下诱导科里奥利力效应,增加流体相对周向流速,上流体环径向流速方向由环外向环内,下流体环径向流速方向由环内向环外,上、下流体环内圆周流速方向相反,则瞬时切割磁感线所产生的电动势为同向,如图 9(b)所示。

$I=3 \text{ A}$ 和 $I=0 \text{ A}$ 的数值仿真得到的频域响应曲线如图 10 所示,补偿电流为 3 A 时,频率 $< 0.5 \text{ Hz}$ 时传感器幅频特性得到了改善,同频率 $> 1 \text{ Hz}$ 的幅频特性曲线相类似,但相位曲线在 $0.5 \sim 1 \text{ Hz}$ 之间有相位差会出现抖动。频率 $< 0.5 \text{ Hz}$ 下经电流补偿相位差逐渐减小但大于 0,随着频率的逐渐增加,当频率 $> 0.5 \text{ Hz}$ 时,相位差开始变大,到 1 Hz 后相位开始减小。频率 $0.5 \sim 1 \text{ Hz}$ 之间相位差比 $< 0.5 \text{ Hz}$ 和 $> 1 \text{ Hz}$ 频率区间要略大,这说明在 $< 1 \text{ Hz}$ 时通过引入科氏力效应可提高传感器性能,但在 1 Hz 处



(a) 高频下流体运动
(a) Fluid movement at high frequency



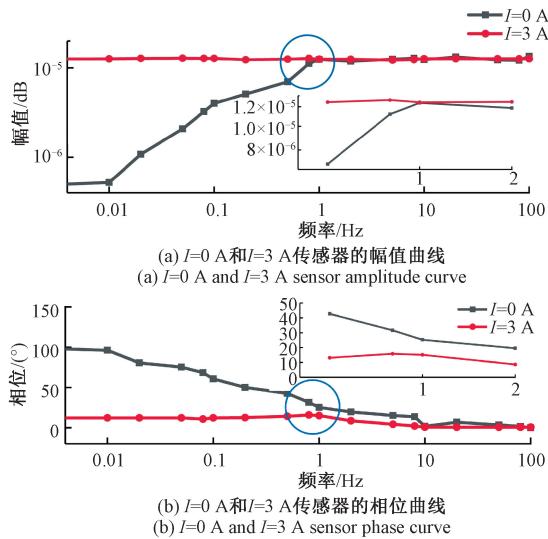
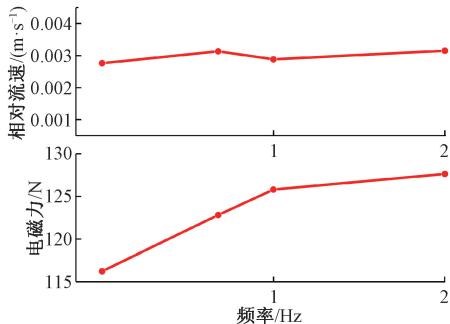
(b) 低频下流体运动
(b) Fluid movement at low frequencies

图 9 流体环周向流速分析
Fig. 9 Circumferential velocity analysis of fluid ring

相频曲线出现了波动,此径向流速引发的科氏力效应与 MHD 效应的截止频率略有不同,出现两种效应叠加中频率响应过渡区的波动。

从理论模型角度分析频域响应曲线的抖动误差,MHD 角速度传感器解析表达式(6)是基于径向流速 u_r ,远小于周向流速得出的,进而引入科里奥利力,得到两种效应叠加的解析表达式(8),而当径向流速 u_r 满足设定条件时,MHD 效应与低频下径向流速引起的科氏力效应的截止频率才可以完全相同。然而在实际补偿过程中,补偿诱发的径向流速 u_r 达 0.029 m/s ,无法满足叠加中截止频率完全一致的流速前提假设。

进一步通过抖动频段的电磁力分析进行验证,分析电流 $I=3 \text{ A}$ 时, $0.2 \sim 2 \text{ Hz}$ 区间内流体环内的相对流速与电磁力曲线如图 11 所示。在 $< 1 \text{ Hz}$ 频带内,在科氏力效

图 10 $I=0$ A 和 $I=3$ A 传感器的幅相曲线Fig. 10 $I=0$ A and $I=3$ A sensor amplitude and phase curve图 11 $I=3$ A 时 1 Hz 附近的相对流速和电磁力曲线Fig. 11 Relative flow velocity and electromagnetic force curve near 1 Hz when $I=3$ A

应的作用下相对流速得到提高,阻碍相对流动的电磁力也逐渐增加,在 1 Hz 附近流体的相对流速由科氏力加速和电磁力减速共同作用出现波动,之后频率逐渐增加相对流速趋于稳定,电磁力在 >1 Hz 后也趋于稳定。

