

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2412886

磁流体动力学角速度传感器研究综述*

拓卫晓^{1,2}, 蒋颢娇¹, 李醒飞^{1,2}, 邢伟达¹, 王天宇¹

(1. 天津大学精密测试技术及仪器全国重点实验室 天津 300072; 2. 深海技术科学太湖实验室 无锡 214000)

摘要:随着航空航天领域探测距离的逐步提升,频谱跨度大(0.1 Hz~1 kHz)、幅值小(mrad 量级)的微角振动对有效载荷指向精度的影响日趋明显。磁流体动力学(MHD)角速度传感器兼具低噪声、宽频带、体积小等优势,是目前最适合在轨微角振动测量的方法,能够为在轨微角振动力学特性分析及主动补偿提供宽谱段内的数据支撑。本文对MHD角速度传感器的工作原理、技术特点和应用情况进行综述,并针对当前研究中存在的问题进行探讨。首先,对比MHD角速度传感器的两种结构形式,基于传感器数学模型分析两种结构形式的输出特性差异。然后,介绍国内外MHD角速度传感器典型产品的技术指标及应用情况,围绕多物理场耦合仿真、微弱信号检测、测试与标定、低频拓展、工程应用五大核心技术进行讨论,分析现有技术瓶颈的基础上,明确亟需突破的难点问题。最后,指明MHD角速度传感器的未来发展方向,并展望其未来的应用领域。

关键词: 惯性传感器;磁流体动力学(MHD);微角振动;宽频测量

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

A review on the research of magnetohydrodynamic angular velocity sensors

Tuo Weixiao^{1,2}, Jiang Haojiao¹, Li Xingfei^{1,2}, Xing Weida¹, Wang Tianyu¹

(1. National key Laboratory of Precision Measuring Technology and Instrument, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. Taihu Laboratory Deepsea Technological Science, Wuxi 214000, China)

Abstract: As detection distances in the aerospace field increase, the impact of micro-angle vibrations—characterized by a broad frequency range (0.1 Hz to 1 kHz) and small amplitude (in the microradian range)—on payload pointing accuracy is becoming increasingly significant. Magnetohydrodynamic (MHD) angular velocity sensors offer advantages such as low noise, wide frequency bandwidth, and compact size, making them the most suitable method for on-orbit micro-angle vibration measurement. These sensors can provide comprehensive data across a wide spectrum, aiding in the analysis of on-orbit micro-angle vibration dynamics and enabling active compensation. This paper reviews the working principles, technical characteristics, and applications of MHD angular velocity sensors while discussing current research challenges. It begins by comparing the two structural forms of MHD angular velocity sensors and analyzing the differences in their output characteristics based on the sensor's mathematical model. Next, the technical specifications and applications of typical MHD angular velocity sensors, both domestic and international, are introduced. The paper also explores five core technologies: multi-physics coupling simulation, weak signal detection, testing and calibration, low-frequency expansion, and engineering applications. By examining existing technical bottlenecks, the paper identifies the key challenges that need to be addressed. Finally, the future development direction of MHD angular velocity sensors is outlined, and potential future application fields are explored.

Keywords: inertial sensors; magnetohydrodynamics (MHD); micro-angle vibration; broadband measurements.

1 研究意义与背景

对地遥感^[1]、激光通信^[2]以及空间探测^[3]等领域的

发展对高精度航天器的指向精度以及分辨率提出了更高的要求。目前,先进遥感技术要求对地观测遥感卫星分辨率达到0.3~0.5 m^[4]。随着空间分辨率的不断提高,载体角振动对成像精度的影响愈发显著。例如,对于轨

收稿日期:2024-05-27 Received Date: 2024-05-27

* 基金项目:国家自然科学基金项目(62203322)、中国博士后科学基金项目(2022M712372)、天津大学自主创新基金项目(2023XQM-003)、深海技术科学太湖实验室“揭榜挂帅”项目(2022JBCS03001)资助

道高度 500 km、分辨率 0.5 m 的遥感相机而言, $5\ \mu\text{rad}$ 的角振动将导致 4.8 个 pixle 的几何变形^[5]。远距离激光通信系统的光束束散角约为 $10\ \mu\text{rad}$, 要求视轴稳定精度达到微弧度甚至亚微弧度^[6]。可以看出, 空间探测距离和分辨率要求的提升, 对有效载荷指向精度提出了微弧度级甚至亚微弧度级的要求。

航天器在轨运行期间, 受内部运动部件和外部环境力学效应的影响, 极易诱发幅值低 (μrad 量级)、频谱跨度大 ($0.1\ \text{Hz} \sim 1\ \text{kHz}$) 的微角振动^[4]。随着国家战略层面面对高精度航天器、机载系统探测距离和导航制导精度要求的逐步增加, 微角振动成为限制有效载荷指向精度突破亚微弧度的关键因素。空间环境的复杂性和不确定性对微角振动传感器的灵敏度和可靠性提出了新的挑战。如果无法获取高精度的微角振动测量信息, 航天器及有效载荷在轨微角振动力学特性的分析将会受到制约, 振动抑制系统的稳定精度也会受到影响, 严重制约高精度航天器及相关领域的研发。

目前, 微角振动的测量元件主要包括线加速度计、光学陀螺、半球谐振陀螺、量子陀螺、流体旋转差动感应 (fluid-rotor differential induction, FDI) 式角位移传感器和磁流体动力学 (magnetohydrodynamics, MHD) 角速度传感器。线加速度计等线振动传感器属于间接测量, 测量结果不仅与安装位置有关, 而且需要进行二次积分, 容易引入离散误差^[7]。大型激光陀螺拥有较高的灵敏度以及动态范围, 但是维护困难, 造价昂贵。光纤陀螺维护方便, 但其灵敏度受限于体积大小, 无法兼顾小体积与高精度^[8-9]。半球谐振陀螺和量子陀螺理论上能够实现更高的测量精度, 但国内技术尚未走向工程应用^[10]。FDI 角位移传感器内部含有运动部件, 容易产生机械饱和, 且传递函数复杂^[11]。MHD 角速度传感器能够同时满足微角振动测量所需的 sub- μrad 级精度和 kHz 频带, 兼具低噪声、耐冲击、体积小的优势, 是目前最适合在轨微角振动测量的方法。国外自 20 世纪 80 年代便开始对 MHD 传感及应用技术展开研究, 相关技术已成为国外激光通信、激光武器等光学载荷平台的有力支撑, 但相关产品均受《国际武器贸易条例》(international traffic in arms regulations, ITAR) 的管制, 对国内严格禁运。受限于国外技术封锁, 国内对 MHD 传感及应用技术的研究起步较晚, 且尚未实现在轨应用, 有必要对其技术路径和应用趋势进行梳理, 支撑我国空天科技前沿领域的发展。

本文围绕 MHD 角速度传感器的技术原理、特点、应用和发展趋势等展开讨论, 在介绍传感器工作原理、数学模型, 对比国内外产品水平的基础上, 综述传感器关键技术的研究现状, 明确 MHD 角速度传感器亟需突破的关键技术和未来发展方向, 以期国内 MHD 角速度传感器技术水平和应用水平的提升提供指导。

2 MHD 角速度传感器工作原理及数学模型

2.1 基本原理

MHD 角速度传感器利用的是导电流体在旋转磁场中的电磁感应现象。根据磁场结构的不同, 可将其分为轴向磁场结构和径向磁场结构。基于轴向磁场结构的传感器原理图如图 1(a) 所示, 流体环通道上下表面绝缘, 内外表面导电。基于径向磁场结构的传感器原理图如图 1(b) 所示, 流体环通道内外表面绝缘, 上下表面导电。导电流体灌装于与壳体固连的闭合环形通道内, 磁场由与壳体固连的永磁体产生。当载体以角速度 Ω 旋转时, 传感器外壳跟随运动, 环形流体通道内部的导电流体由于惯性及粘滞性, 相对惯性系静止, 与旋转的磁通量间产生相对速度, 切割磁感线, 进而在传感器的 2 个导电壁面之间产生与输入角速度 Ω 成正比的感生电动势 φ 。

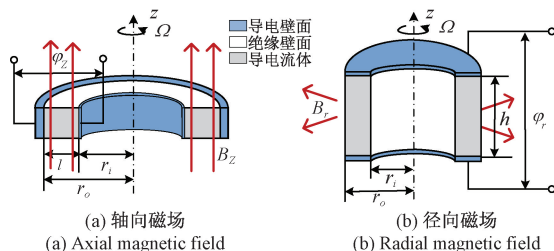


图1 MHD 角速度传感器原理

Fig. 1 Schematic diagram illustrating the principle of an MHD angular velocity sensor

2.2 简化输出模型

本小节以基于径向磁场结构的传感器为例, 推导其简化输出模型。MHD 角速度传感器内部导电流体在旋转磁场中的运动遵循纳维-斯托克斯 (N-S) 方程。在非惯性系中, 将闭合环形通道内导电流体的相对速度沿 r, θ, z 这 3 个方向的分量分别定义为 u_r, u_θ, u_z , 诱导电流沿 r, θ, z 这 3 个方向的分量分别定义为 J_r, J_θ, J_z , 磁感应强度沿 r, θ, z 这 3 个方向的分量分别定义为 B_r, B_θ, B_z 。此时, 控制不可压缩导电流体周向流动的 N-S 方程退化为:

$$\frac{\partial u_\theta}{\partial t} + u_r \frac{\partial u_\theta}{\partial r} + \frac{u_\theta u_r}{r} + \frac{u_\theta}{r} \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} + u_z \frac{\partial u_\theta}{\partial z} + 2\Omega \cdot u_r + \frac{\partial \Omega}{\partial t} r = \frac{1}{\rho_f} f_\theta + \nu_f \left(\frac{\partial^2 u_\theta}{\partial r^2} + \frac{2}{r^2} \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} - \frac{u_\theta}{r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_\theta}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 u_\theta}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 u_\theta}{\partial z^2} \right) \quad (1)$$

其中, ρ_f 为导电流体密度; ν_f 为导电流体运动粘度; $f_\theta = J_z B_r - J_r B_z$ 为导电流体相对运动时受到的周向电磁力。

由于环形通道关于 z 轴对称, 故有 $\partial u_\theta / \partial \theta = 0, \partial u_r / \partial \theta = 0$ 。

$0, \partial^2 u_\theta / \partial^2 \theta = 0$ 成立, 式(1)可进一步化简为:

$$\frac{\partial u_\theta}{\partial t} + u_r \frac{\partial u_\theta}{\partial r} + \frac{u_\theta u_r}{r} + u_z \frac{\partial u_\theta}{\partial z} + 2\Omega \cdot u_r + \frac{\partial \Omega}{\partial t} r = \frac{1}{\rho_f} f_\theta + \nu_f \left(\frac{\partial^2 u_\theta}{\partial r^2} - \frac{u_\theta}{r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_\theta}{\partial r} + \frac{\partial^2 u_\theta}{\partial z^2} \right) \quad (2)$$

由于导电流体的相对运动属于低磁雷诺数范畴, 流体运动产生的诱导磁场和诱导电场均可忽略, 结合欧姆定律可得 $f_\theta = -\sigma_f B_r^2 u_\theta$, 其中 σ_f 为导电流体的电导率。此外, 传感器内部的二次流可以忽略, 即有 $u_r \ll u_\theta \approx 0$ 、 $u_z \ll u_\theta \approx 0$ 。故式(2)可以进一步化简为:

$$\frac{\partial u_\theta}{\partial t} = -\frac{\sigma_f B_r^2 u_\theta}{\rho_f} - \frac{\partial \Omega}{\partial t} r + \nu_f \left(\frac{\partial^2 u_\theta}{\partial r^2} - \frac{u_\theta}{r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_\theta}{\partial r} + \frac{\partial^2 u_\theta}{\partial z^2} \right) \quad (3)$$

