

DOI: 10.7652/xjtuxb201902001

一种新型磁流体加速度传感器

张西宁, 夏心锐, 向宙, 张雯雯

(西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 为了解决传统磁流体加速度传感器体积大、灵敏度低、线性度差、使用频率范围低等缺点,设计了一种新型磁流体加速度传感器。采用圆柱形永磁铁作为惯性质量,将加速度转化为磁场的变化,利用高灵敏度线性霍尔检测磁场变化,从而实现加速度到电信号的转变。通过仿真和实验分别对磁流体的悬浮效应、阻尼效应以及圆柱形永磁铁的磁场分布情况进行了研究,结果表明:在永磁铁体积较小的情况下,永磁铁受到的悬浮力很小;在磁场作用下,磁流体具有非常优越的阻尼性能。基于永磁铁的磁场分布情况的研究结果,选取磁场变化梯度最大且线性度最好的位置安装霍尔元件,从而提高传感器灵敏度。利用振动实验台,对所设计的传感器性能进行实验验证,结果表明,新型磁流体加速度传感器具有较好的线性度和较大的可用频率范围,在其他结构不变的前提下,磁流体的使用将加速度传感器的可用频率范围提高了 256%。本文为研究磁流体的悬浮效应和阻尼效应提供了一种策略,也为加速度传感器的研究和改进提供了一种新的思路。

关键词: 加速度传感器;磁流体;霍尔元件;永磁铁

中图分类号: TH17 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2019)02-0001-08

A Novel Magnetic Fluid Inertial Sensor

ZHANG Xining, XIA Xinrui, XIANG Zhou, ZHANG Wenwen

(State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To solve the shortcomings of the traditional magnetic fluid inertial sensors, such as large volume, small sensitivity, low linearity and narrow available frequency domain, a novel magnetic fluid inertial sensor is designed. A cylindrical permanent magnet serves as the inertial mass to transform the acceleration value into the change of the magnetic field. Linear Hall sensor with high sensitivity is used to detect the change of the magnetic field, thus the acceleration is transferred to the electrical signal. By simulation and experiment, the suspension effect, damping effect of magnetic fluid and the distribution of the magnetic field of a cylindrical permanent magnet are investigated. It is verified that the suspension force is slight in the case that permanent magnet volume is small and the magnetic fluid has excellent damping effect under the action of magnetic field. The position of the maximum gradient and the best linearity of the magnetic field are found to install the Hall sensor. The experiments show that the novel magnetic fluid accelerometer has better linearity and wider available frequency range. The added magnetic fluid widens the frequency range of the acceleration sensor by 256%.

Keywords: inertial sensor; magnetic fluid; Hall sensor; permanent magnet

收稿日期: 2018-07-05。 作者简介: 张西宁(1965—),男,教授,博士生导师。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51275379);国家自然科学基金创新研究群体资助项目(51421004)。

网络出版时间: 2018-10-31 网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20181031.0926.002.html>

计算机和通信技术的进步支撑起现代信息社会的蓬勃发展,而数据成为技术更新、实现、服务的核心动力,数据的获取和处理技术的发展是工业社会变革的基石,推动着工业向智能化转型^[1]。传感器作为信息转换的桥梁是一切数据获取的源头,其技术发展对于推动工业社会变革进程具有极为重要的意义。在工业场景中,加速度传感器是除压力传感器外使用频率最高的传感器^[2],对其技术的改进和研究具有重要意义。新材料、新结构在加速度传感器上的应用是加速度传感技术的发展方向^[3]。