4 角速度传感器测试实验

实验平台如图 12 所示,将 C-MHD 角速度传感器安装在角速度转台上,利用直流电流源为传感器的磁流体动力泵提供补偿电流,稳压源为放大电路供电,利用 NI 公司的数据采集卡,分别采集不同频率下转台输入角速度和传感器的输出信号并实时上传到 LabVIEW 实现两个信号同步采集处理。

传感器样机测试实验在角速度平台上采用正弦角速度激励信号,旋转角速信号的幅值为 $60^{\circ}/s$,补偿电流源分别为 0、3 和 6 A,并在 0.01~20 Hz 的频率范围内进行测试。其中选取了在数值仿真结论使传感器达到低频补偿

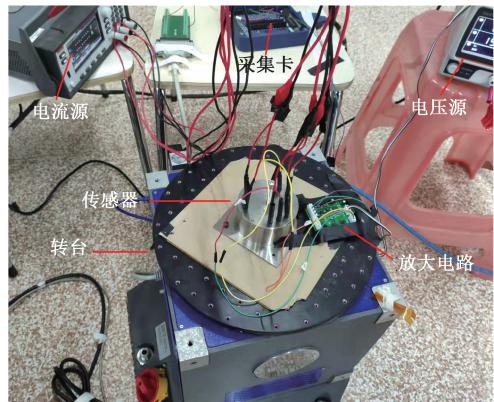


图 12 传感器及实验平台

Fig. 12 Sensor and experimental platform

的 3 A 电流下,选取了扫频带宽上的测试频率为 0.1 Hz(低频)、1 Hz(交接频率)和 5 Hz(高频)3 个特定频率点下 C-MHD 角速度传感器的信号输出如图 13 所示。

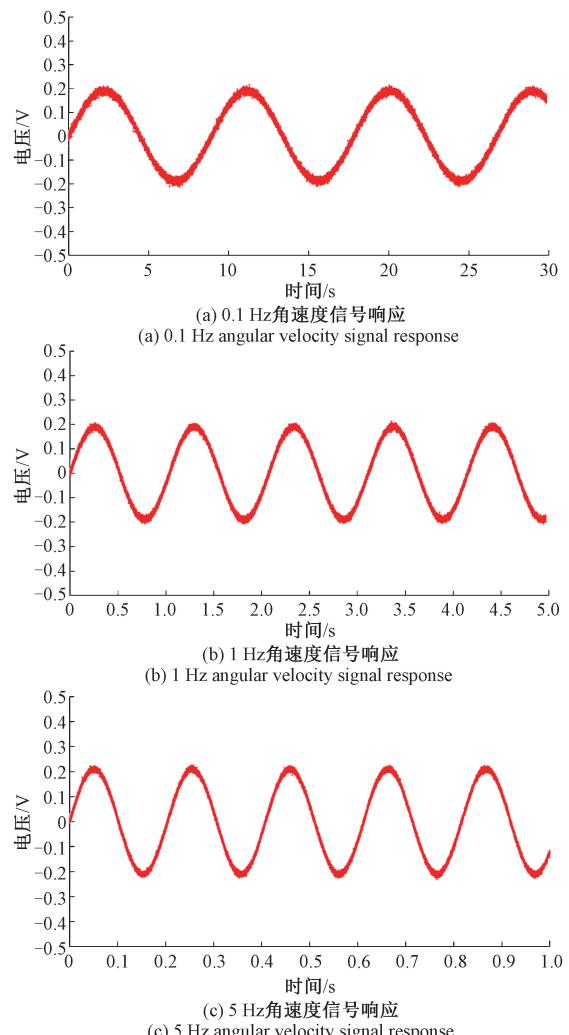


图 13 传感器时域信号输出

Fig. 13 Sensor time domain signal output

0.1、1和5 Hz下信号输出波形上存在着噪声较为明显,其噪声可能来源于传感器信号输出引线,传感器内部机械装配较为复杂,传感器的顶部与底部都放置了永磁铁,所以输出信号引线要从传感器圆周处引出,信号的输出经过了放大电路转送到数据采集卡中,由于传感器的全部引线由顶部引出,所以微弱信号放大电路放置于外侧并在加速度转台上,当转台以某个测试频率转动时,放大电路会受到影响,同时,转动过程中输出引线也在随转台摆动,产生噪声。

在0.01~20 Hz频率范围内,施加补偿电流为0、3和6 A的测试实验幅相曲线如图14所示,0 A为未施加补偿电流,3 A为数值仿真理论补偿电流,6 A为过度补偿电流。由于传感器输出的波形信噪比较差,样机实际测量下的幅值比和相位差存在着偏差,其幅频响应曲线并非像数值仿真中那样平滑,但3个不同大小电流下的幅频特性曲线的趋势还是可以说明磁流体泵所产生的径向流速诱导科里奥利效应的作用。