在理想条件下, 传感器内部导电流体相对惯性空间保持静止, 导电流体相对周向流速沿径向线性分布, 则有:

$$\frac{\partial^2 u_\theta}{\partial^2 r} \sim O[0] \quad (4)$$

$$-\frac{u_\theta}{r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_\theta}{\partial r} \sim O[0] \quad (5)$$

再者, 导电流体的相对周向运动遵循泊肃叶流动等效。根据磁流体动力学泊肃叶流动稳态解可得, 其中, Ha 为哈曼特常数:

$$\frac{\partial^2 u_\theta}{\partial z^2} \sim O\left[\frac{Ha^2}{h^2}(u_\theta - u_{\theta_{\max}})\right] \quad (6)$$

$$Ha = \sqrt{\frac{\sigma_f B_r^2 h^2}{\nu_f \rho_f}} \quad (7)$$

根据传感器设计参数计算得到的哈特曼数约为几百的数量级, 对应的边界层极薄, 故有 $u_\theta \approx u_{\theta_{\max}}$ 成立。综上所述, 式(3)可简化为:

$$\frac{\partial u_\theta}{\partial t} = -\frac{\partial \Omega}{\partial t} r - \frac{\sigma_f u_\theta B_r^2}{\rho_f} \quad (8)$$

对式(8)进行拉式变换后, 可以得到相对周向流速 u_θ 与输入角速度 Ω 满足关系:

$$s u_\theta = -s \Omega(s) r - \frac{\sigma_f u_\theta(s) B_r^2}{\rho_f} \quad (9)$$

结合电磁感应定律得到基于径向磁场结构的 MHD 角速度传感器的传递函数, 如下:

$$\frac{\varphi(s)}{\Omega(s)} = \frac{B_r r_{\text{rms}} h s}{s + \frac{\nu_f}{h^2}(1 + Ha^2)} \quad (10)$$

其中, $r_{\text{rms}} = (r_i + r_o)/2$ 为流体环等效半径, r_i 、 r_o 分别为流体环的内径和外径, $l = r_o - r_i$ 为流体环通道矩形截面的宽度, h 为流体环高度。

同理, 可以建立基于轴向磁场结构的 MHD 角速度传感器简化输出模型, 如下:

$$\frac{\varphi(s)}{\Omega(s)} = \frac{B_z r_{\text{rms}} l s}{s + \frac{\nu}{h^2}(1 + Ha^2)} \quad (11)$$

2.3 两种结构传感器的对比分析

根据文献和产品调研情况, 发现国内外高精度 MHD 角速度传感器多采用径向磁场结构, 而基于轴向磁场结构的传感器精度较低。同等体积的两种传感器, 基于径向磁场的布局更有助于实现低噪声测量的目标。以美国 ATA 公司(现被 BlueHalo 公司收购)基于轴向磁场结构设计的 ARS-09 和基于径向磁场结构设计的 ARS-16 为例进行分析, 二者指标对比如表 1 所示。可以看出, ARS-16 的体积约为 ARS-09 的 5.8 倍, 但其等效噪声角位置相较 ARS-09 降低了 3 个数量级, 仅为 ARS-09 的 0.05%。

表 1 ATA 公司两种磁场结构传感器参数对比
Table 1 Comparison of parameters for two magnetic field structure sensors from ATA

类别	单位	ARS-09	ARS-16
量程	rad/s	± 1.75	± 0.1
标度因数	V/(rad/s)	5.7	100
测量带宽	Hz	0.3~1 000	2~1 000
等效噪声角速度	rad/s	$<8 \times 10^{-3}$	$<5 \times 10^{-6}$
等效噪声角位置	rad	$<80 \times 10^{-6}$	$<40 \times 10^{-9}$
体积	mm ³	6 566.86	38 378.28

3 MHD 角速度传感器产品及应用

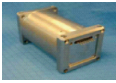
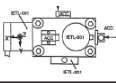
3.1 MHD 角速度传感器产品对比

基于磁流体动力学原理进行角振动测量的概念最初是由 Maeder 等^[12]于 1962 年提出的。MHD 角速度传感器真正的发展和应用是由美国 ATA 公司于 20 世纪 80 年代推动的, 初衷是满足美国空军对于宽频带高精度的角速度传感器的需求。经过近 40 年的发展, 美国 ATA 公司基于相关专利技术^[13-17], 研制了谱系化的 MHD 角速度传感器, 典型产品技术指标对比如表 2 所示。

国内对 MHD 角速度传感器的研究起步较晚, 目前仅有兰州物理空间技术研究所、天津大学和上海交通大学完成了 MHD 角速度传感器工程样机的研制。兰州物理空间技术研究所于 2011 年开展相关研究, 并研制出了 MHD400-II-2 型工程样机^[18], 由于对于技术的保密限制, 目前暂无公开技术参数。天津大学李醒飞教授课题组^[19]自 2013 年开始先后研制了 MHD-RM-01A、MHD-ARM-01A

表 2 美国 ATA 公司研制的谱系化 MHD 角速度传感器技术指标

Table 2 Comparison of technical specifications for ATA’s pedigree MHD angular velocity sensors in the United States

典型产品	型号	量程/ (rad/s)	标度因数/ (V/(rad/s))	-3 dB 带宽/ Hz	等效噪声角 速度/(rad/s)	等效噪声角 位置/rad	尺寸/mm	质量/g
	ARS-06	±200	0. 05	0. 38~1 000	$<4.7\times10^{-3}$	$<80\times10^{-6}$	Φ17. 78×25. 4	<35
	ARS-09	±1. 75	5. 7	0. 3~1 000	—	$<80\times10^{-6}$	Φ20. 3×20. 3	<46
	ARS-12G	±10	—	1~1 000	—	$<35\times10^{-9}$	25. 4×25. 4× 50. 8	<200
	ARS-14	±0. 5	20	2~1 000	$<5\times10^{-6}$	$<50\times10^{-9}$	25. 4×33. 02× 73. 66	<200
	ARS-15	±10	1	4~1 000	$<25\times10^{-6}$	$<1\times10^{-6}$	20. 3×20. 3× 30. 48	<60
	ARS-16	±0. 1	100	2~1 000	$<5\times10^{-6}$	$<40\times10^{-9}$	—	<150
	ARS-24	±0. 05	2 120	1~675	$<1\times10^{-6}$	$<8\times10^{-9}$	50. 8×50. 8× 101. 6	<2 000
	IETL001	±1 600	0. 006 3	0. 5~2 500	—	—	Φ20. 3×15. 2	<35

等多款 MHD 角速度传感器,其中 MHD-ARM-01A 型传感器等效噪声角位置达到 25 nrad rms。上海交通大学于 2021 年成功研制了 CG-52 型传感器^[20],其样机技术指标为:带宽 2 Hz~1 kHz,等效噪声角位置 50 nrad rms。国内

典型产品技术指标对比如表 3 所示。对比表 2 和 3 可知,国内 MHD 角速度传感器的等效噪声角位置指标已超过美国 ATA 公司,但是体积、质量等指标与国外相比仍存在差距。

表 3 国内单位研发的 MHD 角速度传感器技术指标

Table 3 Technical indicators of MHD angular velocity sensor developed by domestic units

典型产品	型号	量程/ (rad/s)	标度因数/ (V/(rad/s))	-3 dB 带宽/ Hz	等效噪声角 速度/(rad/s)	等效噪声角 位置/rad	尺寸/mm	质量/g
	MHD-RM-01A	±20	0. 5	2~1 000	$<4.6\times10^{-3}$	$<80\times10^{-6}$	30. 8×30. 8×44. 5	<190
	MHD-RM-02A	±2	4. 6	2~1 000	$<72.2\times10^{-6}$	$<1.5\times10^{-6}$	Φ36(46)×48	<230
	MHD-ARM-01A	±0. 05	18	2~1 000	$<1.714\times10^{-6}$	$<23.01\times10^{-9}$	Φ40(52)×60	<370
	MHD-ARM-02A	±0. 5	20	4~1 000	$<6\times10^{-6}$	$<150\times10^{-9}$	27. 5×27. 5×50	<150
	CG-52	±0. 5	39. 96	2~1 000	$<5\times10^{-6}$	$<50\times10^{-9}$	29×29×51	<220

3.2 MHD 角速度传感器应用情况

国外经过近 40 年的发展,ATA 公司的系列化 MHD 角速度传感器已在诸多领域广泛应用。本小节对国内外 MHD 角速度传感器的当前应用情况进行综述。

1) 光电跟瞄领域

美国战略主动防御组织采用 6 个 ATA 公司研制的 MHD 角速度传感器,对中继卫星反射实验中的角振动进行在轨测量,并与线加速度计的测量结果进行了对比^[21]。日本宇宙航空研究开发机构利用 ATA 公司的 ARS-12G 进行先进陆地观测卫星角振动的在轨测量^[22]。美国海洋大气局与美国航空航天局(National Aeronautics and Space Administration,NASA)将 ATA 公司研制的三轴 MHD 角速

度传感器 Dynapak12 应用于 Goes-N 卫星中,为姿态控制系统提供高频角振动反馈信息^[23]。此外,NASA 在其开展的月球激光通信演示验证(lunar laser communication demonstration,LLCD)试验中采用 ATA 公司基于 ARS-15 研制的惯性参考单元(inertial reference unit,IRU),设计了月球激光通信空间终端^[24](lunar laser communication space terminal,LLST),如图 2 所示,实现地月间小于半英寸的视轴指向精度。公开发表的资料显示,NASA 拟将此技术方案应用于火星激光通信演示系统^[25]和激光通信演示计划^[26-27]。上海交通大学基于 CG-52 型传感器设计了 ADS-3-0-3 型三轴 MHD 角速度传感器,并随遥感三十四号卫星首飞,在轨角位移测量分辨率优于 0.003”。

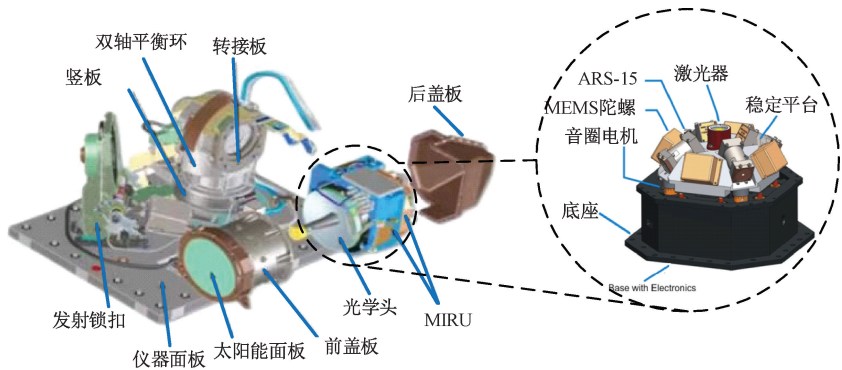
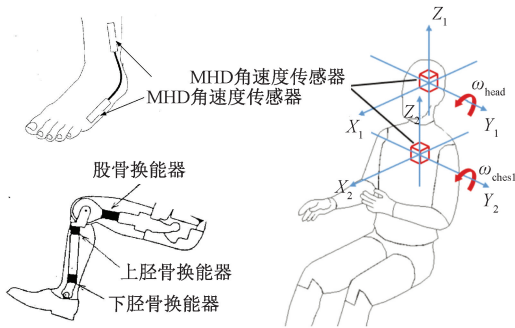