磁流体是一种由磁性纳米颗粒、表面活性剂和基载液组成的胶状液体^[4],作为一种新型智能材料,磁流体在加速度传感器上的应用研究引起了国内外学者的重视^[5-6]。

按照惯性质量的不同,目前磁流体加速度传感器主要可分为将磁流体作为惯性质量、非导磁体作为惯性质量和永磁体作为惯性质量3种类型。2006年,意大利 Baglio 等提出一种球形磁流体作惯性质量的加速度传感器,该传感器固有频率为 0.8 Hz,测量范围为 $(8 \times 10^{-5} \sim 0.1)g$ (g 为重力加速度),适用于低频微小加速度的测量^[7]。由于该传感器采用电磁感应原理进行检测,线圈的设计使传感器体积庞大,在使用过程中,实际测量结果线性度差,实用价值不大。2007年,杨文荣等提出一种磁流体薄膜作为惯性质量的加速度传感器,以磁场力作为弹性力,以黏性力作为黏性阻尼,不需要移动的机械装置,实现了 8~16 Hz 频率范围内、最大加速度为 0.3g 的测量^[8]。罗马尼亚学者 Piso 等提出铝块悬浮于受梯度磁场作用的磁流体中的磁流体加速度传感器,通过电容检测铝块位移,灵敏度可达到 $10^{-6} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ ^[9]。2014年,Qian 等提出以永磁铁做惯性质量的加速度传感器,通过磁铁在磁流体中的二阶悬浮力提供回复力,并通过电感进行检测^[10],可实现最大加速度为 0.35g 的检测。2016年,Qian 等提出一种两轴磁流体加速度传感器,非导磁金属块悬浮于梯度磁场中,并通过差动电感进行检测,实验结果证明在 0.625g 以下的测量范围内两轴方向均具有良好的性能^[11]。

虽然磁流体在加速度传感器的应用研究上取得了一定的成果,但目前现有的加速度传感器由于换能元件一般为电容或电感,导致传感器体积大、质量大。在磁流体作惯性质量的加速度传感器中,外界磁场、温度使磁流体性能发生变化,并且和容器接触容易黏附,传感器稳定性欠佳。在永磁铁或非导体

体作为惯性质量的传感器中,磁流体作为弹簧,通过悬浮效应^[12-13]为惯性质量提供回复力,由于磁流体所能提供的回复力线性范围非常小,导致传感器可用频率很低,测量范围很小。

综上所述,目前研究的磁流体加速度传感器体积大、精度低,无法应用到实际工业环境中。本文研究磁流体在磁场作用下的阻尼表现规律,利用磁流体在磁场下的流变效应^[14],将磁流体作为加速度传感器的主要阻尼成分,在同等弹簧刚度条件下,拓宽了加速度传感器的可用频率,避免机械摩擦,提高了传感器使用寿命和稳定性。另外,将高强度永磁铁作为惯性质量,研究其磁场分布,将高精度霍尔元件作为检测元件,从而缩小了传感器体积。通过实验验证,本文所设计的传感器较传统磁流体加速度传感器体积小、可用频率高、线性度好、实用性强。

1 基础原理

1.1 工作原理

磁性纳米颗粒悬浮于基载液中形成磁流体,在磁场作用下,能够沿着磁场方向发生极化。由于在磁场作用下,磁性颗粒在磁场方向形成刚性链式结构,载液在运动过程中被迫沿着链条周围流动,导致磁流体黏度增加。这种在一定范围内磁流体黏度可以受磁场控制的特性,称为磁流体黏度特性^[15],在该特性作用下,磁流体可用来增加传感器系统的阻尼。另外,在梯度磁场作用下,磁流体可以悬浮起比自身密度大的物体。当悬浮物为非导磁体时,受到的悬浮力为一阶悬浮力;悬浮物为永磁铁时,称为二阶悬浮力,这种特性称为磁流体的悬浮特性^[12-13]。基于这些特性,磁流体具有极广的应用范围,涉及航空电子、转轴密封、阻尼系统、润滑和扬声器等领域^[16-17]。

本文设计的传感器结构如图1所示。传感器为二阶弹簧振动阻尼系统,惯性质量为两块相同的圆

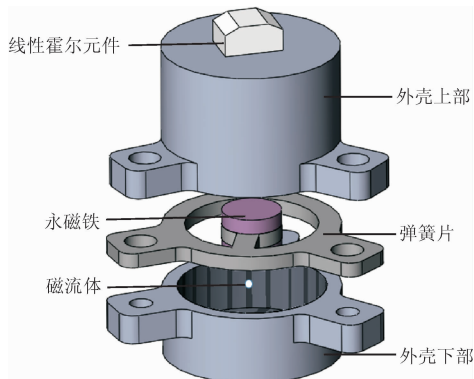


图1 传感器结构示意图

柱形永磁铁,弹簧为单悬臂型弹簧片,永磁铁上下对称安装于悬臂的末端中心;外壳上部和外壳下部通过螺钉与弹簧片连接并固定,内部空腔充满磁流体;高灵敏度线性霍尔元件安装于外壳上部的中心位置。传感器零件材料及型号如表 1 所示。

