DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2210924

气体对磁流体动力学传感器影响机理的探讨*

夏赣民,李醒飞,刘 帆
(天津大学精密测量技术与仪器国家重点实验室 天津 300072)

摘 要:由于气体和导电流体性质上的差异,导电流体中气体的存在将对磁流体动力学(MHD)传感器的输出特性产生影响。基于电磁感应理论和两相流理论,文章推导并建立了导电流体中含气体的 MHD 传感器 VOF 模型。通过 ANSYS Fluent 对含气体的 MHD 传感器输出特性进行仿真分析,同时搭建试验平台对不同气体含量 MHD 传感器进行试验验证。结果表明,导电流体中的气泡在低频时容易被拉伸撕裂成小气泡并随着角振动分散,同时使得流体环流场和电场产生偏移和畸变,角振动频率越低,此现象越明显;当导电流体中不含气体时角振动频率和幅值、重力加速度及偏心等外部因素对 MHD 传感器的输出特性无影响;当导电流体中含有气体时,MHD 传感器的输出特性畸变等随气体含量、重力加速度和偏心的增大而增大,随角振动频率和幅值的增大而减小。文章研究成果能够为 MHD 传感器导电流体灌装工艺控制提供指导,有助于 MHD 传感器精度和稳定性的提升。

关键词: MHD 微角振动传感器;导电流体;气液两相流;偏心分析
中图分类号: TH89 **文献标识码**: A **国家标准学科分类代码**: 460.40

Discussion on the influence mechanism of gas on magnetohydrodynamic sensor

Xia Ganmin, Li Xingfei, Liu Fan
(*The State Key Laboratory of Precision Measuring Technology and Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072, China*)

Abstract: Due to the difference in the properties of gas and conductive fluid, the presence of gas in conductive fluid may affect the output characteristics of the magnetohydrodynamic micro-angular vibration (MHD) sensor. Based on electromagnetic induction theory and two-phase flow theory, the volume of fluids (VOF) model of the MHD sensor containing gas in conductive fluid is deduced and established. ANSYS fluent is used to simulate and analyze the output characteristics of the MHD sensor with gas. An experimental platform is established to verify the MHD sensor with different gas content. The results show that the bubble in conductive fluid is easily torn into small bubbles at low frequencies and disperse with angular vibration, which causes the flow field and electric field of the fluid to shift and distort. The lower the frequency of angular vibration, the more obvious this phenomenon is. When there is no gas in conductive fluid, the external factors such as angular vibration frequency and amplitude, gravity acceleration and eccentricity have no influence on the output characteristics of the MHD sensor. When the conductive fluid contains gas, the output characteristic distortion of the MHD sensor increases with the increase of gas content, gravity acceleration and eccentricity, and decreases with the increase of angular vibration frequency and amplitude. The research results of this article can provide guidance for the filling process control of the MHD angular velocity sensor and help to improve the accuracy and stability of the sensor.

Keywords: MHD micro-angular vibration sensor; conductive fluid; gas-liquid two-phase flow; eccentricity analysis

0 引 言

用于国土资源勘察、深空探测、信息通信、环境观测、城市规划等的高分辨率遥感卫星,在民用和军事领域都有着非常重要的作用[1]。由于现代高精度航天器对指向精度和稳定性都有着极高要求,需要实时监测航天器在轨工作时的微角振动信息。基于磁流体动力学

收稿日期:2022-12-28 Received Date: 2022-12-28
*基金项目:国家自然科学基金(62203322,61733012)项目资助

(magnetohydrodynamic, MHD)的微角振动传感器(MHD 传感器)不存在机械磨损和摩擦阻尼等缺点,同时具有体积小、精度高,对交叉轴不敏感以及响应频带范围宽,能够在恶劣环境中工作等优点,能够满足航天器在轨微角振动的测量[1-5]。

在深空环境中,航天器材料放气及结构放气是一种常见的现象,它对航天器的正常稳定运行具有很大的影响。导电流体中的气体主要来源有:1)材料吸气特性:任何固体和液体材料在大气环境下都具有吸气特性,与材料特性、表面粗糙度和所处环境特性等有关,当环境变化时,如压力降低时,材料吸附的气体会释放出来。2)材料溶气特性:任何固体和流体材料在大气环境下都能溶解气体,导电流体分子间的距离比固体更大,因此气体更易在导电流体中扩散形成分子状态。3)表面工艺特性:导电流体具有较高的表面张力,在通常情况下趋于收缩。当导电流体与粗糙的流体环表面接触,粗糙表面的凸起之间形成微小空腔,能够存储少量气体;同时在一些工艺死角处,也可以存留一定气体。4)环境使用特性:主要是指环境温度和压力的变化导致气体含量发生变化。

气-液两相流是气体和液体混合在一起流动,具有明显的相界面,且相界面可变形;目前研究气液两相流的方式主要有实验研究和数值模拟研究两种。Grace 等[6]通过雷诺数 *Re* 等无量纲参数对气泡形状进行了分析。Mori 等[7]实验研究磁场了对流体中单个气泡上流动特性的影响。Zhang 等[8]通过超声波多普勒速度仪测量了气泡和流体的速度。Ohta 等[9]采用 Level-Set 法与 VOF (volume of fluids)法结合的数值算法分析了初始形状对气泡最终形貌的影响。Hua 等[10]讨论了气相与液相密度比、粘度比的影响。Qincheng 等[11]实验研究了磁流体中气泡的上升运动速度、轨迹及形状变化。张舍等[12]对液态金属镓中的气泡磁场效应开展了研究。

目前关于 MHD 传感器的研究仅限于基本原理、误差分析等。Laughlin 等[13]提出了 MHD 传感器的简化模型,并将其在低频时的不良性能归因于黏度和电磁力导致的相对速度减弱。Xu 等[4]和 Ji 等[5]发现简化模型与低频下的实验数据存在一定的差异,并将其误差归因于二次流、磁场的不均匀性以及由此产生的电流所产生的感应磁场。Zhou 等[14]将数值模型与实验数据之间的差异归因于一些装配误差,如导电流体中存在气泡和壁面滑移等。Tuo 等[15]研究了 MHD 传感器安装位置的影响,得出 MHD 传感器的输出与安装位置偏心没有关系,仅安装倾角的余弦成正比。Yingjie 等[16]利用零差激光干涉仪开发了 MHD 传感器的绝对校准系统。

由于气体的密度、电导率和粘度等远小于导电流体,当导电流体含有气体时,其流场和电场的分布发生变化,对 MHD 传感器输出特性产生影响。本文通过 ANSYS Fluent 仿真软件对含气体导电流体的 MHD 传感器进行气液两相流数值模拟仿真,同时搭建试验平台进行试验研究。

1　MHD 传感器工作原理及输出模型

本节首先介绍 MHD 传感器的工作原理;然后,基于非惯性系统下的 Navier-Stokes 方程,建立基于 Fluent 的含气体导电流体 VOF 理论模型。

1.1　MHD 传感器工作原理

MHD 传感器的工作原理如图 1 所示。图中径向截面为矩形的环形通道(流体环),其内部注满高导电率的不导磁流体。流体环内、外表面为摩擦系数小的绝缘材料,上、下电极为高导电率的金属导电材料。径向辐射磁场 B_r 由高性能永磁体提供,流体环与永磁体固连,磁场 B_r 方向垂直于流体环圆柱表面。当 MHD 传感器接收到角振动 Ω_z 激励时,导电流体由于惯性,相对于流体环壁面保持静止,与流体环壁面产生相对运动,导电流体切割磁力线,在流体环上下电极之间产生与角振动 Ω_z 成正比的感应电动势 V_z。