图 2 月球激光通信空间终端

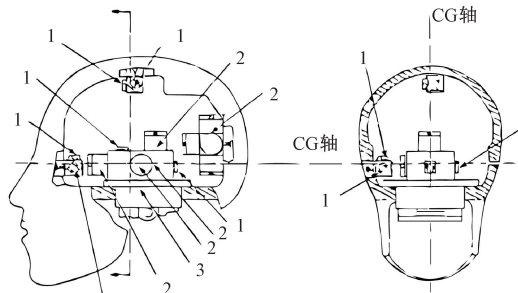
Fig. 2 Schematic diagram of the lunar laser communication space terminal

2) 碰撞检测领域

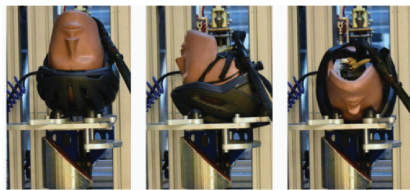
美国海军生物动力学实验室将 ATA 公司的 IETL-001 型 MHD 角速度传感器安装于头部碰撞检测设备^[28],如图 3(a)所示,用于评价头部缓冲系统性能,图 3(a)中数字 1 表示线加压机,数字 2 表示 MHD AMS IETL-001,数字 3 表示 6 轴颈部测压元件。福特汽车公司将 ATA 公司的 ARS-04 安装于 Hybird-III 假人模型中^[29],测量汽车碰撞过程中脚踝以及胫骨的旋转,如图 3(b)所示。美国霍普金斯大学应用物理实验室将 ARS-04 安装于 Hybird-III 50th Male 假人模型的头部和胸部^[30],用于测量



(b) 脚踝、胫骨部分安装位置
(b) Mounting position of ankle and tibia
(c) 头部、胸部安装位置
(c) Mounting position of head and chest



(a) 头部安装位置
(a) Mounting position of head



(d) ICube实验室头盔测试系统
(d) ICube laboratory helmet testing system

图 3 MHD 角速度传感器在碰撞检测领域应用
Fig. 3 Applications of MHD angular rate sensors in the field of collision detection

安装部位的碰撞冲击,如图3(c)所示。法国 ICube 实验室将 ATA 公司 ARS-06 应用于头盔测试系统中^[31],测量假人头部的冲击角速度,如图3(d)所示。国内公开发表的文献中未见关于 MHD 角速度传感器在此领域的应用。

3) 其他应用

ATA 公司设计了一种贴片式 MHD 角速度传感器^[32],如图4(a)所示,该传感器高度小于 1.7 mm,外径小于 12 mm,可实现 100 Hz~10 kHz 测量带宽,用于实现电子制造行业中元器件高频冲击的实时检测。ATA 公司将其自研的 SMHD 型 MHD 角速度传感器^[33](如图4(b)所示),用于旋转地震波的监测,并基于该传感器研制了一款可旋转的 7 自由度地震仪,但公开发表的文献中未

见关于地震监测的实际应用。此外,美国 ATA 公司提出了 1 种基于 MHD 角速度传感器的捷联式寻北系统^[34](如图4(c)所示),通过 ARS-14 和 ARS-15 敏感地球自转角速率信号分量,并进行分析,寻找真北方向。经试验验证,基于 ARS-14 的寻北系统可实现 1 min 内寻北精度 0.1 mrad,且体积小于 200 cc,质量小于 1 kg。相较于传统磁力计、陀螺罗盘、微分 GPS 以及天体观测寻北方案,拥有体积小、质量轻、精度高以及使用范围广泛的优点。

根据上述分析,可以看出,国外已形成完善的 MHD 角速度传感器及其应用体系。但受限国内起步时间晚的限制,国内产品进行在轨验证的仅有上海交通大学一家,且尚未实现应用推广,与国外相比存在近 10 年的差距。

4 MHD 角速度传感器关键技术研究进展

为了缩短我国在 MHD 角速度传感器及其应用技术方面与国外先进水平的差距,对其技术体系进行梳理十分必要。MHD 角速度传感器主要涉及多物理场耦合仿真分析、微弱信号提取与放大、角振动标定与测试校准、误差分析等多项关键技术,如图5所示。此外,由于 MHD 角速度传感器存在原理极限,当角旋转频率较低时,在反电动势和粘滞力的作用下,输出性能不佳,无法满足 0.1 Hz~1 kHz 的全频带测量需求。MHD 角速度传感器低频误差的建模与补偿方法也是推进其工程应用亟待突破的关键技术。

本小节对以上各项技术的研究现状进行综述,并针对性指出各项关键技术目前的发展短板及未来发展趋势。

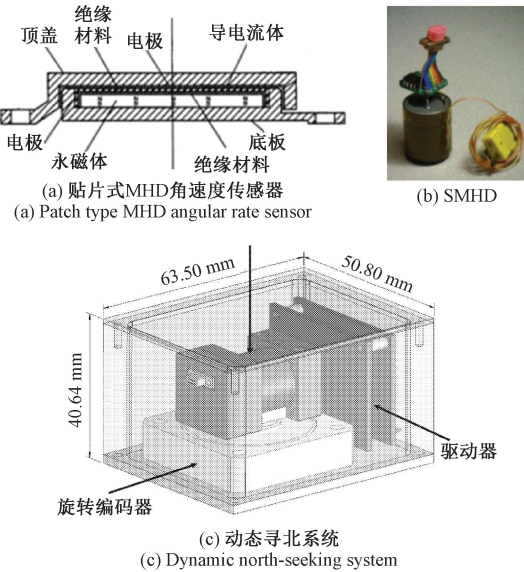


图4 MHD 角速度传感器的其他应用

Fig. 4 Other applications for MHD angular rate sensor

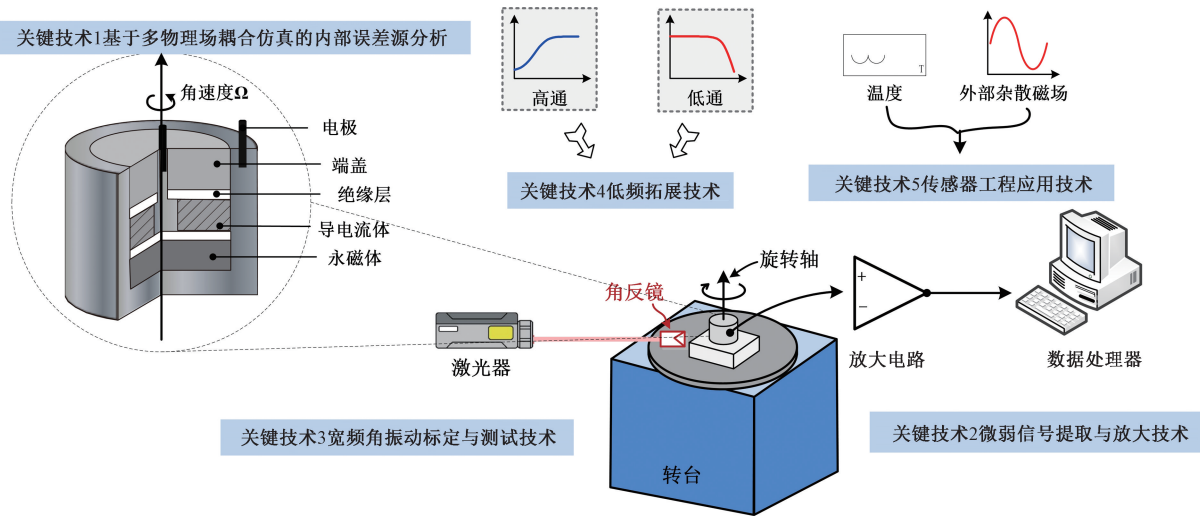


图5 MHD 角速度传感器技术体系

Fig. 5 MHD angular velocity sensor technology system

4.1 基于多物理场耦合仿真的内部误差源分析

MHD 角速度传感器的敏感机理是在闭合环形通道内电-磁-流场耦合作用下,角速度-相对流速-电动势的信号传递。当载体旋转时,灌装于闭合环形通道内的导电流体,由于惯性和流动性与惯性空间保持相对静止,与旋转的磁通量之间形成相对流速,切割磁力线,产生感应电动势。在角速度到相对流速传递中,微溶于导电流体的气体、二次流和流体通道壁面粗糙度会形成流场扰动,在相对流速到感生电动势的传递中,磁场不均匀度、诱导磁场、导电流体与电极间的接触电阻会造成电势波动,如图 6 所示。需要对传感器内部涉及的流-电-磁等多场误差源进行量化分析,进而为传感器的结构设计提供理论指导。

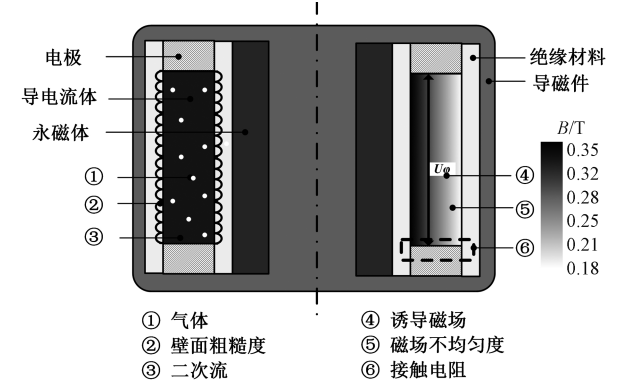


图 6 MHD 角速度传感器内部误差源

Fig. 6 MHD angular rate sensor internal error source

在 MHD 角速度传感器的误差分析与建模方面,以天津大学李醒飞教授课题组的研究最具代表性。文献[35]提出了适用于 MHD 角速度传感器分析的数值仿真方法,基本流程为:利用 MAXWELL 软件计算传感器内部的磁场分布,并利用自行撰写的 MATLAB 程序将场计算器导出的三维磁场数据撰写为 MAG 文件,导入 FLUENT 软件的 MHD 模块,实现流-电-磁场间的耦合。文献[36]利用上述数值仿真分析方法对基于轴向磁场结构的传感器内部二次流随时间、频率、电磁感应强度变化的规律进行分析,得出结论:二次流直接影响输出电动势与输入角速度间的一一对应关系,且低频($<2\text{ Hz}$)影响更为显著,分析了结构关键尺寸参数的优化设计方法。文献[37]定量计算了诱导磁场对传感器输出的影响,并得出结论:诱导磁场会影响磁感应强度的时域稳定性,当旋转角速度小于 100 rad/s 时,诱导磁场带来的偏差小于 0.1% ,可以忽略。文献[38]对比了均匀磁场与非均匀磁场作用下传感器的输出特性,得出结论:磁场不均匀性主要影响电动势分布的空间域特征和输出正弦曲线的拟合优度,如图 7 所示。