表 1 传感器零件材料及型号

名称	材料或型号
外壳	光敏树脂
永磁铁	钕铁硼 N35
弹簧	65Mn 钢
线性霍尔元件	EQ-730L

本文设计的加速度传感器的检测原理为:①外界产生加速度激励;②永磁铁受惯性力作用发生位移;③霍尔元件处磁场强度发生变化;④线性霍尔元件将磁场转化为电信号输出。综上,可实现加速度到电信号的转变,从而实现加速度的测量。

1.2 传感器振动系统

本文设计的传感器动力学模型为二阶弹簧阻尼振动系统,如图 2 所示。在无磁流体时,传感器系统的弹簧刚度为弹簧片刚度 k_0 ,阻尼为空气阻尼 c_0 。在传感器外壳内充入磁流体,磁流体在永磁铁形成的梯度磁场作用下完全磁化。由于悬浮效应和黏度效应的作用,系统刚度 k_f 、阻尼 c_f 提高,由于磁力作用,磁铁表面被强烈吸引的磁流体视为增加的惯性质量 m_f 。

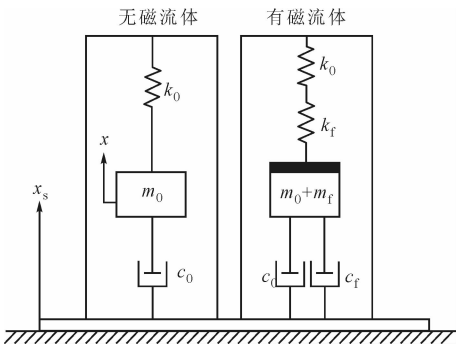


图 2 传感器振动系统示意图

无磁流体情况下,根据达朗伯定理,得到的系统在垂直方向的运动微分方程为

$$m_0 \ddot{x} + c_0 (\dot{x} - \dot{x}_s) + k_0 (x - x_s) = 0 \tag{1}$$

式中: x 为质量块位移; x_s 为振动台位移; m_0 为初始惯性质量; k_0 为弹簧刚度; c_0 为初始阻尼。取 $y = x - x_s$, 并取 $x_s = a \sin \omega t$, 可得

$$m_0 \ddot{y} + c_0 \dot{y} + k_0 y = -m_0 \ddot{x}_s = m_0 \omega^2 a \sin \omega t \tag{2}$$

稳态振动解的形式 $y = Y \sin(\omega t - \phi)$, 并设 $\omega_n =$

$\sqrt{k_0/m_0}$, $\zeta = c/2\omega_n m_0$, $\lambda = \omega/\omega_n$, 可得幅频响应和相频响应如下

$$Y = \frac{a\omega^2}{\omega_n^2((1-\lambda^2)^2 + (2\zeta\lambda)^2)^{1/2}} \tag{3}$$

$$\phi = \arctan \frac{2\zeta\lambda}{1-\lambda^2} \tag{4}$$

根据式(3)可得不同阻尼比下系统幅频响应曲线,如图 3 所示。假设系统无阻尼固有频率为 2 000 rad/s,以幅值响应误差为 10% 进行分析,点 A、B、C 为最大可用频率示意点。当阻尼比为 0.59 时,系统最大可用频率为 1 740 rad/s;阻尼比为 0.01 时,系统最大可用频率为 432 rad/s,同等条件下可用频率扩大 303%。由此可见,在其他条件不变的情况下,选择合适的阻尼比对拓宽传感器可用频率范围具有重要意义。

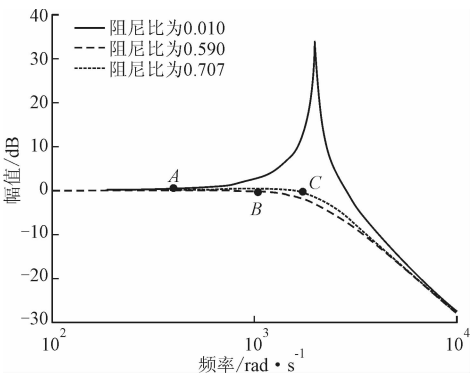


图 3 不同阻尼比下传感器幅频响应曲线

本文采用磁流体作为阻尼材料,将研究磁流体的阻尼效应及其对扩展使用频率的作用。

2 阻尼力和悬浮力

2.1 理论基础

本文设计的传感器中惯性质量永磁铁自身能够产生梯度磁场,所以在腔体内会受到二阶悬浮力的作用。在磁场作用下,磁性纳米颗粒在磁场方向形成链式结构,惯性质量运动过程时基液沿着链条周边流动,且磁流体在磁铁和壳体之间的空隙内形成剪切流动,惯性质量会受到挤压阻尼力^[18]和剪切阻尼力^[14]的共同作用,受力如图 4 所示。