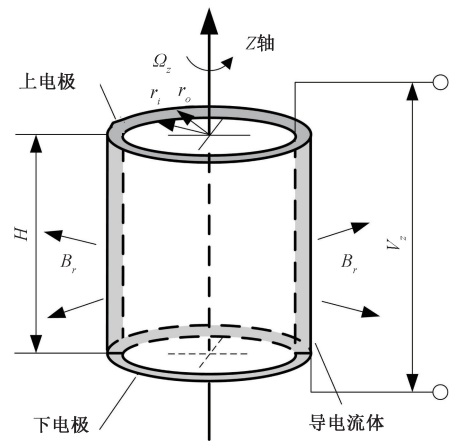


图 1　MHD 传感器工作原理示意图

Fig. 1　Schematic diagram of working principle of the MHD sensor

在非惯性系中,导电流体与电磁场在环形通道内的运动遵循如下方程:

$$\begin{cases} \dfrac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho U) = 0 \\ \rho\left(\dfrac{\partial U}{\partial t} + (U \cdot \nabla) U\right) = -\nabla p + \mu_f \nabla^2 U + \\ \quad J \times B - \dfrac{\partial \Omega}{\partial t} \times r - 2\Omega \times U \\ \dfrac{\partial B}{\partial t} = \nabla \times (U \times B) + \dfrac{1}{\mu\sigma}\nabla^2 B \\ \nabla \cdot B = 0 \end{cases} \tag{1}$$

式(1)分别为连续方程、运动方程以及磁扩散方程和高斯磁方程。其中,ρ 为导电流体密度,U 为相对速度,p 为压力,μ_f 为导电流体粘度,J 为电流密度,B 为磁感应强度,σ 为电导率,μ 为磁导率。

MHD 传感器传递函数可表示为:

$$\frac{V_z(s)}{\Omega_z(s)}=\frac{B_r r_{rms} Hs}{s+\dfrac{\mu_f}{\rho w^2}(1+\mathrm{Ha}^2)} \tag{2}$$

式中:B_r 为径向磁感应强度;r_{rms} 为流体环等效半径,$r_{rms}=\sqrt{(r_i^2+r_o^2)/2}$;$H$ 为流体环高度;w 为环形通道厚度,$w=r_o-r_i$;Ha 为 Hartmann 常数。

1.2 含气体 MHD 传感器 VOF 模型

流体环中导电流体中含一定量气体时,以 VOF 两相流模型为理论基础,通过相体积分数描述各相,将气体记为 g 相,导电流体记为 l 相,且共享动量方程。则式(1)中导电流体混合气体的等效密度和等效粘度及等效电导率可表示为:

$$\begin{cases}\rho=\rho_g\alpha_g+\rho_l(1-\alpha_g)\\ \mu_f=\mu_{fg}\alpha_g+\mu_{fl}(1-\alpha_g)\\ \sigma=\sigma_g\alpha_g+\sigma_l(1-\alpha_g)\end{cases} \tag{3}$$

式中:下标 g,l 表示气体和导电流体。α_g 为气体体积分数,则导电流体体积分数为 $1-\alpha_g$,同时体积分数 α_g 满足 VOF 界面运输方程:

$$\frac{\partial\alpha_g}{\partial t}+\nabla(\alpha_g\cdot U)=0 \tag{4}$$

当 $\alpha_g=1$ 时表示该区域完全被气体充满;当 $0<\alpha_g<1$ 时表示该区域为气体和导电流体交界面;当 $\alpha_g=0$ 时表示该区域完全被导电流体充满。

以导电流体为连续相,则导电流体的连续方程为:

$$\frac{\partial}{\partial t}(1-\alpha_g)\rho_l+\nabla(1-\alpha_g)\rho_l u_l=\dot{m}_{gl} \tag{5}$$

式中:u_l 为导电流体速度,$\dot{m}_{gl}$ 为从气体到导电流体的质量传递。

由质量守恒可得:

$$\begin{cases}\dot{m}_{gl}=-\dot{m}_{lg}\\ \dot{m}_{gg}=\dot{m}_{ll}=0\end{cases} \tag{6}$$

则导电流体的动量方程为:

$$\frac{\partial}{\partial t}((1-\alpha_g)\rho_l u_l)+\nabla\cdot((1-\alpha_g)\rho_l u_l u_l)=$$
$$-(1-\alpha_g)\nabla p+\nabla\cdot\tau_l+(1-\alpha_g)\rho_l g+$$
$$\sum F-\frac{\partial\Omega}{\partial t}\times r-2\Omega\times U \tag{7}$$

式中:p 为各相共同压力,τ_l 为导电流体压力应变张量,$\sum F$ 为导电流体与气泡之间的作用力。气体在导电流体中以气泡的形式存在,其受到的作用力 $\sum F$ 有:浮力、重力、表面张力以及导电流体对气泡的拖曳力及洛伦兹力等,如图 2 所示。图中 r 为流体环径向方向,θ 为导电流体流动方向的切向,即沿流体环圆周的切线方向,z 为流体环旋转轴的方向。气泡沿 r,θ,z 方向的受力可表示为:

$$\begin{cases}\sum F_r=F_{qs}+F_{dur}+F_h-F_{sr}\\ \sum F_\theta=F_{qs}+F_{du\theta}+F_h-F_{s\theta}-F_l\\ \sum F_z=F_{sl}+F_b+F_{sz}+F_{duz}\end{cases} \tag{8}$$

式中:F_s 为表面张力;F_{du} 为气泡生长力;F_{sl} 为剪切升力;F_{qs} 为导电流体对气泡的拖曳力;F_b 为浮力;F_h 为动压力;F_l 为洛伦兹力。

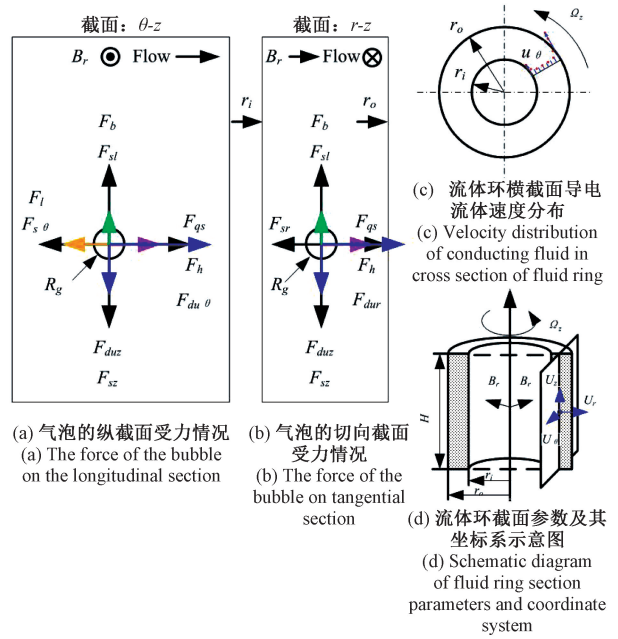


图 2 导电流体中单个气泡的受力示意图

Fig. 2 Schematic representation of forces on a bubble in the conducting fluid

表面张力 F_s 是导电流体与气泡交界面处由于液体表面分子引力不均衡而产生的沿表面作用于界面上的张力,方向由气泡表面指向中心,采用 Brackbill 等提出的连续表面应力(continuum surface force,CSF)模型:

$$F_s=\frac{\sigma_s\kappa\nabla\alpha_g}{\dfrac{1}{2}(\rho_l+\rho_g)} \tag{9}$$

式中:σ_s 为表面张力系数;κ 为界面曲率;α_g 为气体的体积分数;ρ_l 为导电流体密度;ρ_g 为气泡内气体密度。

气泡生长力 F_{du} 是由于气泡的非对称生长和导电流体的流动不稳定而产生的力[17]:

$$F_{du}=-\rho_l\pi R_g^2\left(\frac{3}{2}C\dot{R}_g^2+\dot{R}_g\ddot{R}_g\right) \tag{10}$$