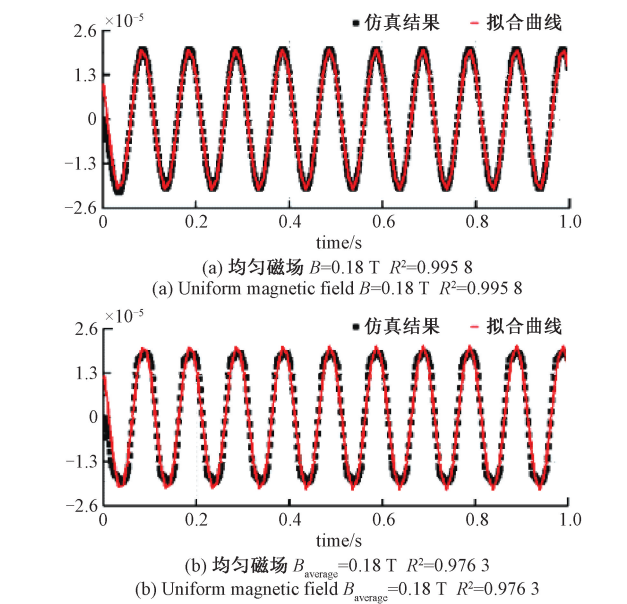


图 7 均匀和非均匀磁场输出正弦曲线拟合结果

Fig. 7 Uniform and non-uniform magnetic fields output sinusoidal fitting results

壁面粗糙度直接影响近壁面处导电流体的运动状态,还会间接影响接触电阻的大小。文献[39]对传感器内部流体环内壁面粗糙度进行仿真和实验研究,得出结论:壁面粗糙度越大,传感器内部的径向二次流越弱。文献[40-41]推导并建立了 MHD 角速度传感器的 VOF 模型,仿真分析了导电液体中气体对传感器输出的影响,结果表明:气泡会影响导电流体的流场和电场分布,当导电液体中气体含量 $<0.5\%$ 时,气体对 MHD 角速度传感器的输出特性影响较小。导电液体和导电壁面间的接触电阻是影响传感器初级回路特性的关键因素,壁面粗糙度和流体相对流动特征均会影响接触电阻。为了量化分析壁面粗糙度对接触电阻的影响,文献[42-44]建立了 MHD 角速度传感器中固-液接触电阻模型,仿真分析了流体环材料、温度等对接触电阻的影响,得出壁面粗糙度与接触电阻大小成正比的结论。文献[39]分析了流体运动状态对壁面压强的影响及对动态接触电阻的影响,得出结论:不同位置的动态接触电阻变化范围不同,且会随粗糙度发生变化。

MHD 角速度传感器的噪声形成,是电-磁-温-固-气-流场的多物理场耦合作用的过程,在角速度到相对流速传递中,流体通道密封性和壁面粗糙度会形成流场扰动,产生气-液与固-流耦合作用下的噪声源,在相对流速到电势差的传递中,磁场不均匀度、磁性材料磁通以及壁面接触电阻在不同温度下的波动,形成了电-磁-流-固-温耦合作用下的噪声干扰。现有磁流体动力学与其它物理场耦合的分析中,以定常充分发展的流动为主,欠缺针对动态噪声形成机理的非定常分析以及各噪声源的量

化传递机制。需要研究各随机误差源的形成机理及其作用规律,建立“电-磁-流-热”多物理场耦合下的误差建模方法,定量分析各时变误差源对测量结果准确性的影响。

4.2 微弱信号提取与放大技术

MHD 角速度传感器敏感元件的典型标度因数为 $10^{-5} \text{ V}/(\text{rad/s})$ 量级。传感器检测微角振动信号时,敏感元件输出电压十分微弱,在纳伏至微伏量级^[45],且覆盖 1 kHz 带宽。需要设计高增益信号放大电路实现微弱信号的高信噪比放大。

针对 MHD 角速度传感器的微弱信号放大问题,文献[46]首先测量并标定了多种不同型号的 MHD 角速度传感器,通过传感器频域特性和噪声水平的对比得出结论:传感器的噪声水平与尺寸呈负相关。文献[14]设计了基于运算放大器的单级放大电路,输出端利用无源 RC 网络进行信号滤波。文献[47]中对上述方案进行改进,并在输出端引入差分集成运算放大电路,设计电路的等效输入噪声为 $7.1 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。文献[48]利用集成运放 AD797 设计微弱信号预处理电路,等效输入噪声为 $1.8 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。文献[49]设计了一种基于有源分立器件并联的直接耦合放大电路,以期改善放大电路的噪声性能,等效输入噪声为 $0.6 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。然而,上述直接耦合式微弱信号提取方法的噪声系数具有很大的改善空间,难以实现低噪声的设计目标。

为了解决上述问题,国内外学者普遍采用将耦合阻抗匹配变压器置于初级前置放大器前的技术方案,进一步提高放大电路的噪声抑制能力^[50]。文献[51]设计了 9 000 匝、每匝直径 1 mm 的变压器线圈,以期实现 500 倍的放大增益,但由于磁芯漏磁、线圈绕制方法不完善等原因,仅实现了 150 倍的放大增益。文献[52]设计了原边 50 匝、副边 5 000 匝的环形变压器结构,结合输入级差分放大电路,实现了 MHD 角速度传感器 nV 级微弱信号的检测与放大。文献[53]设计了一种小型变压器耦合前置放大器,能够对低源电阻 ($<0.1 \Omega$)、宽频带 (1 Hz ~ 1 kHz) 的敏感元件输出信号进行无失真放大,等效输

入噪声达到 $25 \text{ pV}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。

除上述方案外,美国 ATA 公司还提出利用磁场调制技术实现有用信号高频搬移的技术方案^[18]。文献[54]基于文献[55]设计的增益可自动调节的磁场驱动装置,采用基于嵌入式的数字相敏检波方法来对信号进行解调,将 MHD 角速度传感器的输出信号频率搬移至 5 kHz 附近。为了进一步降低传感器的输出噪声,部分学者还采用后端算法的方式进一步降低传感器的输出噪声。文献[45]提出了一种基于自相关的小波改进降噪算法,将传感器的输出信噪比提高了 7~10 dB,但微弱信号提取能力仍然较弱,信噪比有待进一步提升。文献[56]基于时间序列分析,建立了传感器随机漂移模型,利用 Kalman 滤波算法实现了 MHD 角速度传感器随机漂移误差的补偿。文献[18]提出了基于经验模态分解的小波阈值降噪技术,将 MHD 角速度传感器的输出信噪比提升至 34 dB。

MHD 角速度传感器的微弱信号提取与放大技术目前发展已较为成熟,能够将本底噪声电压频谱密度降至 $\text{pV}/\sqrt{\text{Hz}}$ 量级。但为了实现传感器的小型化设计,需要进一步优化匹配变压器线圈的绕线工艺,降低噪声匹配变压器的体积。

4.3 宽频角振动标定与测试技术

MHD 角速度传感器具有 kHz 的测量频率和 μrad 级的噪声,其快速发展对宽频角振动标定与测试技术提出了更高的要求。在宽频角振动标定方面,国际标准组织于 2006 年制订了“振动和冲击传感器校准方法——基于激光干涉法的角振动绝对校准 (ISO16063-15)”^[57],校准原理如图 8 所示。绝对校准法直接溯源至光学基准量,一般作为国家或地区、行业的最高基准。在 MHD 角速度传感器的绝对校准方面,文献[58]设计了一种基于改进型迈克尔逊干涉仪的微幅角振动幅相激光干涉测量系统,能够实现频率 1 kHz、最大角加速度 $1\,500 \text{ rad/s}^2$ 、最大角位移 2° 的高频微幅角振动校准。文献[59]设计了基于零差式激光干涉仪的 MHD 角速度传感器绝对校准系统,如图 9 所示,实现了 25 Hz ~ 1 kHz、 $0.060 \sim 7\,590 \text{ mrad/s}$ 范围内 MHD 角速度传感器的动态校准。

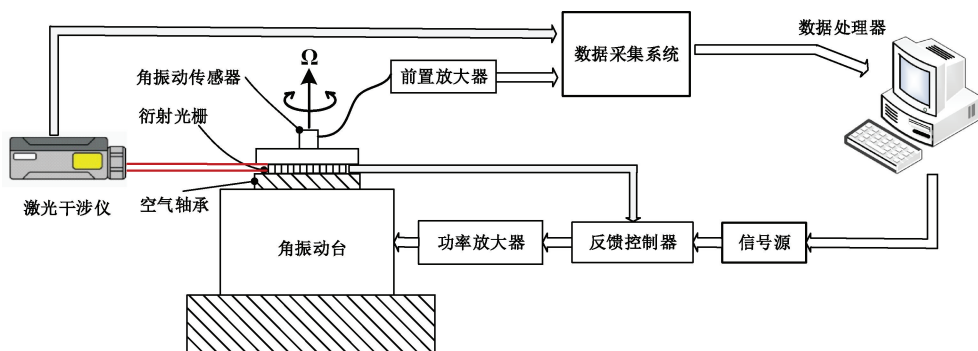


图 8 基于激光干涉法的角振动绝对校准

Fig. 8 Schematic of absolute angular vibration calibration using laser interferometry

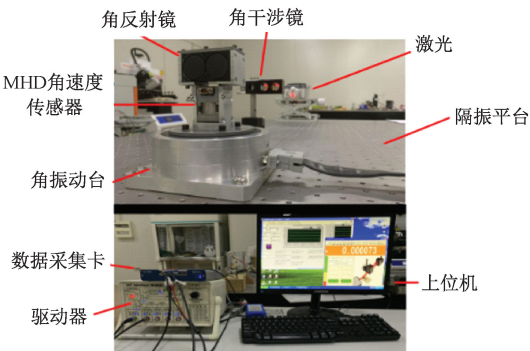


图9 文献[59]角振动校准系统结构

Fig. 9 Ref. [59] structural diagram of angular vibration calibration system

在 MHD 角速度传感器的相对校准方面,文献[60]设计了一种新型的角振动基准装置,如图 10 所示,采用经过绝对法标校的高精度速率陀螺对相对精度较低的 MHD 角速度传感器进行标定,系统的工作频段覆盖 0.1 Hz~1 kHz,最大角加速度达 3 000 rad/s²,最大转角范围为 5.5°,角速度谐波失真度 THD≤2%。

除硬件校准系统外,MHD 角速度传感器的评价方法也是决定其性能指标的关键因素。对于 MHD 角速度传感器而言,国内外学者普遍采用噪声功率谱密度 (noise power spectral density, NPSD) 的评价方式衡量其精度^[61]。目前,对于 NPSD 曲线的测定方法主要分为自相关和互相关的测量方法^[62]。文献[36]根据文献[62]中所提

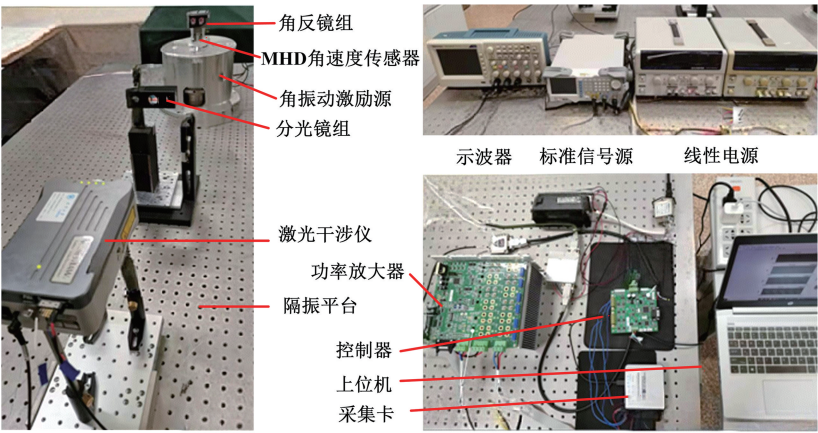


图10 文献[60]角振动校准系统结构

Fig. 10 Ref. [60] structural diagram of angular vibration calibration system

出的互相关频域测量的方法,设计了用于测量 MHD 角速度传感器本底噪声的测试实验系统,如图 11 所示。文献[63]设计了基于互谱估计的双通路噪声测量系统,如图 12 所示,精确测得 0.06 nV/√Hz 的 MHD 角速度传感器噪声谱密度。