根据本文传感器模型的特点,可得永磁铁所受到的剪切阻尼力和挤压阻尼力如下

$$F_{\text{shear}} = \eta_m \pi L \frac{24R_1^4 + 36R_1^3 R + 24R_1^2 R^2 + 3R_1 R^3}{R^3 (2R_1 + R)} v = c_1 v \tag{5}$$

$$F_{\text{extru}} = \frac{3\eta_m \pi R_1^4}{2h^3} v = c_2 v \quad (6)$$

式中: F_{shear} 为剪切阻尼力; F_{extru} 为挤压阻尼力; R_1 为永磁铁底面半径; R_2 为传感器外壳底面半径; R 为外壳底面半径和永磁铁半径之差; η_m 为添加磁场后的磁流体黏度; h 为永磁铁壳体与地面距离。

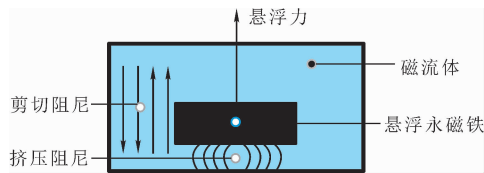


图4 振动过程永磁铁受力分析示意图

磁流体的黏度随磁场变化关系式为

$$\xi = \mu H / kT \quad (7)$$

$$\eta_m = \eta_0 + \frac{3}{20} \eta_0 \frac{\xi - th\xi}{\xi + th\xi} \quad (8)$$

式中: μ 为粒子磁矩; H 为磁场强度; k 为玻尔兹曼常数; T 为热力学温度; η_0 为磁流体初始黏度。

本文所设计的传感器中,磁流体的初始黏度为 $1 \text{ Pa} \cdot \text{s}$,饱和磁化强度为 31.8 kA/m ,磁铁表面的磁场强度为 104.94 kA/m ,在磁场作用下,磁流体黏度达到 $1.149 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 。将上述参数代入式(7)(8),计算出磁流体黏度,再将黏度值及本文传感器结构参数代入式(5)(6),可得剪切阻尼系数为 $1.957 \text{ N} \cdot \text{s/m}$,挤压阻尼系数为 $24.941 \text{ N} \cdot \text{s/m}$ 。

由式(5)(6)可知,挤压高度越小、壳体与永磁铁之间的间隙越小,永磁铁所受到的阻尼力越大。由式(7)(8)可知,随着磁场增大,磁流体黏度增加,阻尼力增大。上述结论指导着传感器结构参数的设计以及传感器零件材料的选取。

以磁流体微元为研究对象,计算在磁流体中的磁铁悬浮力,彻体力和表面力达到力平衡为

$$\iint_S T'_m dS = \iiint_V f'_m dV \quad (9)$$

式中: dV 为磁流体微元的体积; dS 为表面积; f'_m 为单位体积的彻体力。

根据散度定理,可得

$$f'_m = \nabla \cdot T'_m \quad (10)$$

假定磁场强度 H 与磁感应强度 B 平行,磁流体的表面应力为

$$T'_m = -(p + Q_M + L_M)I + BH \quad (11)$$

式中:液体静压 $p = p(\rho_f, T)$, T 为温度, ρ_f 为磁流体密度; $Q_M = \int_0^H \mu_0 \left[\frac{\partial(\nu M)}{\partial \nu} \right]_{H,T} dH$, μ_0 为真空磁导

率, M 为磁化强度, ν 为磁流体比容; $L_M = \frac{1}{2} \mu_0 H^2$ 。

将式(11)代入式(10),并积分得到彻体力,将彻体力减去阿基米德浮力,得到二阶悬浮力

$$F'_m = \oint_S [-(T_M + L_M + H_n B_n) \mathbf{n} + H_t B_t \mathbf{t}] dS \quad (12)$$