式中:$\dot{R}_g$,$\ddot{R}_g$ 为气泡半径对时间的一阶导数和二阶导数;

C 为经验系数。

剪切升力 F_{sl} 是由于导电流体的粘滞作用而对气泡产生的剪切力:

$$F_{sl}=\frac{\mathrm{K}_1\pi\rho_l u_\theta^2 R_g^2}{2}\left[G_s^{0.5}\left(Re_b^{-2}+\mathrm{K}_2G_s^2\right)^{0.25}\right] \tag{11}$$

式中:Re_b 为气泡雷诺数;K_1,K_2 为常数,u_θ 为 u_l 的切向分量。

拖曳力 F_{qs} 为导电流体的流动对气泡产生的拖拽力:

$$F_{qs}=6\mathrm{K}_3\pi\mu_f u_\theta R_g \tag{12}$$

式中:K_3 为常数。

浮力 F_b 是由于气泡内气体密度小于导电流体密度而产生的向上升力:

$$F_b=\frac{4}{3}\pi R_g^3(\rho_l-\rho_g)g \tag{13}$$

式中:g 为重力加速度。

动压力 F_h 是运动过程中导电流体对气泡产生的推动力:

$$F_h=\frac{9}{8}\rho_l u_\theta^2\pi R_g^2 \tag{14}$$

洛伦兹力 F_l 是导电流体在磁场中运动产生的力:

$$F_l=J\times B_r=\sigma_l B_r^2 u_\theta/\rho_l \tag{15}$$

由于气体的密度、粘度和电导率均远小于导电流体,因此导电流体中含有气体后,其等效密度、粘度和电导率将降低,从而使得 MHD 传感器的性能下降。在式(8)中,除洛伦兹力与气泡无关外,其余各作用力均与气泡相关。其中气泡生长力、剪切升力、拖曳力跟导电流体与气泡的速度有关。在图 2(a)Section θ–z 中,气泡右侧的导电流体由于粘滞等作用对气泡产生拖曳力 F_{qs},而气泡左侧的导电流体则对气泡左侧界面产生动压力 F_h,气泡在导电流体作用下随其一起运动。在图 2(b)Section r–z 中,其内侧 r_i 的切向速度 u_θ 小于外侧 r_o 的切向速度 u_θ,如图 2(c)所示,因此导电流体中气泡的内侧和外侧受到的力不相等,内侧力比外侧力小,因此气泡有向内侧(即流体环中心线)移动的趋势,同时由于受力不均导致气泡形状发生变化,气泡形状变化引起表面张力 F_s 变得不均衡,容易导致气泡破裂。当流体环中产生感应电流并通过气泡位置时,由于气体的电导率为 0,感应电流绕行气泡壁面,从而使得气泡周围的电场分布发生扭曲,从而影响流体环的输出电势。

2　仿真及结果分析

利用计算流体力学(computational fluid dynamics,CFD)软件,对流体环进行简化建模,在 Fluent 软件中添加 MHD 模块[18],导入流体环的外部磁场,设置 VOF 两相流参数,对含气体的导电流体两相流与磁场动态耦合进行求解。

2.1　仿真模型及仿真设置

仿真模型通过 ANSYS Workbench 建立,流体环模型为矩形截面的环状结构,模型表面定义 4 个不同的边界条件,分别模拟流体环上、下电极导电面和内、外绝缘壁面。在 Fluent 中将流体环 4 个壁面边界均为 wall 类型,导电流体与壁面之间设置为无滑移[19],导电流体相对于壁面运动,绕流体环轴线转动,由 UDF 导入给定幅值和频率的正弦角振动。对仿真模型材料进行两相流设置,设置气体为空气,为主相;导电流体为次相;气液两相界面的表面张力系数设置为 0.485,相关物理特性如表 1 所示。加载 MHD 隐藏模块,MHD 模块采用磁势法进行求解,导入由电磁场仿真软件 Ansoft Maxwell 及 MATLAB 生成的径向辐射磁场,并将其加载至仿真模型。模型流动为非稳态流动,求解时间相为瞬态,设置重力加速度为 Z 轴负方向,大小为 $g=9.81\ \mathrm{m/s^2}$;动量方程和磁场方程中的通量估算采用二阶迎风格式,计算步长为角振动频率的 1%。

表 1　导电流体和气体相关物理参数

Table 1　Related physical characteristics of conductive fluid and gas

参数	单位	导电流体	空气
粘度	10^{-3}Pa·s	1.523	0.018
密度	kg/m^3	13.529×10^3	1.224
电导率	S/m	1.044×10^6	0

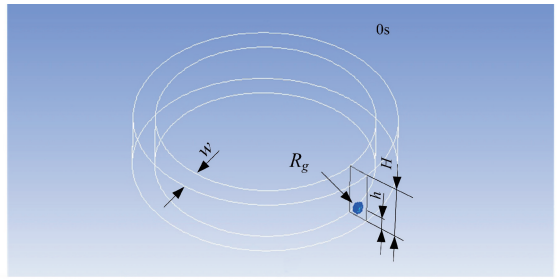
2.2　仿真结果及分析

图 3 为导电流体中的气泡随流体环在不同频率下的运动状态分析,流体环结构内、外径分别为 r_i、r_o,轴向高度为 H,气泡半径为 $R_g=w/5$。为防止流体环壁面对气泡运动的影响,气泡中心设置在流体环径向的中部,距离底面高度 $H/5$ 处,正弦角振动为 $\Omega_z=U_r\cdot\sin(2\pi f_r t)$,图中 $T=1/f_r$。由图 3 可知:1)当角振动频率较低时(0.1、10 Hz),气泡被分裂成更多小气泡,以原气泡所在位置中心弥散分开;2)当角振动频率较高时(100、1 000 Hz),经一个时间周期,气泡沿磁场方向被拉伸,沿轴向变化较小。由式(8)可知,流体环受到角振动时,气泡受到的剪切力、拖曳力及动压力等均与气液接触界面处速度相关,导电流体与气体的相对速度越大则作用力越大。流体环内导电流体的雷诺数[20](惯性力与粘性力之比)为:

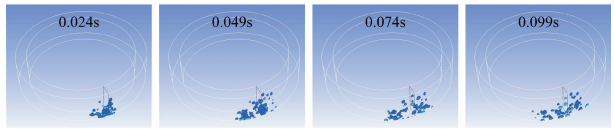
$$Re=\rho UL/\mu_f=\mathrm{K}U_r^2 f_r \tag{16}$$