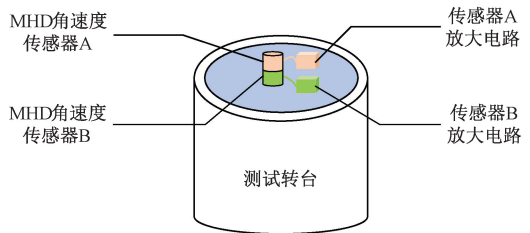


图11 MHD 角速度传感器噪声水平测试系统

Fig. 11 MHD angular rate sensor noise level test system

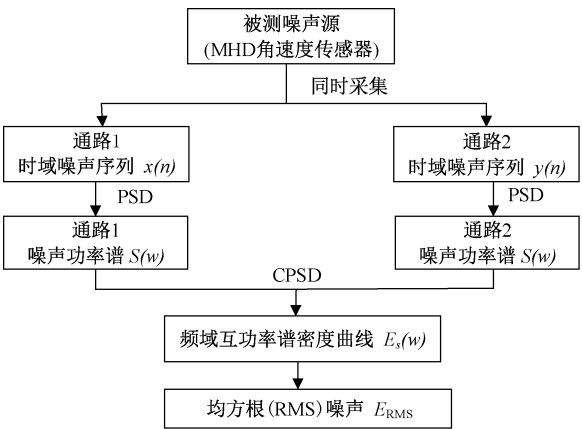


图12 基于互谱估计的双通路噪声测量系统

Fig. 12 Dual-channel noise measurement system using cross-spectrum estimation

随着高端装备制造业的快速发展,微角振动高精度测量技术的应用越来越广,但其检定工作暂无完备的国家标准。急需加大在微角振动标校设备和方法上的投

入,并出台相关国家标准和计量技术规范,以简化和规范微角振动测量与抑制设备研发和交付过程中的检定工作。

4.4 低频拓展技术

MHD 角速度传感器存在原理极限,当角旋转频率较低时,在反电动势和粘滞力的作用下,输出性能不佳,无法满足 $0.1\text{ Hz} \sim 1\text{ kHz}$ 的全频带测量需求^[64]。补偿 MHD 角速度传感器低频误差的方法主要分为 3 种:滤波器、MHD 泵和数据融合。使用滤波器虽能补偿传感器低频段的标度因数,但同时会放大低频噪声,且应用于较长时间测量($>10\text{ s}$)时会出现较大漂移^[62]。

专利[47]最早提出基于 MHD 泵的低频拓展技术,设计了一种基于双层流体环的传感器结构,如图 13 所示,采用 MHD 泵送设备产生径向速度,但未见具体实验结果与详细分析数据。文献[65]研究了 MHD 角速度传感器工作于低频状态时,科氏力效应的诱发机理,对 MHD 泵产生和控制径向流速的方法进行了数值仿真,并设计了泵送流速测量装置,对含 MHD 泵的传感器进行了数值仿真和实验。文献[66]采用 FLUENT 对基于 MHD 泵的传感器进行耦合数值仿真,确定了补偿电流 3 A 的驱动方案,有效补偿了传感器低频的幅值与相位。基于 MHD 泵的低频拓展方式理论上能将传感器的频带下限拓展至 0 Hz ,但新测量机理的引入会增加磁路的复杂性,导致传感器稳定性和信噪比降低,且安培级的驱动电流使其难以实现低功耗。

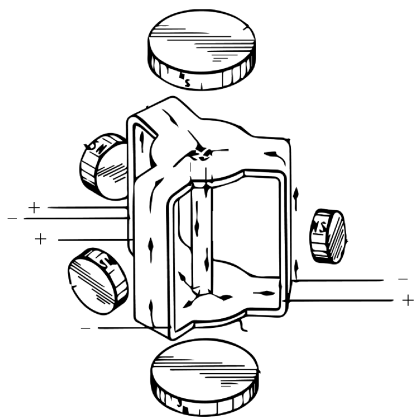


图 13 专利[47]基于 MHD 泵的双层流体环结构

Fig. 13 Patent [47] based on the double-layer fluid ring structure of MHD pumps

利用低频性能好的陀螺仪与 MHD 角速度传感器进行数据融合,可以在不影响稳定性的前提下校正低频误差,已在日本先进陆地观测卫星和美国静止轨道环境卫星中得以成功应用。目前的信号融合算法主要包括互补滤波法、闭环控制滤波法等频域信号融合算法和卡尔曼滤波、维纳滤波等时域信号融合算法^[19]。在基于频域的信号融合算法中,文献[67]提出了闭环控制滤波的数据融合方法,给出了低带宽 IRU 与高带宽角位移传感器的仿真融合结果,但缺乏实验验证。文献[68]采用闭环控

制滤波实现了动力调谐陀螺仪和 ATA 公司 ARS-09 的数据融合,但融合效果并不理想, $0.1\text{ Hz} \sim 120\text{ Hz}$ 内最大幅值误差达 -4.5 dB 。文献[69]使用相位补偿高通滤波器将 MHD 角速度传感器的低频极点向高频移动,再与 MEMS 陀螺仪直接叠加,实现了 $0 \sim 40\text{ Hz}$ 内幅值波动 $\leq 1\%$,相位波动 $\leq \pm 1^\circ$ 的融合效果,但受限于转台频率特性,算法融合效果有待进一步测试和验证。文献[70]提出了闭环控制滤波的最优校正方法,利用 MEMS 陀螺仪和 MEMS 加速度计数据融合实现了 $1 \sim 100\text{ Hz}$ 带宽内最大幅值误差 -2.1 dB ,最大相位误差 17° 的融合效果,但并未对融合信号的噪声特性进行分析。文献[71]通过零极点配置改变输出信号的频域特性,对非工作带宽内的信号和噪声进行衰减后再进行融合。实验结果表明,融合信号在 $0.1 \sim 700\text{ Hz}$ 频段内最大幅值波动 1.64 dB ,等效噪声角速度 $0.212\text{ }^\circ/\text{s RMS}$,能够同时保证良好的频响特性以及较低的噪声水平。在基于时域的信号融合算法方面,文献[72]利用维纳滤波和卡尔曼滤波实现了 ARS-12G 与低频精密姿态确定系统的数据融合,但仅对 $0 \sim 10\text{ Hz}$ 内的融合效果进行了实验测试,且融合输出在有限长数据段的首尾部分发生较大畸变。文献[73]提出了一种基于 Allan 方差解耦自适应卡尔曼滤波的信号融合算法,实现了 MHD 角速度传感器和 MEMS 陀螺仪的离线数据融合,融合信号的均方误差降低至融合前的 30% ,信噪比的改善超过 10 dB ,但并未直观评估融合信号的频响和噪声特性。文献[74]提出了一种频域增强型自适应卡尔曼信号融合算法,将 MHD 角速度传感器的低频截止频率拓展至 Hz 量级,但该方法难以实时实现。

引入 MHD 泵的带宽拓展技术难以实现小型化和低功耗设计,未来传感器融合仍是实现 MHD 角速度传感器低频拓展的有效途径。然而,互补滤波、闭环控制滤波等基于频域的数据融合方法可以直观评估融合后数据的幅值和相位等特性,但无法兼顾噪声和漂移等指标。卡尔曼及自适应卡尔曼滤波等基于时域的数据融合方法能够提供统计意义上的最优估计,但滤波迭代和噪声参数估计均在时域进行,易滤波发散,且难以抑制重合频段内的频响曲线波动。急需构建兼顾频响曲线波动、噪声及漂移的多目标优化模型,优化信号融合的效果。

4.5 传感器工程应用技术

实际将 MHD 角速度传感器安装至 IRU 等系统中实现角运动参数测量时,传感器的敏感轴会偏离装置转动轴,内部导电流体的运动状态可能会随安装位置发生变化,影响传感器输出特性。此外,传感器所处环境不可避免的存在交流磁场,与 MHD 角速度传感器的工作磁路产生耦合,影响角运动参数的测量精度。另一方面,由环境温度变化或传感器附近致动电机正常运动产生的热量会

导致 MHD 角速度传感器所处环境温度变化,导致传感器内部导电流体的电导率、密度、运动粘度等参数发生变化。以上 3 个问题均是 MHD 角速度传感器工程应用需要解决的关键问题。

文献[75]中量化分析了安装位置对 MHD 角速度传感器输出特性的影响,并利用数值仿真和实验测试的手段得出了 MHD 角速度传感器频响特性、线性度等随安装位置的变化规律,但受数值仿真计算精度和加工装配误差的影响,分析结论的可靠性有待进一步验证。文献[76]研究了 MHD 角速度传感器的交流磁场干扰模型,提出了传感器的电回路优化方案和磁屏蔽措施,有效改善了交流磁场对 MHD 角速度传感器输出的影响,但并未对该项误差进行量化分析。文献[77]给出了 MHD 角速度传感器频响特性随温度的变化规律,但并未给出温度误差的抑制方法。文献[78]指出传感器误差主要受重力方向和温度条件的影响,在温度变化很小时,变压器绕制工艺和放大器噪声是影响 MHD 角速度传感器误差的主要因素。文献[79]利用数值仿真分析的方法,量化分析了温度变化对 MHD 角速度传感器标度因数的影响,提出了基于海尔贝克环形阵列实现温度误差补偿的方法,但会导致传感器体积的大幅增加。

MHD 角速度传感器所处物理环境的干扰使其工作温度无法保证恒定。在不同温度条件下测量时,导电流体的电导率、密度、运动粘度等材料参数会发生变化,传感器内部磁场因永磁体的磁通损失和磁性件的磁导率变化而发生变化,影响传感器的输出电势,使传感器的标度因数发生变化。目前的温度误差补偿的研究主要围绕传感器的结构优化设计展开,温度误差的软补偿算法实时性差,无法适用于高频响角运动传感器。需要设计高动态温度误差的实时补偿方算法,降低 MHD 角速度传感器的温度敏感性。

5 展 望

5.1 未来研究方向

1) 一体集成角振动传感器研发

MHD 角速度传感器存在原理极限,当角旋转频率较低时,在反电动势和粘滞力的作用下,输出性能不佳。利用低频性能好的陀螺仪与其进行数据融合,可以在不影响稳定性的前提下校正低频误差。然而,现有数据融合方法无法解决频域指标和时域指标间存在的冲突及耦合,且待融合传感器的分离式安装存在信号传输环路面积大、对外部交流磁场、温度极为敏感等问题。需要设计一体集成式角振动传感器和兼随时/频域指标的数据融合算法,解决单一惯性传感器无法满足 0.1 Hz~1 kHz 带宽内角振动低噪声测量的技术难题。

2) 小型化与轻量化设计技术

MHD 角速度传感器的高精度与小型化之间存在矛盾关系。同等体积下,国外 ARS-16 型传感器标度因数约为国内 CG-52 型传感器的 2.5 倍,同等等效噪声水平下,国内产品的质量和体积均劣于国外产品。而对于 IRU 等主动减振系统而言,MHD 角速度传感器将作为其负载,影响主动振动控制系统的抑制带宽和稳定精度。需要研究 MHD 角速度传感器的小型化与轻量化设计技术,助力我国量子通信、星际探测、探月工程等空天科技前沿领域的发展。