式中: $T_M = \mu_0 \int_0^H M dH$; 下标 n 和 t 分别表示法向和切向分量。

磁流体与永磁铁分界面的磁场边界条件如下

$$B_n^+ - B_n^- = 0 \quad (13)$$

$$H_t^+ - B_t^- = 0 \quad (14)$$

式中:上标+和-分别表示分界面的外表面和内表面。

忽略磁性液体内部的磁化强度,并假设磁流体在传感器中做不可压缩定常流动,简化得到

$$F'_m = \oint_S \left[- \left(T_M + \frac{1}{2} \mu_0 M_n^2 \right) \right] n dS \quad (15)$$

由于磁流体内部的磁化强度远远小于外磁场强度,所以由式(15)可知,永磁铁所受到的二阶悬浮力和同形状、同体积、同位置的磁流体在相同磁场条件下所受到的磁彻体力大小相同。由于直接利用公式求解相对困难,利用上述结论,简化仿真模型,利用镜像法^[19]计算二阶悬浮力。将永磁铁产生的磁场等效为镜像磁铁所产生的磁场,永磁铁所受到的二阶悬浮力即为和其镜像磁铁之间的相互作用力。镜像永磁铁的剩磁矢量和原永磁铁的剩磁矢量方向相反,计算式为

$$J_{\text{img}} = \frac{\mu_r - \mu_r'}{\mu_r + \mu_r'} J_0 \quad (16)$$

式中: μ_r' 为镜像区域相对磁导率,取1; μ_r 为磁流体相对磁导率,取1.15。永磁铁采用牌号为N35的钕铁硼磁铁,相对磁导率取1.064,此时其矫顽力为 890 kA/m ,由式(16)可得镜像磁铁的矫顽力为 42.831 kA/m ,该值将作为仿真参数代入仿真模型。

2.2 阻尼与悬浮力仿真与实验

如图5a所示,当容器封闭时,将二阶悬浮力转化为永磁铁与两个镜像磁铁作用力之和。当容器开口开放,由于一端为自由面,此时悬浮力为悬浮永磁铁和其中一个镜像磁铁之间的作用力,如图5b所示。为减少计算量,仿真研究永磁铁和其中一个镜像的作用力关系,进一步利用该关系进行叠加,得到永磁铁在密闭容器内受到的悬浮力。

利用 Comsol Multiphysics 多物理场仿真软件,

仿真永磁铁所受到的悬浮力。图 6 为自由剖分四面体网格划分图。永磁铁剩磁、磁流体相对磁导率与 2.1 小节相同。由于容器左右对称, x 和 y 方向的力相互平衡, 只需计算 z 方向的作用力。设置两个永磁铁之间的距离为 $0 \sim 5 \text{ mm}$, 以 0.1 mm 为间隔。