式中:K 为常数。当角振动频率较低时,Re 值较小,粘性力大于惯性力,粘性力占主导,气泡与导电流体在粘性力作用下随流体环壁面运动,气泡和导电流体不同的位置产生速度差,导电流体对气泡施加的力不平衡,气泡的受

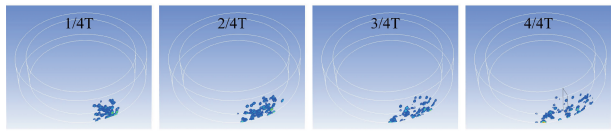
力发生变化,使得气泡产生发生形变,直至被撕裂成更多小的气泡;当角振动频率较高时,*Re* 值较大,惯性力占据主导,气泡与导电流体由于惯性力保持相对静止不动,气泡与导电流体的状态保持不变,气泡的受力变化较小。



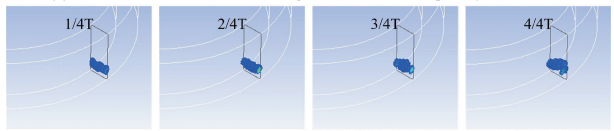
(a) 流体环相关参数及气泡位置示意图
(a) Schematic diagram of fluid ring parameters and bubble position



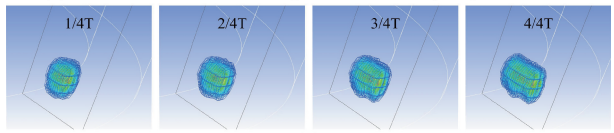
(b) 角振动频率为0.1 Hz下的气泡运动状态
(b) Bubble motion state under angular vibration frequency of 0.1 Hz



(c) 角振动频率为10 Hz下的气泡运动状态
(c) Bubble motion state under angular vibration frequency of 10 Hz



(d) 角振动频率为100 Hz下的气泡运动状态
(d) Bubble motion state under angular vibration frequency of 100 Hz



(e) 角振动频率为1 000 Hz下的气泡运动状态
(e) Bubble motion state under angular vibration frequency of 1 000 Hz

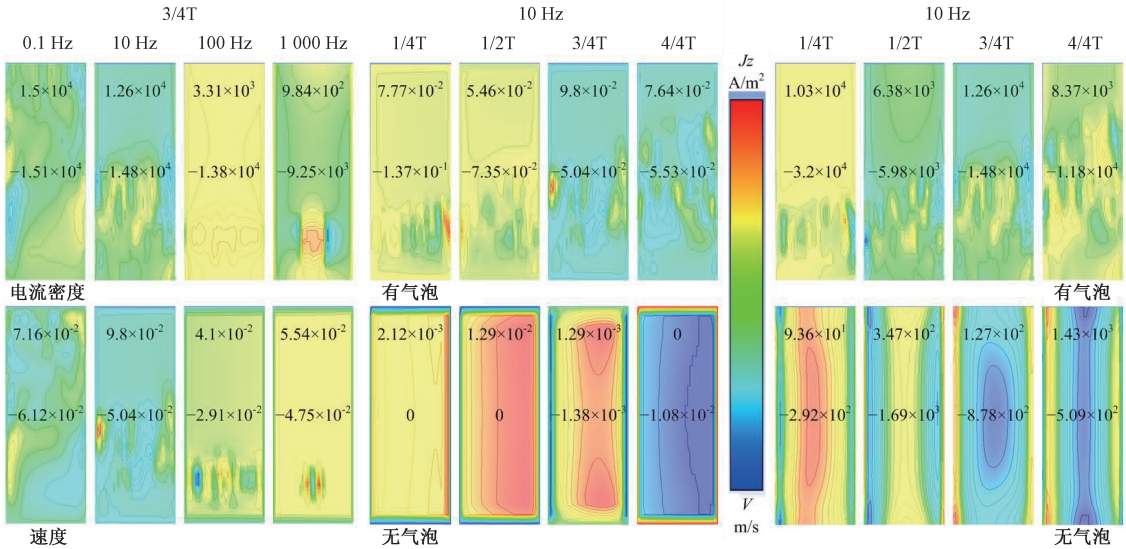
图 3 不同角振动频率下气泡的运动状态

Fig. 3 Motion state of bubble under different angular vibration frequencies

图 4 为流体环径向截面的流场和电场的云图,截面云图上的数字表示云图色阶的最大值和最小值。图 4(a)为不同频率下的气泡所在截面 3/4 T 时的电流密度和切向速度云图,图 4(b)、(c)为 f_r = 10 Hz 时 1 个周期内有气泡和无气泡时的气泡所在截面的切向速度、电流密度分布。由图 4 可知:1)随着角振动频率的增加,气泡对流体环的流场和电场的影响范围逐渐减小,低频(f_r = 0.1 Hz)时,气泡影响将近半个截面,高频(f_r = 1 000 Hz)时则仅影响气泡附近的局部范围;2)没有气泡的流体环截面流场和电场呈规则分布,有气泡的流体环截面由于气泡的存在扭曲了气泡位置的流场和电场,使其发生紊乱,图中表明截面流场和电场发生了较大偏移和畸变。

如图 5 所示为不同气体含量对 MHD 传感器输出特性的影响。由图 5 可知:1)当气体含量较高时,MHD 传感器输出电势出现异常、畸变,主要表现为谐波增加(曲线不平滑),出现突跳及突跳点增多(表现为曲线不连续,突跳点为异常值,数据处理时被剔除),如图 5 中气体含量为 2%,5%;2)当角振动频率相同时,随着气体含量的增加,MHD 传感器输出电势逐渐降低,波动逐渐增大。如频率 f_r = 5 Hz,气体含量为 1%时,输出电势为 35.46 μV;气体含量为 2%时,输出电势为 33.858 μV,气体含量为 5%时,输出电势为 29.106 μV;3)MHD 传感器输出波形随气体含量的增加有一个明显的零偏,气体含量越大,零偏越大,角振动频率越低,零偏越大。

图 6 和 7 分别为在相同气体含量下角振动频率和幅值对 MHD 传感器输出特性的影响,由图 6 和 7 可知:



(a) 3/4T时不同频率下纵截面的电流密度和速度云图
(a) Current density and velocity nephogram of longitudinal section at different frequencies at 3/4T

(b) 10 Hz时不同时刻有、无气泡时纵截面的速度云图
(b) Velocity nephogram image of longitudinal section with and without bubbles at different times at 10 Hz

(c) 10 Hz时不同时刻有、无气泡时纵截面的电流密度度云图
(c) Current density nephogram of longitudinal section with and without bubbles at 10 Hz

图 4　流体环截面流场和电场云图对比

Fig. 4　Comparison of flow field and electric field cloud images in fluid ring section

1) 当气体含量为 0% 时,MHD 传感器输出电势在 0.1 ~ 1 000 Hz 角振动频率带内无谐波;2) 当导电流体中含气体时,气体含量越高,MHD 传感器产生谐波时的频率越高,如当气体含量为 0.1%,角振动频率小于 1 Hz 时产生谐波分量;当气体含量为 1%,角振动频率小于 10 Hz 时产生谐波分量;3) MHD 传感器输出电势的零偏随气体含量的增大而增大,随角振动频率的增大而减小,如气体含量为 0% 时的最大零偏为 8.25 μV,气体含量为 0.1% 时为 17.05 μV,气体含量为 1% 时为 19.25 μV;4) 相同角振动频率下,气体含量低时的线性度优于气体含量高时的线性度;5) 相同气体含量下,角振动频率较高(f_r = 25 Hz) 时的线性度优于角振动频率低(f_r = 5 Hz) 时的线性度;6) 相同气体含量和相同角振动频率下,线性度随着角振动幅值的增大而变好。