5.2 应用展望

文献调研结果显示,微角振动的影响主要体现在 3 个方面。第 1 方面,导致光电跟瞄系统视轴晃动或者抖动,导致视轴“稳不住”。第 2 方面,影响捷联惯导系统的位姿解算精度,导致位姿“定不准”。第 3 方面,影响遥感成像等运动成像系统的照片清晰度,导致相机“拍不清”的问题。本小节围绕上述 3 个技术难题,对 MHD 角速度传感器在国内的应用领域进行展望。

1) 运动平台光电跟瞄系统

在对地观测、激光通信和精确制导武器等领域,目标的变化和任务拓展光电跟瞄系统提出了快速机动的要求^[80],从陆基平台到车载、船载、机载、星载等动载体是光电跟瞄系统的重要发展趋势^[81]。国家十四五规划中明确提出加速发展的量子通信、星际探测、探月工程等空天科技前沿领域均需要动载体光电跟瞄系统的支撑。然而,动载体的高机动性会引入极难克服的振动干扰。目前,最常用的视轴主动稳定技术是利用 IRU 辅助快速反射镜(fast steering mirror,FSM)实现视轴的自准稳定。在视轴稳定控制系统中,IRU 的主要作用是发射一束参考光,穿过库德光路后注入主望远镜中,为捕获、跟踪、瞄准系统提供一个虚拟的参考星。

根据传感器安装方式的不同,IRU 可分为平台式和捷联式两种。平台式 IRU 的惯性传感器直接敏感基准光源所受角扰动,在不需要匹配任何参数的情况下,将所有被控对象均置于闭环控制系统中,实现扰动的有效抑制。捷联式 IRU 的惯性传感器安装在基座上,测量并输出基座角扰动,该值乘以匹配的增益前馈到主光路系统的 FSM 上,通过旋转 FSM 消除载体扰动。Draper 实验室通过实验证实,捷联式 IRU 对传感器的相位和增益等参数较为敏感,易受运动耦合误差的影响,在相同惯性传感器水平下,对载体扰动的抑制能力要比平台式 IRU 低 1 个数量级^[82]。

平台式 IRU 的原理及控制框图如图 14 所示。目前成功应用于国外 IRU 中实现高频角振动高精度测量的惯性传感器主要有 3 类:线加速度计、FDI 角位移传感器和 MHD 角速度传感器。基于线加速度计的测量方式能够发挥加速度计体积小,带宽大的优势,但会因二次积分离散化引入误差,难以得到宽频带内低噪声的测量结

果^[83]。FDI 角位移传感器基本工作于零位附近,测量精度依赖于内部位置探测器,且内部含有运动部件,传递函数复杂^[84]。此外,国内尚未成功研制高精度 FDI 角位移传感器产品,国外严格禁运。兼具低噪声、宽频带、耐冲

击、体积小等特性^[85]的 MHD 角速度传感器不含任何转动部件,且无机机械饱和,是目前国外高精度 IRU 中应用最为广泛的高频角振动敏感元件。国内 MHD 角速度传感器的研发将服务于我国运动平台光电跟踪领域的发展。

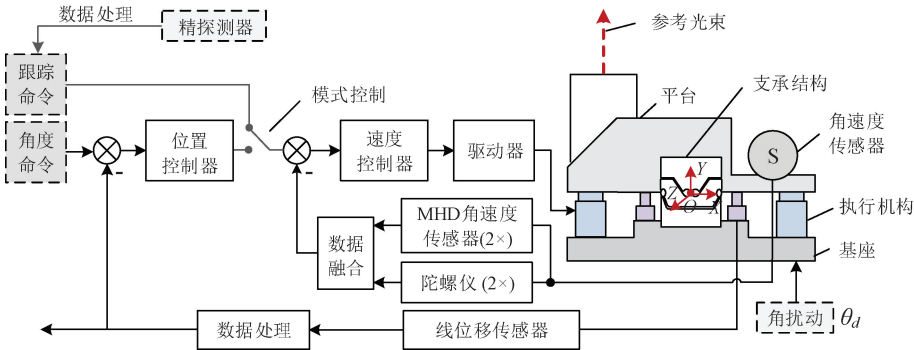


图 14 平台式 IRU 系统原理及控制

Fig. 14 Platform-based IRU system principle and control block diagram

2) 捷联惯导系统

高精度的航姿信息不仅是航天器、船舶等运载体获取有效信息的必要条件,也是自身安全作业的基础前提。捷联惯导系统利用惯性传感器测量载体运动参数,结合初始位姿信息,解算得到载体的实时位姿^[86],其原理如图 15 所示。由于其具有全天候、独立自主的导航能力,

是运载体导航领域的关键技术手段^[87]。随着作业任务复杂程度的提高,运载体面临蛇形、加速度等高动态环境。已有研究表明,当基座处在几十赫兹以上的振动环境时,即使振幅只有角分的水平,惯性测量单元中的加速度计、陀螺等器件的测量误差将增大,严重影响传递对准的精度。高动态环境下载体的姿态解算精度主要受硬件

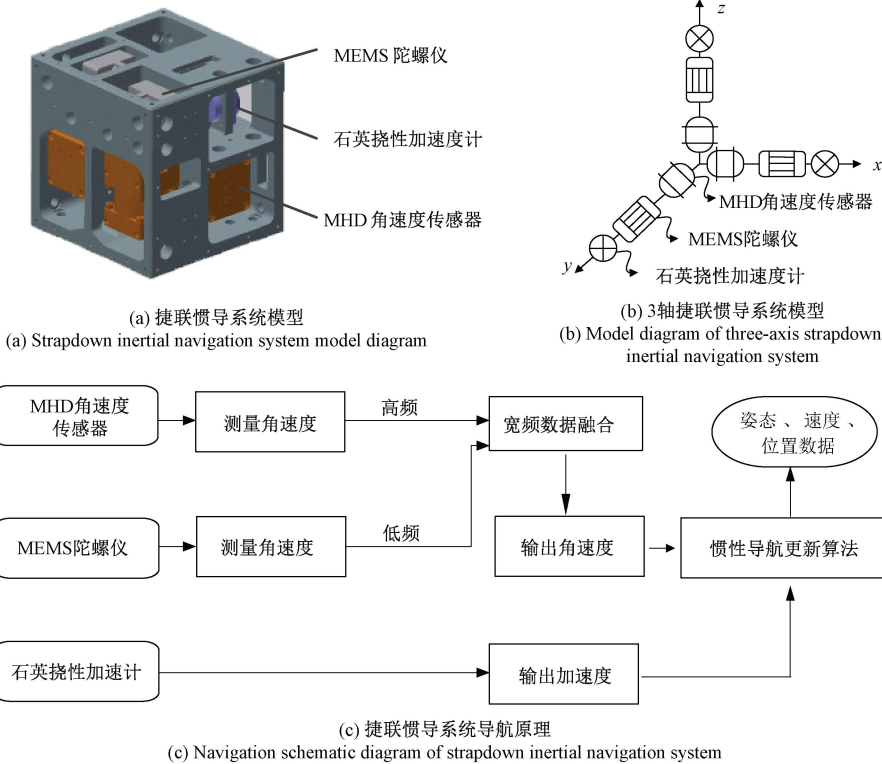


图 15 捷联惯性导航系统模型及导航原理

Fig. 15 Navigation schematic diagram of strapdown inertial navigation system

采样频率和惯性器件特性的影响,将宽频带惯性测量器件引入惯性测量单元的构建中是解决现有设备动态测量精度差的主要技术途径^[88]。MHD 角速度传感器兼具耐冲击、体积小等优势,且能实现 1 Hz~1 kHz 带宽内角速度的亚微弧度量级低噪声测量,其发展可补偿捷联惯导系统的动态测量误差,解决复杂动态环境下的宽频姿态高精度测量的难题。

3) 运动图像补偿

高分辨率图像在遥感卫星成像、无人机航拍、零件瑕疵检测等领域都具有十分重要的应用。随着未来我国 0.3 m 甚至更高分辨率光学遥感卫星的发射,微角振动对遥感影像几何精度的影响量级将会达到十几个像素,无法满足全球测图、变化检测等高精度遥感应用对亚像素几何精度的迫切需求。运动图像补偿技术能够在不增加相机体积与系统复杂度的前提下,通过后期算法进行图像复原,是目前补偿图像运动模糊的主要技术手段^[89]。根据点扩散函数是否已知,可将运动图像补偿方法分为盲复原和非盲复原两种^[90]。盲复原算法对真实场景的复杂运动模糊复原能力有限^[91]。非盲图像复原算法的基础是点扩散函数的准确构建。点扩散函数的估计方法主要分为两种:基于图像数据和基于实测运动信息。基于图像数据的估算方式需要增加高速相机,应用范围受限。基于实测运动信息的点扩散函数估计方法利用惯性传感器测量系统运动信息,无需增加硬件成本,且实时性高,在运动图像复原领域应用广泛。MHD 角速度传感器兼具测量频带宽、精度高、低交叉轴灵敏度、内部无机械运动部件、可靠性高等优势,是目前国际上已采用的相对成熟的相机角振动测量技术。国内 MHD 角速度传感器的研发将助力我国对地观测成像实现新突破,也将助力提升基于视觉测量的零部件表面瑕疵检测系统的检测效率和重复性。

6 结 论

MHD 角速度传感器是目前国际上已成熟应用的微角振动测量技术,相对于加速度计等线振动传感器,其可实现角振动的直接测量,相对于传统陀螺仪,除可获得同等测量精度外,测量带宽更高。国外 MHD 角速度传感器受《国际武器贸易条例》管制,极大限制了我国空天海地战略装备的发展。论文基于加快航空航天强国建设的国家重大战略背景,针对在轨微角振动动力学特性分析及主动补偿的迫切需求,以建立微角振动主动抑制与补偿方法为远景目标,在分析对比多种微角振动测量方案的基础上,指明 MHD 角速度传感器在实现轨微角振动高精度测量方面的优势。基于 MHD 角速度传感器的基本原理和数学模型,对比了基于不同结构的传感器性能。对

比国内外 MHD 角速度传感器产品技术指标及应用的基础上,综述 MHD 角速度传感器关键技术的研究现状,剖析当前研究中存在的问题,明确了技术发展趋势,并对其在国内的未来应用进行了展望。

参考文献

- [1] 苏云,葛婧菁,王业超,等. 航天高分辨率对地光学遥感载荷研究进展[J]. 中国光学(中英文), 2023, 16(2): 258-282.
SU Y, GE J J, WANG Y CH, et al. Research progress on high-resolution earth optical remote sensing payloads in aerospace [J]. Chinese Optics (Chinese and English), 2023, 16(2): 258-282.
- [2] 鲁绍文,侯霞,李国通,等. 空间光通信技术发展现状及趋势[J]. 天地一体化信息网络, 2022, 3(2): 39-46.
LU SH W, HOU X, LI G T, et al. Development status and trend of space optical communication technology[J]. Space-Earth Integrated Information Network, 2022, 3(2): 39-46.
- [3] 曹小涛,孙天宇,赵运隆,等. 空间大口径望远镜稳像系统发展现状及趋势[J]. 中国光学, 2014, 7(5): 739-748.
CAO X T, SUN T Y, ZHAO Y L, et al. Development status and trend of space large aperture telescope image stabilization system[J]. Chinese Optics, 2014, 7(5): 739-748.
- [4] 杨雷,庞世伟,曲广吉. 高精度航天器微振动集成建模与综合评估技术—进展综述与研究思路[C]. 2007 全国结构动力学学术研讨会论文集, 2007: 211-223.
YANG L, PANG SH W, QU G J. High-precision spacecraft micro-vibration integrated modeling and comprehensive evaluation technology—progress review and research ideas[C]. Proceedings of the 2007 National Symposium on Structural Dynamics, 2007: 211-223.
- [5] 王密,朱映,范城城. 高分辨率光学卫星影像平台震颤几何精度影响分析与处理研究综述[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2018, 43(12): 1899-1908.
WANG M, ZHU Y, FAN CH CH. A review of the analysis and processing of the influence of tremor geometric accuracy on high-resolution optical satellite image platform [J]. Journal of Wuhan University (Information Science Edition), 2018, 43(12): 1899-1908.
- [6] 曹阳,刘世涛. 空间激光通信移动平台的自抗扰视轴稳定控制[J]. 光子学报, 2016, 45(4): 65-70.
CAO Y, LIU SH T. Active disturbance rejection line-of-