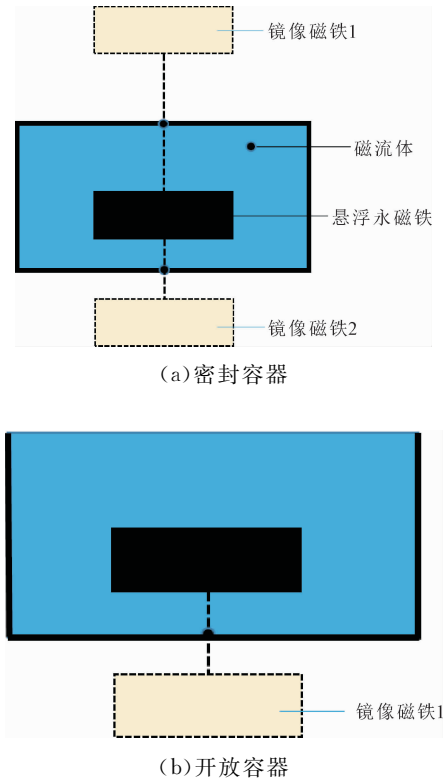


图 5 镜像法计算悬浮力示意图

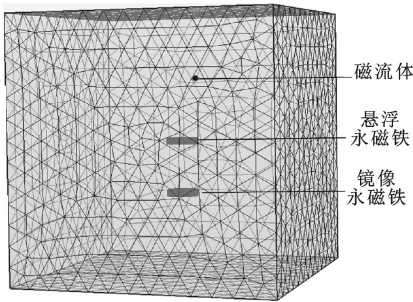


图 6 自由剖分四面体网格划分图

仿真结束后, 通过实验对实际模型下的悬浮力进行研究。如图 7 所示, 将磁铁粘贴于连接杆的末端, 连接杆与推拉力计相连, 推拉力计固定于螺旋位移台上, 位移通过百分表进行测量。在实验过程中, 首先向下调节位移台至磁铁完全浸没于磁流体中, 将推拉力计置零, 从而去除磁铁在液体中受到的阿基米德浮力的影响。调节位移台高度, 并通过百分表读取位移值, 记录推拉力计的读数, 得到不同浸没高度下的悬浮力。

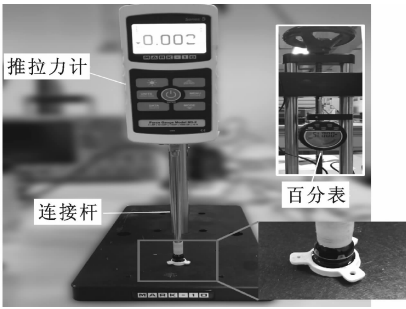


图 7 悬浮力实验示意图

由于悬浮力和悬浮距离之间无解析关系式, 所以将仿真数据和实验数据进行多项式拟合, 得到变化曲线如图 8 所示。从图中可以看出, 实验数据和仿真数据在一个数量级且在趋势上基本符合, 随着悬浮距离的增加, 悬浮力逐渐减小, 且变化速率逐渐降低。由于悬浮力受包括磁场在内的多复杂因素影响, 且磁铁实际参数与理论参数很难达到一致, 仿真中很多影响因素无法全面考虑, 导致仿真和实验结果存在一定误差。但是, 在悬浮力研究上, 本文主要关注仿真与实验结果的数量级, 以判断其给传感器使用频率拓展带来的增益程度, 在此方面, 实验和仿真结果吻合, 结果可以用来研究磁流体悬浮力对于本文所设计加速度传感器的影响。

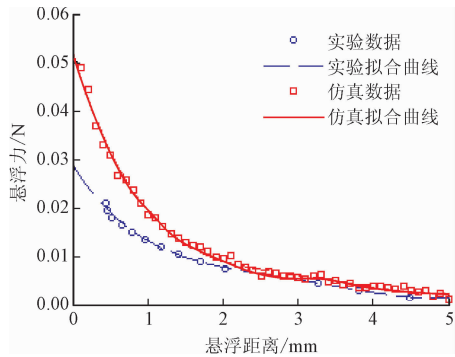


图 8 悬浮力仿真与实验结果的比对

本文设计的传感器磁铁的初始安装位置距离上下壳体底面相同, 为 2.6 mm , 忽略磁铁重力作用, 且永磁铁的惯性位移区间小于 0.5 mm , 故可视悬浮力随悬浮距离是线性变化的, 将悬浮距离为 2.6 mm 处的悬浮力梯度视为线性变化速率值。根据实验结果, 悬浮力和悬浮距离的关系如下

$$F = (0.179d^4 - 2.243d^3 + 10.401d^2 - 23.615d + 28.413)/1\,000 \quad (17)$$

在 2.6 mm 处的梯度为 2.43 N/m , 由于传感器上下对称, 所以实际梯度为 4.86 N/m 。该值即为添加磁流体增加的弹簧刚度值, 即图 2 中的 k_f 。

由 2.1 小节可知, 磁流体的阻尼与传感器结构

密切相关,阻尼的测量对于传感器结构参数的设计具有重要意义。由于阻尼为动态参数,且磁流体和惯性质量永磁铁密封于传感器内部,阻尼参数很难通过直接测量测得,所以本文阻尼力按照敲击法^[20]进行测量。对传感器进行敲击,测得其振动衰减曲线,根据曲线计算弹簧刚度和系统阻尼比。在传感器分辨率范围之内,当阻尼比大于 0.4 时,衰减曲线在一个周期内即衰减完成。所以,本文在其他结构不变的情况下,采用高刚度弹簧来降低阻尼比,通过衰减曲线标定传感结构的阻尼系数,从而验证磁流体的阻尼效应,并据此确定传感器的各个结构参数。