MHD 传感器使用领域主要是航天器的角振动的测量,当其在太空环境中工作时的重力加速度与地面完全不同。图 8 为在相同气体含量下不同重力加速度对 MHD 传感器输出特性的影响。由图 8 可知:当气体含量为 0% 时,重力加速度的变化不影响 MHD 传感器输出特性;而在相同气体含量下,MHD 传感器输出波形畸变和零偏随着重力加速度的增大而增大;在相同重力加速度下,MHD 传感器输出电势畸变随着气体含量的增大而增大。由于气泡中气体密度远小于导电流体密度,浮力随重力加速度的变化而变化,气泡受力及其形态发生改变,影响导电流体的流场,从而影响 MHD 传感器的输出特性。

在实际应用中,MHD 传感器敏感轴与角振动旋转轴不会绝对的重合,当两轴共面时,两轴的间距被定义为偏心距。图 9 为相同气体含量下偏心对 MHD 传感器输出电势的影响,由图 9 可知:当气体含量为 0% 时,MHD 传感器输出特性不受偏心距大小的影响;当气体含量一定时,MHD 传感器输出电势影响随偏心距增大而增大。分析原因为偏心距的存在使得流体环内导电流体的离心力增大,且导电流体离心力分布在远离旋转轴处大于靠近旋转轴处,因此气体在流体环中的分布状态发生变化,影响导电流体的流场分布;气体含量越高,对导电流体流场的影响就越大。

3　试验及结果分析

本节对一组不同气体含量的 MHD 传感器进行测试。测试环境为:温度 25±1℃,湿度 50% ~ 70%。

3.1　试验对象

采用相同材料和相同工艺,制作了 4 支不同气体含量的 MHD 传感器,其气体体积含量分别为 0%、0.57%、1.52%、5.73%。由于导电流体中气体体积无法精确控制,制作时根据导电流体灌装前、后的质量差来计算流体环中的导电流体质量,然后与充满整个流体环所需的导电流体的理论质量之比即可得到导电流体的体积含量,据此得到导电流体中的气体体积含量。

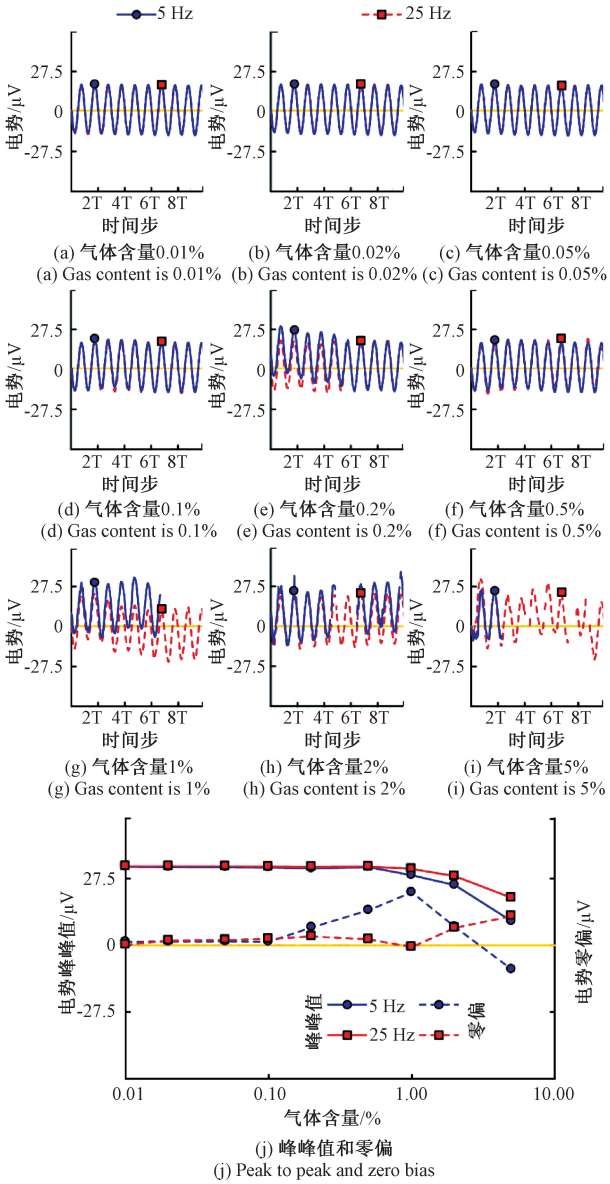


图 5 气体含量对 MHD 传感器输出特性的影响

Fig. 5 Influence of gas content on output characteristics of the MHD sensor

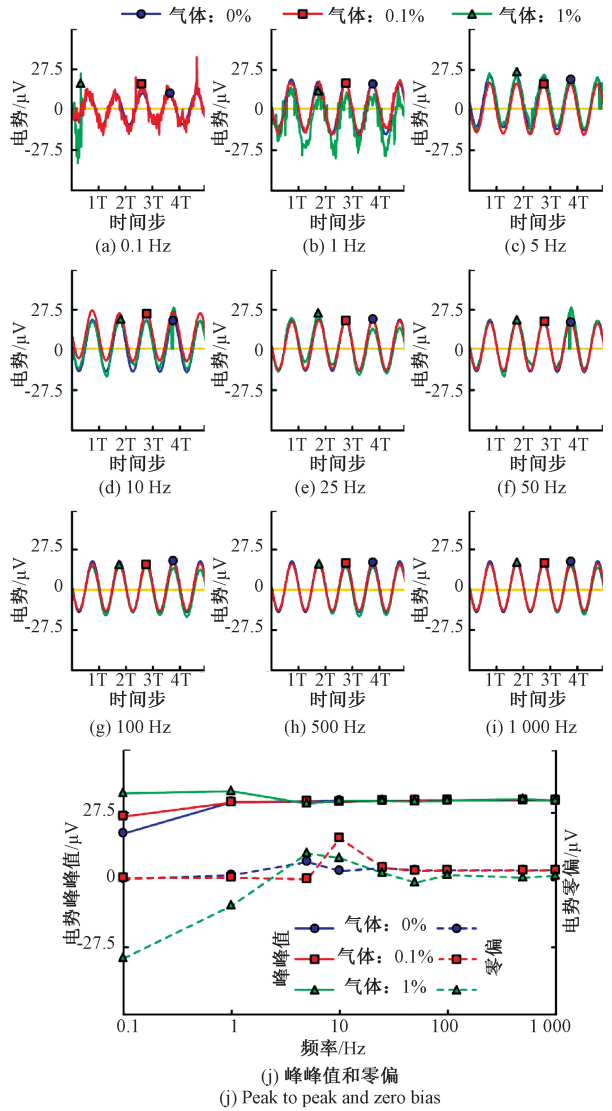


图 6 角振动频率对含气体 MHD 传感器输出特性

Fig. 6 Influence of angular vibration frequency on output characteristics of the gas-containing MHD sensor