- sight stability control of mobile platform for space laser communication [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, 45(4):65-70.
- [7] 胡浩军,马佳光. 线加速度计辅助惯性姿态角测量的误差分析[J]. *系统工程与电子技术*, 2006(2):284-287.
- HU H J, MA J G. Error analysis of linear accelerometer-assisted inertial attitude angle measurement[J]. *Systems Engineering and Electronic Technology*, 2006(2):284-287.
- [8] 孟祥涛,王巍,向政. 基于光纤陀螺与经验模态分解的航天器微小角振动检测技术[J]. *红外与激光工程*, 2014,43(8):2619-2625.
- MENG X T, WANG W, XIANG ZH. Spacecraft micro angular vibration detection technology based on fiber optic gyroscope and empirical mode decomposition [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(8):2619-2625.
- [9] MACEK W M, DAVIS D T M. Rotation rate sensing with traveling-wave ring lasers[J]. *Applied Physics Letters*, 1963, 2(3):67-68.
- [10] 宋丽君,薛连莉,董燕琴,等. 惯性技术发展历程回顾与展望[J]. *导航与控制*, 2021,20(1):29-43.
- SONG L J, XUE L L, DONG Y Q, et al. Review and prospect of the development process of inertial technology[J]. *Navigation and Control*, 2021,20(1):29-43.
- [11] ACAR C, SHKEL A. MEMS vibratory gyroscopes structural approaches to improve robustness [M]. *Springer Science & Business Media*, 2008.
- [12] MAEDER P F. Magnetohydrodynamic gyroscope: US 3026731[P]. 1962-03-27.
- [13] LAUGHLIN D R. Angular motion sensor: US4718276[P]. 1988-01-12.
- [14] LAUGHLIN D R. Magnetohydrodynamic angular rate sensor for measuring large angular rates: US5067351[P]. 1991-11-26.
- [15] LAUGHLIN D R. Low-profile magnetohydrodynamic motion sensor for an electronic system: US5461919[P]. 1995-10-31.
- [16] LAUGHLIN D R. MHD sensor for measuring microradian angular rates and displacements: US6173611[P]. 2001-1-16.
- [17] LAUGHLIN D R. Magnetohydrodynamic (MHD) actuator/sensor: European1770404[P]. 2007-04-04.
- [18] SU Y H, MA C W, HAN J F, et al. Research on magnetohydrodynamic angular rate sensor denoising for a space laser stabilization control system [J]. *Applied Sciences*, 2023, 13(10):13105895.
- [19] 李醒飞,何梦洁,拓卫晓,等. 应用于运动平台光电跟踪系统的惯性参考单元研究综述[J]. *光学精密工程*, 2024,32(3):401-421.
- LI X F, HE M J, TUO W X, et al. A review of inertial reference units applied to motion platform photoelectric tracking and aiming systems[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2024,32(3):401-421.
- [20] 吴建铭,朱庆华,沈杰,等. 磁流体宽频角运动传感技术研究进展与应用展望[C]. 惯性技术发展动态发展方向研讨会文集——惯性基导航、制导与控制技术发展新趋势, 2023.
- WU J M, ZHU Q H, SHEN J, et al. Research progress and application prospect of magnetic fluid wide-frequency motion sensing technology [C]. *Proceedings of the Symposium on the Dynamic Development Direction of Inertial Technology——New Trends in the Development of Inertial Basis Navigation, Guidance and Control Technology*, 2023.
- [21] ANSPACH J E, SYDNEY P F, HENDRY G. Effects of base motion on space-based precision laser tracking in the relay mirror experiment[C]. *Acquisition, Tracking, and Pointing V*, 1991:170-181.
- [22] IWATA T, KAWAHARA T, MURANAKA N, et al. High-bandwidth pointing determination for the advanced land observing satellite (ALOS)[J]. *Proceedings of the Twenty-Farth International Symposium on Space Technology and Science: Selected Papers*, 2004:385-394.
- [23] 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*. 2007:1-12.
- [24] BOROSON D M, SCOZZAFAVA J J, MURPHY D V, et al. The lunar laser communications demonstration (LLCD) [C]. *2009 IEEE International Conference on Space Mission Challenges for Information Technology*, 2009:23-28.
- [25] HAWE L E. Control of a fast steering mirror for laser-based satellite communication [J]. *Massachusetts Institute of Technology*, 2006.
- [26] BERNARD L E, ISRAEL D, WILSON K, et al. Overview of the laser communications relay demonstration

- project [C]. Space Optical Systems and Applications (ICSOS), 2012: 283-293.
- [27] EDWARDS B L, ISRAEL D J, VITHLANI S K. Latest changes to NASA's laser communications relay demonstration project [C]. Free-space Laser Communication and Atmospheric Propagation, 2018: 10524.
- [28] LAUGHLIN D R. A magnetohydrodynamic angular motion sensor for anthropomorphic test device instrumentation[J]. Stapp Car Crash Conference, 1989.
- [29] FILETA B, ROSSELL A J, LIN Y, et al. Assessment of magnetohydrodynamic angular rate sensors in measuring ankle rotations during vehicle's crash tests [C]. Sea World Congress, 2000.
- [30] VOO L, MERKLE A, CHANG S S, et al. Comparison of three rotation measurement techniques in rear impact application[M]. 2003.
- [31] BOURDET N, DECK C, MEYER F, et al. Experimental and numerical considerations of helmet evaluation under oblique impact[J]. Journal of Transportation Safety & Security, 2020, 12(1/10): 52-65.
- [32] LAUGHLIN D R. Low-profile magnetohydrodynamic motion sensor for an electronic system: US5461919[P]. 1995-10-31.
- [33] PIERSON B, VANDERMEER W A, LAUGHLIN D. Rotation-enabled 7-degree of freedom seismometer for geothermal resource development[R]. 2013: 2766-7604.
- [34] LAUGHLIN D R. Method and apparatus for precision azimuth measurement: US0088063[P]. 2010-04-08.
- [35] XU M J, LI X F, WU T F, et al. Error analysis of theoretical model of angular velocity sensor based on magnetohydrodynamics at low frequency[J]. Sensors and Actuators, A. Physical, 2015, 226: 116-125.
- [36] JI Y, LI X F, WU T F, 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.
- [37] JI Y, LI X F, WU T F, et al. Quantitative analysis method of error sources in magnetohydrodynamic angular rate sensor for structure optimization[J]. IEEE Sensors Journal, 2016, 16(11): 4345-4353.
- [38] JI Y, LI X F, WU T F, et al. Study on magnetohydrodynamics angular rate sensor under non-uniform magnetic field[J]. Sensor Review, 2016, 36(4): 359-367.
- [39] 刘飞. MHD角速度传感器粗糙度精细化仿真与实验研究[D]. 天津: 天津工业大学, 2022.
- LIU F. Simulation and experimental study on roughness of MHD angular velocity sensor [D]. Tianjin: Tianjin Polytechnic University, 2022.
- [40] 庄叠昀, 李醒飞, 纪越. 气泡对 MHD 角速度传感器输出特性影响分析[J]. 传感技术学报, 2022, 35(3): 328-334.
- ZHUANG D Y, LI X F, JI Y. Analysis of the effect of air bubbles on the output characteristics of MHD angular rate sensor[J]. Journal of Sensing Technology, 2022, 35(3): 328-334.
- [41] 夏赣民, 李醒飞, 刘帆. 气体对磁流体动力学传感器影响机理的探讨[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(4): 238-248.
- XIA G M, LI X F, LIU F. Discussion on the influence mechanism of gas on magnetohydrodynamic sensors[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(4): 238-248.
- [42] XIA G M, TUO W X, LI X F, et al. Study on the performance of liquid-solid contact resistance based on magnetohydrodynamic micro-angular vibration sensor[J]. Sensors, 2022, 22(23): 22239204.
- [43] 纪越, 张彦鹏, 李醒飞. 磁流体角速度传感器的固液接触电阻特性研究[J]. 导航定位与授时, 2022, 9(3): 153-158.
- JI Y, ZHANG Y P, LI X F. Study on solid-liquid contact resistance characteristics of ferrofluid angular velocity sensor[J]. Navigation, Positioning and Timing, 2022, 9(3): 153-158.
- [44] 李醒飞, 陈进宇, 夏赣民, 等. 研究固体电极氧化膜对液固接触电阻影响的装置及方法: 201911047090. 8[P]. [2019-11-19].
- LI X F, CHEN J Y, XIA G M, et al. Apparatus and method for studying the effect of solid electrode oxide film on liquid-solid contact resistance: 201911047090. 8[P]. [2019-11-19].
- [45] 王丽萍, 李醒飞, 吴腾飞, 等. 一种用于磁流体陀螺微弱信号检测的小波降噪方法研究[J]. 传感技术学报, 2014(10): 1355-1362.
- WANG L P, LI X F, WU T F, et al. A wavelet noise reduction method for weak signal detection of ferrofluid gyroscope[J]. Journal of Sensing Technology, 2014(10): 1355-1362.
- [46] WILLEMS G C, KNOUSE D R. A detailed evaluation of