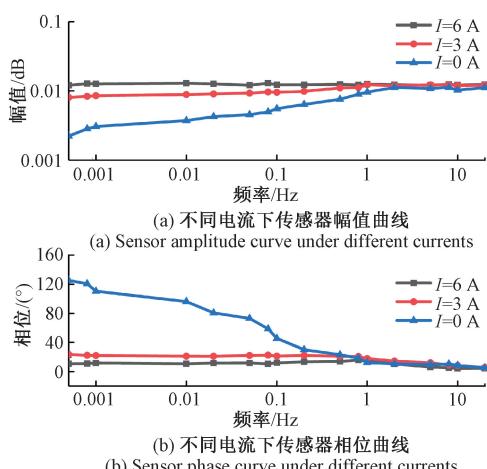


图14 不同电流下传感器幅相曲线

Fig. 14 Sensor amplitude-frequency characteristic curve under different currents

$I=0$ A,频率(<1 Hz)时,幅值曲线缓慢增加,并且幅值增加的较小,相位差较大,频率(>1 Hz)后,幅值曲线趋于直线,相位差开始减小。低频下传感流体环内,未引入科里奥利力效应,导电流体无法有效切割磁感线,信号输出响应较差。当高频时,传感流体环内的周向流速逐渐增加,恢复到正常状态; $I=3$ A,在频率(<1 Hz)时,幅值曲线得到了增加,相位差得到大幅减小,幅值曲线在(<1 Hz)下并非为平滑的直线。这与数值仿真 $I=3$ A中的结果有所差别,幅值曲线在(<1 Hz)下并非直线可能由于机械加工得到的零件表面具有粗糙度,装配而成的流体通道表面并不平滑,低频下磁流体泵工作泵送导电流体与流道壁面的摩擦力变大,增加了磁流体泵工作需

要克服的阻力;增大补偿电流 $I=6$ A时,在测量带宽上幅频特性曲线趋于一条直线,相位差相比于 $I=3$ A下得到减小,但频率0.1~1 Hz区间内,其相位差开始小幅增加,幅值特性曲线也出现了波动,同数值仿真分析中的现象相近似,实验结果证明了在1 Hz频带附近,低频下科里奥利效应与高频下MHD效应发生叠加,使传感器截止频率发生了变化,相位差出现波动。

5 结 论

本文设计了一种基于磁流体动力学结合科氏力效应的多流体泵角速度传感器,针对传感流体环内径向流速分布不均的问题,设计了在流体通道边缘对称分布的3个磁流体动力泵,由于流体泵通道与圆柱永磁体之间间距不等,造成磁场分布不均,对流体泵磁极形状进行优化,使用弧形永磁与流体泵通道贴合,减小气隙,增强流体泵通道磁场均匀度,与圆柱永磁体相比,采用弧形永磁体流体泵通道磁场均匀度增加了38.36%。与单泵传感器结构的传感器相比,多泵传感环内径向流速均匀度提高了20.28%。通过样机测试实验,验证引入径向流速引发的科氏力效应提高了传感器的低频(<1 Hz)信号的测量。而在1 Hz处频率交接段MHD效应与科氏力叠加作用存在抖动误差,在后续的研究中将通过信号处理和其他研究方式将抖动误差减弱。由于多泵增加了供电线路导致时域信号上噪声有所增加,在进一步的研究中需要对信号输出端与电路噪声进行有效的控制。

参考文献

- [1] JI Y, DU Y, YAN G Z, et al. Adaptive kalman filter enhanced with spectrum analysis for wide-bandwidth angular velocity estimation fusion [J]. IEEE Sensors Journal, 2020, 19(20): 11527-11536.
- [2] WU Y J, LI X F, LIU F, et al. An on-orbit dynamic calibration method for an MHD micro-angular vibration sensor using a laser interferometer[J]. Sensors, 2019, 19(19): 4291.
- [3] LI X F, HAN J C, LIU F. Signal fusion method of MHD-MEMS based on Allan variance decoupling adaptive filter[J]. Editorial Department of Journal of Chinese Inertial Technology, 2020, 28(2): 237-241.
- [4] YANG Y C, YAMAMOTO K, HUARCAYA V, et al. Single-element dual-interferometer for precision inertial sensing[J]. Sensors, 2020, 20(17): 4986.
- [5] SAKSTEIN J. Tests of gravity with future space-based experiments [J]. Physical Review, 2018, 97(6): 064028.
- [6] MILLER S, KIRCHMAN P, SUDEY J. Reaction wheel operational impacts on the GOES-N jitter