3.2 试验平台

试验平台如图 10 所示，主要包括转台、采集卡、工控机、MHD 传感器、电源、配套线缆以及转台控制程序、LabVIEW 编写的 MHD 传感器自动化采集程序等。转台采用 ACUITAS 公司的高精度气浮速率转台 TES_3V-AB，转台工作截止频率(-3 dB)在 100 Hz 以上，最高能够达到±1 000°/s 的转速，内置角速度传感器，输出的模拟信号可以通过采集卡进行采集。采集卡采用美国 NI 公司的 NI PCI-6289 型板卡，该板卡具有 24 位 A/D 采集卡，32 路模拟输入和 4 路模拟输出，48 条数据 I/O 线可通过模拟和数字触发。

将 MHD 传感器通过工装安装到转台上，使其敏感轴与转台旋转轴重合，然后进行相关试验。偏心试验时按照转台台面上的安装孔尺寸将安装工装进行偏移，使 MHD 传感器敏感轴与转台旋转轴产生偏心。

3.3 试验方法

1)静态噪声测试方法：将 MHD 传感器置于转台上，不启动转台，开启传感器。在输出信号稳定后，对 MHD 传感器的静态输出信号 $x(t)$ 进行采样，采样频率不低于带宽 10 倍，采样时间不低于 100 s。取有限长的输出信号样本序列 $x(n)$，使用 Welch 方法计算序列的功率谱密度，得到 MHD 传感器静态电压噪声功率谱密度(power spectral density, PSD)为 $P_{xxw}(f)$，单位为 V^2/Hz。

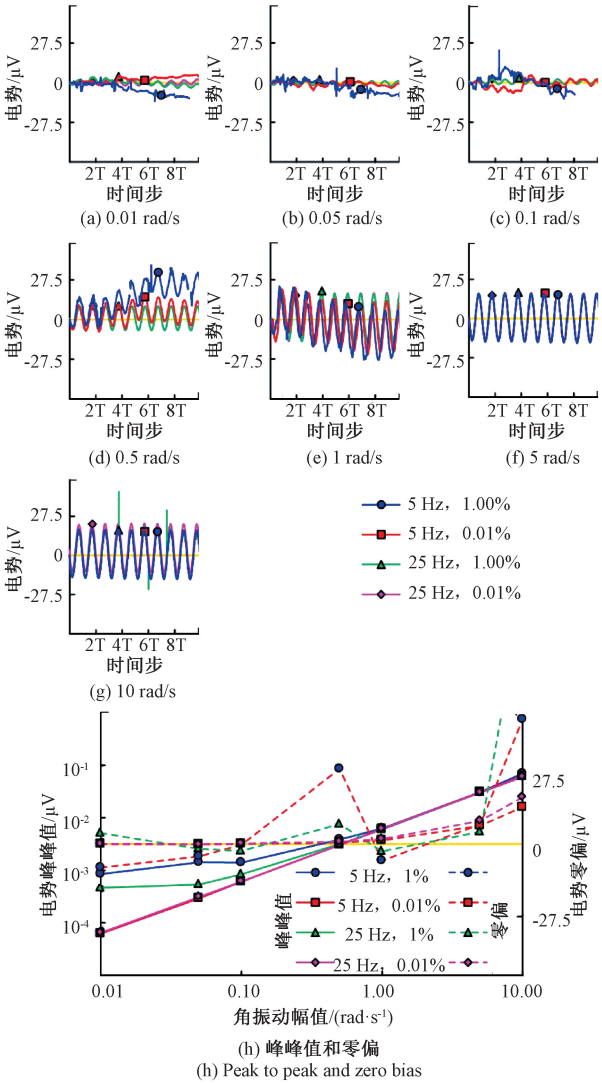


图 7　角振动幅值对含气体 MHD 传感器输出特性的影响

Fig. 7　Influence of angular vibration amplitude on output characteristics of the gas-containing MHD sensor

2)幅频特性试验方法:将 MHD 传感器通过专用工装固定在转台上,MHD 传感器敏感轴与转台旋转轴重合。通过转台控制程序控制转台输出给定的角振动,待转台运行平稳后对转台和 MHD 传感器输出进行波形采样。MHD 传感器标度因数为在测试量程范围内,在固定频率角振动激励下,MHD 传感器输出电势幅值与角振动幅值的比值,通过最小二乘法拟合求得 MHD 传感器标度因数。

3)线性度试验方法:在 MHD 传感器测量范围内,在固定频率、不同角振动幅值激励下,MHD 传感器输出线性度可采用 MHD 传感器实际输出电势幅值与线性回归拟合直线上对应的理想输出电势幅值的绝对偏差除以试

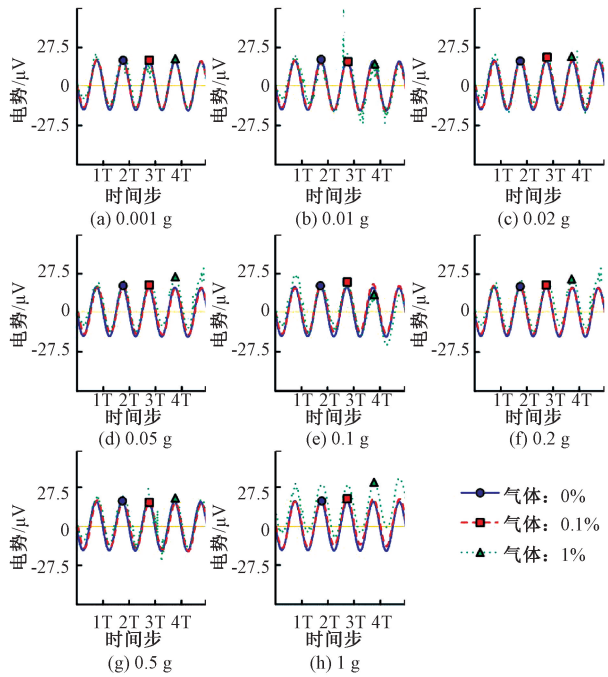


图 8　重力加速度对含气体 MHD 传感器输出特性的影响

Fig. 8　Influence of acceleration of gravity on output characteristics of the gas-containing MHD sensor

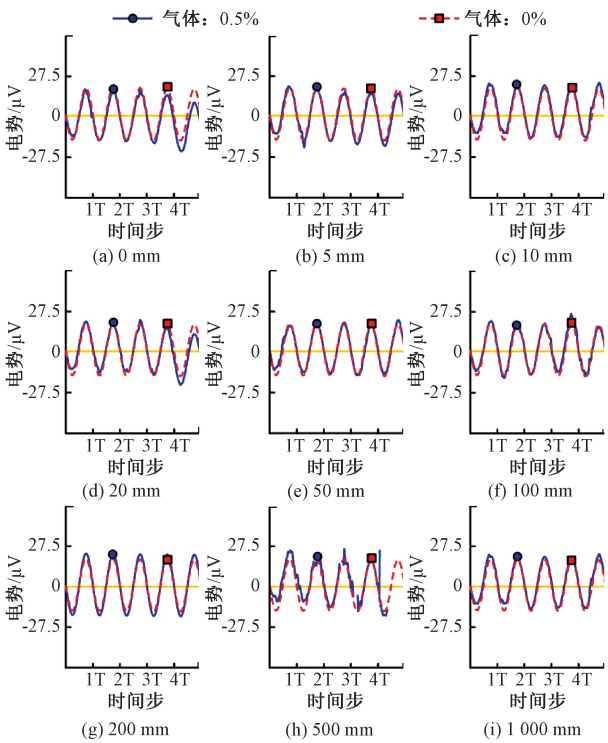


图 9　偏心对含气体 MHD 传感器输出特性的影响

Fig. 9　Influence of eccentricity on output characteristics of the gas-containing MHD sensor