图 9 所示为低刚度弹簧在未添加磁流体时的一次敲击实验结果。 E 、 F 为振荡曲线中两个峰值点,根据衰减振动幅值计算阻尼比和振动频率的公式为

$$\frac{1}{j} \ln \frac{A_i}{A_{i+j}} = \frac{2\pi\xi}{\sqrt{1-\xi^2}} \tag{18}$$

$$f = \frac{j}{T_{i+j} - T_i} \tag{19}$$

式中: A_i 和 A_{i+j} 为相邻 j 次衰减曲线峰值的幅值; ξ 为阻尼比; T_i 和 T_{i+j} 为相邻 j 次衰减曲线峰值所对应的时间点。

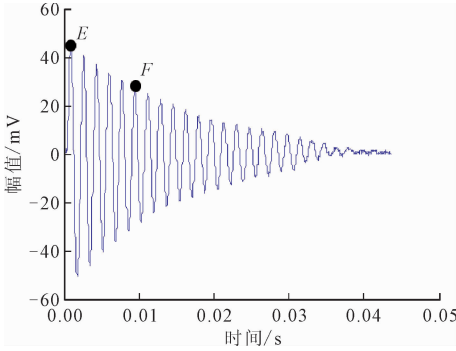


图 9 低刚度弹簧在未添加磁流体时的敲击实验结果

二阶系统中,利用阻尼比、固有频率和惯性物体质量计算弹簧刚度,公式如下

$$\omega_n = \sqrt{(1-\xi^2)} \sqrt{k/m} \tag{20}$$

根据式(18)(19),可求得阻尼比为 0.017 5,固有频率为 580 Hz,又有惯性质量为 0.6 g,将上述结果代入式(20),求得弹簧刚度为 202 N/m。此时,由 2.2 小节得到的磁流体悬浮力带来的刚度上的增加可忽略不计。

在高刚度弹簧下,重复上述实验,分别测量未添加磁流体、添加磁流体情况下的传感器固有频率和阻尼比,测量结果如表 2 所示。

将表 2 中未添加磁流体状态下的计算结果代入式(20),求得高刚度弹簧的刚度 $k=2.121$ kN/m。

表 2 敲击法测量传感器固有频率和阻尼比的结果

条件	固有频率/Hz	阻尼比
未添加磁流体	2 029	0.073 5
添加磁流体	1 852	0.172 9

利用阻尼比、惯性物体质量和弹簧刚度,计算系统阻尼系数的公式如下

$$c = 2\xi \sqrt{mk} \tag{21}$$

将计算得到的高刚度弹簧刚度及表 2 中添加磁流体状态下的系统阻尼比代入式(21),得到阻尼系数 $c=0.39$ 。将求出的阻尼系数和已经求出的低刚度弹簧的刚度代入式(21),计算得到低刚度条件下系统阻尼比为 0.56,基本满足设计要求。

3 磁场分布

利用电磁仿真软件 ANSYS Maxwell 进行仿真实验,按照本文设计的传感器结构对仿真模型进行建模,如图 10 所示。由于磁流体具有特殊的磁化性能,需要手动录入磁流体磁化曲线。设置仿真参数并进行仿真,仿真结果如图 11 所示,磁铁表面磁场强度达到 650 kA/m。由于线性霍尔元件测量范围有限,又因为永磁铁磁场强度大,所以只需分析距离永磁铁上表面中心 6~20 mm 范围内的磁场情况。

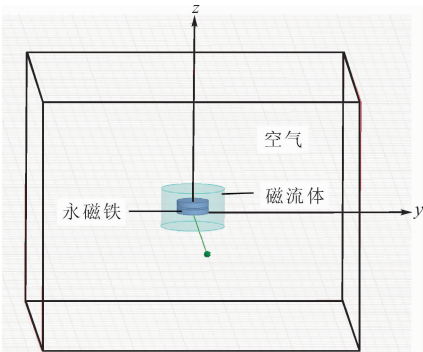


图 10 磁场仿真模型

实验采用和图 7 实验装置类似的方案,将霍尔元件和连接杆连接,传感器置于霍尔元件正下方,通过调节螺旋位移台,调整霍尔元件与传感器之间的相对位置,记录位移台位置,读取霍尔元件的输出电压,从而能够得到距离磁铁不同位置的磁场强度。