- environment[C]. AIAA Guidance, Navigation and Control Conference and Exhibit, 2007: 6730-6736.
- [7] ARNOLD H, ERNER M. Applied technology associates, optical reference units[C]. Spie Lase, 2014, 10(6): 82-94.
- [8] JI Y, LI X, WU T, et al. Theoretical and experimental study of radial velocity generation for extending bandwidth of magnetohydrodynamic angular rate sensor at low frequency[J]. Sensors, 2015, 15(12): 31606-31619.
- [9] BARANOV P, NESTERENKO T, BARBIN E, et al. A novel multiple-axis MEMS gyroscope-accelerometer with decoupling frames[J]. Sensor Review, 2019, 39(5): 670-681.
- [10] IWATA T, KAAWAHARA T, MURANAKA N, et al. High-Bandwidth pointing determination for the advance land observing satellite (ALOS) [C]. AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference, 2009, 9(3): 10-13.
- [11] IWATA T. Precision attitude and position determination for the advanced land observing satellite (ALOS) [J]. Journal of Aerospace Engineering, 2012, 4(3): 62-74.
- [12] 徐梦洁,李醒飞,吴腾飞,等.磁流体动力学陀螺仪的结构设计与实验研究[J].仪器仪表学报,2015,36(2):394-400.
- XU M J, LI X F, WU T F, et al. Structural design and experimental study of magnetohydrodynamic gyroscope[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(2):394-400.
- [13] 廉杰,张瀚,金小锋,等.一种用于MHD角速度率传感器的检测装置:CN1054868845[P].北京:2016-04-13.
- LIAN J, ZHANG H, JIN X F, et al. A detection device for MHD angular velocity rate sensor: CN1054868845[P]. Beijing: 2016-04-13.
- [14] 张少强,李醒飞,吴腾飞,等.磁流体动力学角速度传感器低频误差分析及校正方法研究[J].传感技术学报,2015,28(11): 1634-1639.
- ZHANG SH Q, LI X F, WU T F, et al. Research on low frequency error analysis and correction method of magnetohydrodynamic angular velocity sensor[J]. Journal of Transduction Technology, 2015, 28(11): 1634-1639.
- [15] 周新力. MHD角速度传感器与MEMS陀螺仪组合测量方法的研究[D].天津:天津大学,2018.
- ZHOU X L. Research on combined measurement method of MHD angular velocity sensor and MEMS gyroscope[D]. Tianjin:Tianjin University, 2018.
- [16] 谢君,鲁妍池,刘宇童,等.磁性液体触觉传感器的设计及特性研究[J].仪器仪表学报,2021, 42(1): 30-38.
- XIE J, LU Y CH, LIU Y T, et al. Design and characteristics of magnetic fluid tactile sensor [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(1): 30-38.
- [17] LAUGHLIN D R. Low frequency angular velocity sensor: US5176030[P]. 1993-01-05.
- [18] JI Y, XU M, LI X, et al. Error analysis of magnetohydrodynamic angular rate sensor combining with coriolis effect at low frequency [J]. Sensors, 2018, 18(6): 1921.
- [19] 苏树强,李德才.新型磁流体水平传感器的研究与设计[J].电子测量与仪器学报,2016, 30(3):431-439.
- SU SH Q, LI D C. Research and design of a new magnetic fluid level sensor [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2016, 30 (3): 431-439.
- [20] JANG J, L S. Theoretical and experimental study of MHD (magnetohydrodynamic) micropump [J]. Sensors & Actuators A Physical, 2000, 80(1): 84-89.
- [21] LAUGHLIN D R. MHD sensor for measuring microradian angular rates and displacements: US6173611 [P]. 2001-01-16.

作者简介



纪越(通信作者),2011年于天津大学获得学士学位,2016年于天津大学获得博士学位,现为天津工业大学控制科学与工程学院副教授,硕士生导师,主要研究方向为先进传感理论与检测技术和智能化测量装备。E-mail: jiyue@tiangong.edu.cn

Ji Yue (Corresponding author) received her B. Sc. degree and Ph. D. degree both from Tianjin University in 2011 and 2016, respectively. She is currently an associate professor and a master advisor in the School of Control Science and Engineering at Tianjin Polytechnic University. Her main research interests include advanced sensing theory, detection technology and intelligent measurement equipment.



李醒飞,1988年于哈尔滨工程大学获得学士学位,1994年于东南大学获得硕士学位,2000年于天津大学获得博士学位,现为天津大学博士生导师,主要研究方向是多传感器融合技术、测试计量技术及仪器等。

E-mail: lixf@tju.edu.cn

Li Xingfei received his B. Sc. degree from Harbin Engineering University in 1988, received his M. Sc. degree from Southeast University in 1994, and received his Ph. D. degree from Tianjin University in 2000. He is currently a Ph. D. advisor at Tianjin University. His main research interests include the fusion technology of multi-sensors, measurement technology and instruments.