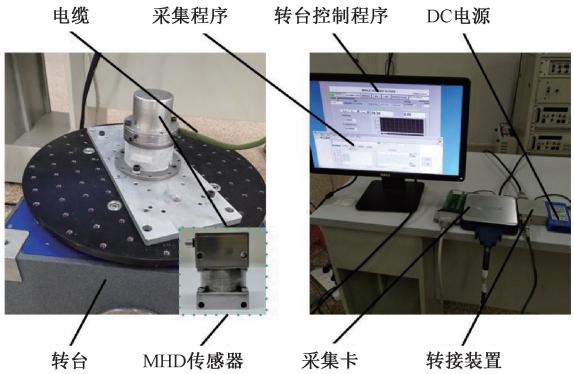


图 10 试验平台

Fig. 10 Experimental platform

验中最大拟合线性输出值的百分数表示。

4)重复性试验方法:按步骤进行 MHD 传感器幅频特性试验,每次测试完成后,关闭 MHD 传感器和转台电源,断电时间>2 h,然后重复步骤试验。试验重复 7 次,然后计算幅频特性的均值、标准差及变异系数(标准差与均值之比的百分数,以此值来表征 MHD 传感器的重复性)等,取其频带范围内变异系数的最大值为 MHD 传感器的重复性。

3.4 试验结果分析

图 11~13 分别为不同气体含量 MHD 传感器的静态噪声曲线、频率响应曲线及线性度曲线。由图 11~13 可知:1)导电流体中含有气体对 MHD 传感器的静态噪声不产生影响;2)气体含量为 0%时,MHD 传感器输出在整个测试频率范围内的标度因数曲线比较平滑,且测试的重复性小于 0.2%(指标<0.5%);3)随着气体含量的增加,MHD 传感器标度因数波动变大,测试重复性变差;4)MHD 传感器标度因数重复性随着气体含量的增加而变差,同时气体含量较小时(0%、0.57%),MHD 传感器的

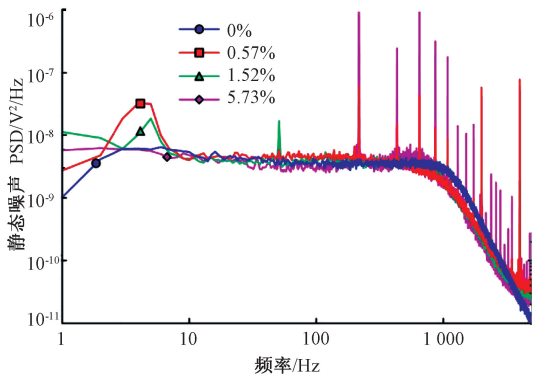


图 11 不同气体含量 MHD 传感器静态噪声 PSD

Fig. 11 Different gas content MHD sensor static noise PSD

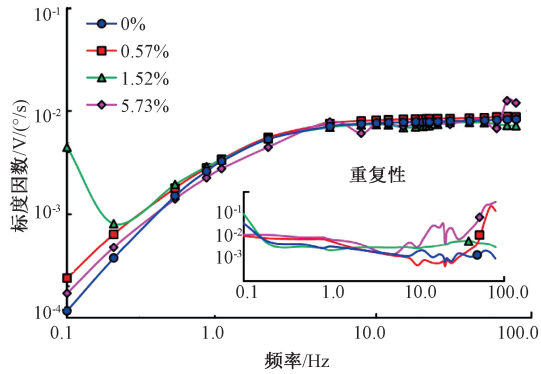


图 12 不同气体含量 MHD 传感器幅频特性

Fig. 12 Amplitude-frequency characteristics of the MHD sensors with different gas content

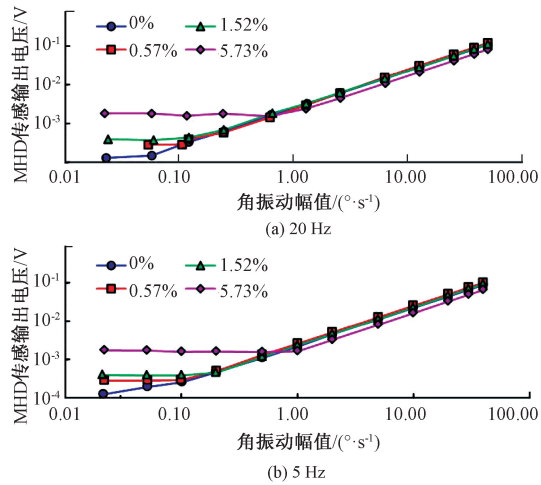


图 13 不同气体含量 MHD 传感器线性度

Fig. 13 Linearity of the MHD sensor with different gas content

线性度均较好,线性拟合优度 $R^2>0.998$(指标>0.99),当气体含量变大时,MHD 传感器输出的线性度变差,气体含量为 1.52%和 5.73%时的线性拟合优度 R^2 分别为 0.927 和 0.74。由此可知:随着气体含量的增加,MHD 传感器标度因数的幅频特性和重复性及线性度均变差,与仿真趋势一致。

图 14 为不同气体含量的 MHD 传感器在偏心状态下的输出特性曲线。由图可知:当气体含量为 0%时,不同位置的 MHD 传感器输出标度因数的变异系数在频带范围(2~1 000 Hz)内小于 0.5%,在 MHD 传感器的重复性指标范围内,认为偏心对 MHD 传感器没有影响[15];当导电流体中气体含量较小(气体含量为 0.57%)时,偏心对 MHD 传感器的输出特性影响较小,变异系数为 0.8%,但随着气体含量的增加,在相同频率下的 MHD 传感器标度因数的漂移随着偏心距的增加而增大,试验结果与仿真曲线趋势一致。