- the ATA angular motion sensor in realistic simulated crash environments[J]. 1991,1. DOI:10.4271/912910.
- [47] LAUGHLIN D R. Low frequency angular velocity sensor: US 5176030[P]. 1993-01-05.
- [48] 于翔,李醒飞,徐梦洁,等. 一种磁流体陀螺的设计研究[J]. 传感技术学报,2013,26(11):1483-1487.
- YU X, LI X F, XU M J, et al. Design of a ferrofluid gyroscope[J]. Journal of Sensing Technology, 2013, 26(11):1483-1487.
- [49] 张云,李醒飞,吴腾飞,等. MHD 角速度传感器预处理电路的低噪声设计方法研究[J]. 传感技术学报, 2018,31(7):1033-1039.
- ZHANG Y, LI X F, WU T F, et al. Research on low noise design method for MHD angular velocity sensor pretreatment circuit[J]. Journal of Sensing Technology, 2018, 31(7):1033-1039.
- [50] CONNELLY J A, MOTCHENBACHER C D. Low-noise electronic system design[J]. John Wiley & Sons, 1993.
- [51] LI T, WANG K, WU J, et al. Design and experiment study for MHD microradian angular vibratory sensor[C]. 2016 10th International Conference on Sensing Technology (ICST), 2016: 1-4.
- [52] 吴建铭,李建勋,张明举. 角随机颤振传感器导电液体环数学模型推导[J]. 测控技术,2018,37(7):69-73.
- WU J M, LI J X, ZHANG M J. Derivation of mathematical model of conductive body loop for angular random flutter sensor[J]. Measurement and Control Technology, 2018,37(7):69-73.
- [53] LIU F, LI X F, XIA G M. A miniature transformer-coupled low-noise preamplifier for low source resistance sensors at low frequency[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021, 70:2007210.
- [54] 徐冲柯,吴腾飞,杨凯丽,等. 基于磁场调制的磁流体动力学角速度传感器[J]. 传感技术学报,2019, 32(11):1640-1647.
- XU CH K, WU T F, YANG K L, et al. Magnetohydrodynamic angular velocity sensor based on magnetic field modulation[J]. Journal of Sensing Technology, 2019,32(11):1640-1647.
- [55] 李醒飞,张云,刘帆. 一种 MHD 角速度传感器稳定调制磁场的驱动装置:20181101099.9[P]. [2020-08-21].
- LI X F, ZHANG Y, LIU F. A driving device for stable modulation of magnetic field by MHD angular velocity sensor:20181101099.9[P]. [2020-08-21].
- [56] 李洪宇,徐亚东,吴腾飞,等. MHD 角速度传感器随机漂移误差补偿方法研究[J]. 传感技术学报,2017, 30(8):1193-1198.
- LI H Y, XU Y D, WU T F, et al. Research on random drift error compensation method for MHD angular velocity sensor[J]. Journal of Sensing Technology, 2017, 30(8):1193-1198.
- [57] PENG J. Comparison of angular movement measurement using grating and laser interferometer[C]. Eighth International Conference on Vibration Measurements by Laser Techniques: Advances and Applications, 2008: 709811.
- [58] 许琳. 微幅角振动幅相激光干涉测量系统的研究[D]. 杭州:浙江大学. 2014.
- XU L. Research on micro amplitude angle vibration amplitude phase laser interferometry system[D]. Hangzhou: Zhejiang University. 2014.
- [59] WU Y J, LI X F, LIU F. An on-orbit dynamic calibration method for an MHD micro-angular vibration sensor using a laser interferometer[J]. Sensors, 2019, 19(19):19194291.
- [60] 周新力,李醒飞,吴腾飞,等. 基于低通滤波器的 MHD 角速度传感器低频补偿算法(英文)[J]. 纳米技术与精密工程,2018,1(1):79-85.
- ZHOU X L, LI X F, WU T F, et al. Low-frequency compensation algorithm for MHD angular velocity sensor based on low-pass filter(English)[J]. Nanotechnology and Precision Engineering, 2018,1(1):79-85.
- [61] MERRITT P H, BARDWELL K E. Noise and signal identification using redundant instrumentation[C]. International Instrumentation Symposium, 30th, Denver, 1984:501-509.
- [62] PINNEY C, HAWES M A, Blackburn J. A cost-effective inertial motion sensor for short-duration autonomous navigation[C]. Position Location and Navigation Symposium, 1994, IEEE, 1994:591-597.
- [63] 杨凯丽,吴腾飞,徐冲柯,等. MHD 角速度传感器微弱噪声的测量方法[J]. 传感技术学报,2019,32(11): 1654-1660.
- YANG K L, WU T F, XU CH K, et al. Measurement method of weak noise of MHD angular velocity sensor[J]. Journal of Sensing Technology, 2019, 32(11):1654-1660.
- [64] PITTELKAU M E. Kalman filtering for spacecraft system alignment calibration[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2001, 24(6):1187-1195.

- [65] JI Y, LI X F, WU T F, 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.
- [66] JI Y, YAN G ZH, DU Y. Low-frequency extension design of angular rate sensor based on magnetohydrodynamics[C]. 2020 IEEE 5th Information Technology and Mechatronics Engineering Conference, 2020: 182-186.
- [67] ALGRAIN M C, WOEHRER M K. Determination of attitude jitter in small satellites [C]. *Acquisition, Tracking, and Pointing X*, 1996:215-228.
- [68] 吴琼雁,任戈,胡浩军,等. 两种惯性传感器数据融合[J]. *光电工程*,2006(3):54-57.
WU Q Y, REN G, HU H J, et al. Data fusion of two inertial sensors [J]. *Optoelectronic Engineering*, 2006(3):54-57.
- [69] 李醒飞,周新力,吴腾飞,等. 一种 MHD 角速度传感器与 MEMS 陀螺仪组合测量系统信号融合的方法[J]. *天津大学学报(自然科学与工程技术版)*, 2018,51(2):159-166.
LI X F, ZHOU X L, WU T F, et al. A method for signal fusion of MHD angular velocity sensor and MEMS gyroscope combined measurement system[J]. *Journal of Tianjin University (Natural Science and Engineering Technology)*, 2018,51(2):159-166.
- [70] MAO Y, REN W, LUO Y, et al. Optimal design based on closed-loop fusion for velocity bandwidth expansion of optical target tracking system [J]. *Sensors*, 2019, 19(1):19010133.
- [71] 李醒飞,王信用,拓卫晓,等. 基于零极点配置的宽频带角速度传感器信号融合方法[J]. *中国惯性技术学报*,2023,31(5):472-480,489.
LI X F, WANG X Y, TUO W X, et al. Signal fusion method of broadband angular velocity sensor based on zero-pole configuration [J]. *Chinese Journal of Inertial Technology*, 2023,31(5):472-480,489.
- [72] 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*, 2009.
- [73] 李醒飞,韩佳辰,刘帆. 基于 Allan 方差解耦自适应滤波的 MHD/MEMS 信号融合方法[J]. *中国惯性技术学报*,2020,28(2):237-241.
LI X F, HAN J CH, LIU F. MHD/MEMS signal fusion method based on Allan variance decoupling adaptive filtering [J]. *Chinese Journal of Inertial Technology*, 2020,28(2):237-241.
- [74] JI Y, DU Y, YAN G ZH, et al. Adaptive Kalman filter enhanced with spectrum analysis for wide-bandwidth angular velocity estimation fusion [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2020, 20(19):11527-11536.
- [75] TUO W X, LI X F, JI Y, et al. Quantitative analysis of position setting effect on magnetohydrodynamics angular vibration sensor response[J]. *Sensors and Actuators, A. Physical*, 2021, 332(P2): 113194.
- [76] XIA G M, TUO W X, LI X F, et al. Research on characteristics of magnetohydrodynamic micro-angle vibration sensor in AC magnetic field[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2023, 23(6):5650-5659.
- [77] LAUGHLIN D R, SEBESTA H R, ECKELKAMP-BAKER D. A dual function magnetohydrodynamic (MHD) device for angular motion measurement and control [J]. *Advances in the Astronautical Sciences*, 2002:335-347.
- [78] 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(S1): 110-116.
ZHOU H J, LI D T. Numerical analysis of ground temperature characteristics of MHD sensor sensitive structure [J]. *Journal of Northwestern Polytechnical University*, 2018,36(S1):110-116.
- [79] 王岩岩,李醒飞,纪越. 磁流体动力学角速度传感器的温度特性分析[J]. *仪表技术与传感器*,2022(7):1-6.
WANG Y Y, LI X F, JI Y. Temperature characteristics analysis of magnetohydrodynamic angular velocity sensor[J]. *Instrumentation Technology and Sensors*, 2022(7):1-6.
- [80] DOWNEY G, STOCKUM I D L. Electro-optical tracking systems considerations [J]. *Proceedings of SPIE-the International Society for Optical Engineering*, 1989, 1111:70-84.
- [81] ULICH B L. Overview of acquisition, tracking, and pointing system technologies[C]. *Acquisition, Tracking, and Pointing II*, 1988, 887:40-63.
- [82] LUNIEWICZ M F, GILMORE J P, CHIEN T T, et al. Comparison of wideband inertial line-of-sight stabilization reference mechanizations [C]. *Acquisition, Tracking, and Pointing VI*, 1992, 1697:378-398.

- [83] LEE S, ORTIZ G G, LIU W, et al. Increasing tracking bandwidth for deep-space optical communications using linear accelerometers [J]. Interplanetary Network Progress Report, 2003.
- [84] LAUGHLIN D R, SMITH D. ARS-12G inertial angular vibration sensor provides nanoradian measurement [C]. Acquisition, Tracking, and Pointing XV, 2001, 4365: 168-175.
- [85] LAUGHLIN D R, SMITH D. Development and performance of an angular vibration sensor with 1 ~ 1 000 Hz bandwidth and nanoradian level noise [C]. Free-Space Laser Communication and Laser Imaging, 2002, 4489:208-214.
- [86] 翟有新,冯培德. 振动条件下平台角振动对惯导系统误差的影响研究[J]. 中国惯性技术学报,2000,(1): 2-7.
- ZHAI Y X, FENG P D. Research on the influence of platform angular vibration on inertial navigation system error under vibration conditions [J]. Chinese Journal of Inertial Technology, 2000,(1):2-7.
- [87] 张卫侠,张立峰,刘中平,等. 机载激光捷联惯导系统动态误差的影响分析[J]. 中国惯性技术学报,2014, 22(3):306-310.
- ZHANG W X, ZHANG L F, LIU ZH P, et al. Influence analysis of dynamic error of airborne laser strapdown inertial navigation system [J]. Chinese Journal of Inertial Technology, 2014,22(3):306-310.
- [88] 王林,吴文启,潘献飞,等. 机抖激光陀螺敏感轴动态偏移误差参数估计与补偿[J]. 中国惯性技术学报, 2016,24(6):828-831,837.
- WANG L, WU W Q, PAN X F, et al. Parameter estimation and compensation of dynamic offset error of sensitive axis of machine shake laser gyroscope [J]. Chinese Journal of Inertial Technology, 2016, 24(6): 828-831,837.
- [89] JOSHI N, KANG S B, ZITNICK C L, et al. Image deblurring using inertial measurement sensors [J]. ACM Transactions on Graphics (TOG), 2010, 29(4):30.
- [90] 董星煜,刘传奇,赵健康. 融合运动信息的图像运动模糊去除算法[J]. 计算机应用研究,2021,38(1):278-281.

DONG X Y, LIU CH Q, ZHAO J K. Image motion blur removal algorithm fused with motion information [J]. Computer Application Research, 2021,38(1):278-281.

- [91] 余义斌,彭念,甘俊英. 凹凸范数比值正则化的快速图像盲去模糊[J]. 电子学报,2016,44(5):1168-1173.

YU Y B, PENG N, GAN J Y. Fast image blind deblurring of concave-convex norm ratio regularization [J]. Acta Electronica Sinica, 2016,44(5):1168-1173.

作者简介



拓卫晓,2021年于天津大学获得博士学位(硕博连读),现为天津大学助理研究员,主要研究方向为微角振动测量与抑制技术。

E-mail:tuoweixiao@tju.edu.cn

Tuo Weixiao received her Ph. D. degree in 2021 from Tianjin University (Master's and doctor's degree in succession). Now she is an assistant researcher in Tianjin University. Her main research interests include micro-angle vibration measurement and suppression technology.



蒋颖娇,2023年于郑州大学获得学士学位,现为天津大学精密仪器与光电子工程学院23级在读硕士研究生,主要研究方向为基于运动信息的图像拼接。

E-mail:jianghaojiao1124@163.com

Jiang Haojiao received her B. Sc. degree in 2023 from Zhengzhou University. Now she is a 23-level master's student in the School of Precision Instrument and Optoelectronic Engineering, Tianjin University. Her main research interests include image stitching based on motion information.



李醒飞(通信作者),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,主要研究方向为新型传感器、检测与智能化、海洋观测与探测。

E-mail:lixftju@hotmail.com

Li Xingfei (Corresponding author) received his M. Sc. degree in 1994 from Southeast University, received his Ph. D. degree in 2000 from Tianjin University. His main research interests include new sensors, detection and intelligence, and ocean observation and detection.