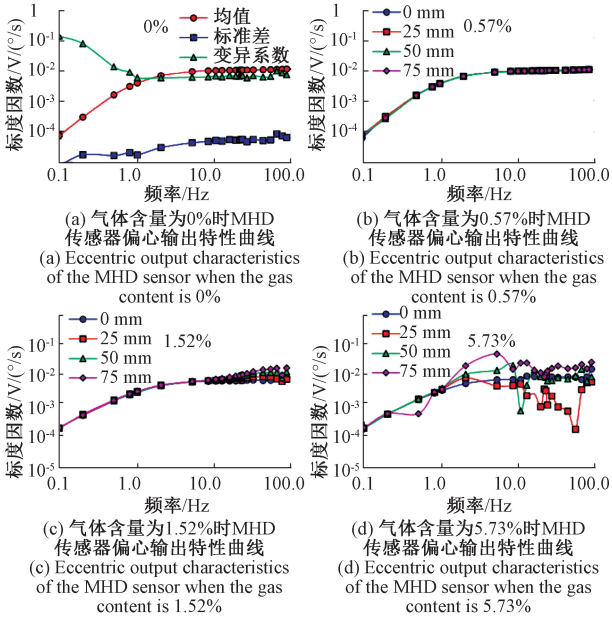


图 14　含气体 MHD 传感器偏心输出特性

Fig. 14　Eccentric output characteristics of the MHD sensor with gas content

4　结　　论

本文以 MHD 传感器中的含气体导电流体为研究对象,利用 ANSYS Fluent 软件进行气液两相流数值模拟仿真,分析了导电流体中单个气泡在角振动环境下的运动状态变化及含气体导电流体的 MHD 传感器的输出特性;同时搭建了试验平台对含气体导电流体的 MHD 传感器进行测试。结果表明:导电流体中的气泡在低频时容易被拉伸撕裂成尺寸更小气泡并随着导电流体的运动而分散,同时气泡影响导电流体的流场和电场分布;当导电流体中含有气体时,由于气体和导电流体性能上的差异,使得 MHD 传感器的输出特性的畸变随气体含量、重力加速度和 MHD 传感器安装位置偏心量的增大而增大,随角振动的频率和幅值的增大而减小;当导电流体中气体含量<0.5% 时,气体对 MHD 传感器的输出特性影响较小,能够满足其使用时的要求。因此,减小导电流体中的气体含量,可以提高 MHD 传感器精度和稳定性,对 MHD 传感器的设计及其灌装工艺控制具有积极指导意义。

参考文献

[1] MIAO H, SONG G L, LIU Q. Micro-vibration analysis and measurement on high resolution remote sensing satellites[J]. Applied Mechanics and Materials, Trans Tech Publ, 2012, 232: 432-436.

[2] LAUGHLIN D, SMITH D. Development and performance of an angular vibration sensor with 1~1 000 Hz bandwidth and nanoradian level noise[J]. Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering, 2002, 4489: 208-214.

[3] ZHANG H F, DU Q Y, QIAO C F. Present state and trends of the geoinformation industry in China [J]. Sustainability, 2015, 7(3): 2871-2884.

[4] XU M, LI X, WU T, 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.

[5] 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, 15:31606-31619.

[6] GRACE J R, WAIREGI T, NGUYEN T H. Shapes and velocities of single drops and bubbles moving freely through immiscible liquids [J]. Trans. Inst. Chem. Eng, 1976, 54(3): 167-173.

[7] MORI Y, HIJIKATA K, KURIYAMA I. Experimental study of bubble motion in mercury with and without a magnetic field [J]. Journal of Heat Transfer, 1977, 99(3): 404-410.

[8] ZHANG C, ECKERT S, GERBETH G. Experimental study of single bubble motion in a liquid metal column exposed to a DC magnetic field [J]. International Journal of Multiphase Flow, 2005,31(7): 824-842.

[9] OHTA M, IMURA T, YOSHIDA Y, et al. A computational study of the effect of initial bubble conditions on the motion of a gas bubble rising in viscous liquids[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2005, 31(2): 223-237.

[10] HUA J, LOU J. Numerical simulation of bubble rising in viscous liquid [J]. Journal of Computational Physics, 2007, 222(2): 769-795.

[11] QINCHENG B I, SHI D X, YONGQING H E, et al. Behavior of single bubble rising in magnetic fluid under magnetic field [J]. Journal of Thermal Science and Technology, 2010, 9(3):189-193.

[12] 张舍,莫润阳,王成会. 强磁场对镓流体中气泡振动的阻尼效应[J]. 南京大学学报(自然科学),2017,53(1):34-40.
ZHANG SH, MO R Y, WANG CH H. Damping effect of a high magnetic field on gas bubbles in gallium fluid[J]. Journal of Nanjing University (Natural Sciences), 2017, 53(1):34-40.

[13] LAUGHLIN D, SEBESTA H R, BAKER D. A dual

function magnetohydrodynamic (MHD) device for angular motion measurement and control [J]. Adv. Astronaut. Sci., 2002 (111):335-348.

[14] ZHOU H J, DETIAN L I, CHEN G F. Numerical modeling and experimental verification on sensitivity properties of MHD sensor[J]. DEStech Transactions on Computer Science and Engineering, 2018, DOI: 10.12783/dtcse/pcmm2018/23682.

[15] TUO W, LI X, JI Y, et al. Quantitative analysis of position setting effect on magnetohydrodynamics angular vibration sensor response[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2021, 332:113194.

[16] YINGJIE W, XINGFEI L, FAN L, 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.

[17] BRACKBILL J U, KOTHE D B, ZEMACH C. A continuum method for modeling surface tension [J]. Journal of Computational Physics, 1992, 100 (2): 335-354.

[18] 周子晨,李醒飞,徐梦洁. 一种磁流体动力学线振动传感器的结构设计[J]. 现代制造工程, 2021 (9): 112-117.
ZHOU Z CH, LI X F, XU M J. Structural design and simulation analysis of magnetohydrodynamic linear vibration sensor[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2021(9):112-117.

[19] 王智威, 严微微, 肖云巩,等. 气体涡轮流量计性能优化的模拟与实验研究[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(1):28-34.
WANG ZH W, YAN W W, XIAO Y G, et al. Study on performance optimization of gas turbine flowmeter by numerical simulation and experimental measurement[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43 (1): 28-34.

[20] KLAUSNER J, MEI R, BERNHARD D, et al. Vapor bubble departure in forced convection boiling [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1993, 36(3): 651-662.

作者简介

夏赣民,2005 年于天津大机械学院学固体力学专业获硕士学位。现于天津大学精密仪器与光电工程学院攻读博士学位。主要研究方向为磁流体角振动传感器结构优化设计。

E-mail: shenlongmingxia@126.com

Xia Ganmin received his M. Sc. degree in Solid Mechanics from Tianjin University of Machinery in 2005. He is currently pursuing his Ph. D. degree in College of Precision Instrument and Opto-Electronic Engineering at Tianjin University. His current main research interest is structural optimization design of the MHD sensor.

李醒飞(通信作者),天津大学精密仪器与光电工程学院教授。1994 年和 2000 年分别获得东南大学仪器科学与技术硕士学位和天津大学精密仪器与光电工程学院博士学位。1996 年~1999 年,香港理工大学担任研究员;2003 年~2004 年,美国密歇根大学从事机械工程博士后研究。主要研究方向为智能制造、惯性传感、海洋预测与观测。

E-mail: lixftju@hotmail.com

Li Xingfei (Corresponding author) is a professor in the College of Precision Instrument and Opto-Electronics Engineering of Tianjin University. He received his M. Sc. degree in Instrument Science and Technology from Southeast University and Ph. D. degree in the College of Precision Instrument and Opto-Electronics Engineering at Tianjin University in 1994 and 2000. He worked as a researcher at The Hong Kong Polytechnic University from 1996 to 1999 and did postdoctoral research in Mechanical Engineering at the University of Michigan, USA from 2003 to 2004. His current main research areas include intelligent manufacturing, inertial sensing, and ocean prediction and observation.

刘帆,2018 年于天津大学精密仪器与光电工程学院获硕士学位,现于天津大学精密仪器与光电工程学院攻读博士学位。主要研究方向为磁流体角振动传感器的微弱信号的检测检测及电路设计。

E-mail: liufan@tju.edu.cn

Liu Fan graduated from School of Precision Instrument and Optoelectronic Engineering of Tianjin University with a master degree in 2018. He is currently pursuing his Ph. D. degree in School of Precision Instrument and Opto-Electronic Engineering at Tianjin University. His current research interests include weak signal detection and circuit design of MHD sensor.