为验证仿真结果的有效性,将仿真和实验的数据进行拟合,得到如图 12 所示的结果。从图中可以看出,实验和仿真结果基本吻合,尤其是本文关注的梯度变化趋势上,二者基本相同。经过计算,针对本传感器模型,在保证测量范围的情况下,距离磁铁 7

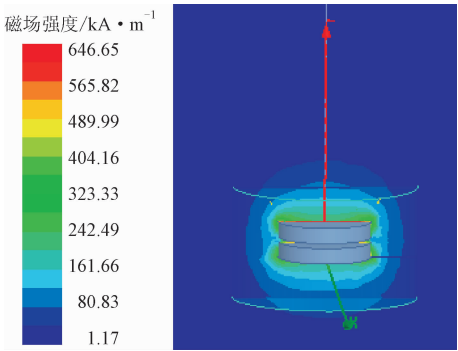


图 11 磁场仿真结果

mm 处,磁场变化梯度最大,即磁场的分辨率最高,达到 800 V/m。据此,本文设计的传感器中,霍尔元件安装于距离磁铁 7 mm 的外壳表面。

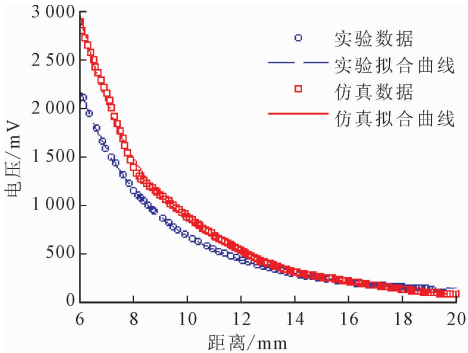


图 12 磁场仿真与实验结果

4 验证实验

传感器实物如图 13 所示。外壳采用 3D 打印加工,为保证外壳不影响磁铁的位置,材料选用低黏度光敏树脂材料,光滑度高,强度大,性能稳定。弹簧片为 65Mn 钢材料,采用激光切割加工。霍尔元件在图中未标出。

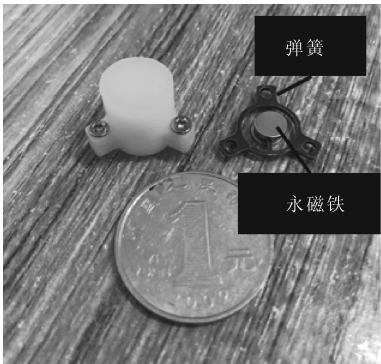


图 13 传感器实物示意图

如图 14 所示,将标准加速度传感器和本文设计的传感器安装于同一激振台振动头上,使振动台在不同加速度、不同频率下进行振动,标准加速度传感

器信号作为激振台控制器的负反馈保证加速度达到控制值。在 100 Hz 的频率下,控制加速度的上升区间为 20~60 m/s²,间隔为 5 m/s²,测量磁流体传感器的响应。图 15 为传感器输出的响应关系,可见传感器输入输出基本呈线性变化,表明本文设计的传感器对加速度的响应具有很好的线性度。

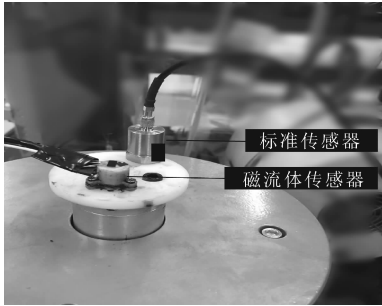


图 14 实验装置示意图

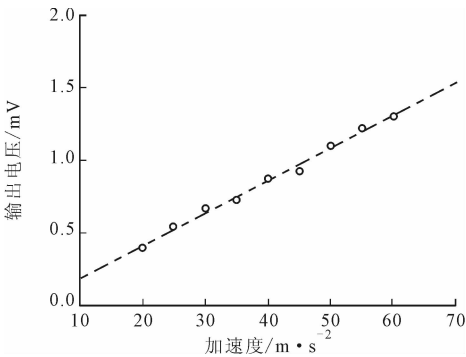


图 15 传感器线性度测量结果

为验证磁流体对于加速度传感器的作用,在其他条件不变的情况下,对有无磁流体的传感器频率响应进行实验。激励加速度为 35 m/s²,在 160~750 Hz 内每间隔 12.5 Hz,测量一个频率的响应幅值。对得到的实验值按照频响函数曲线进行拟合,并将初始值按比例归于一体,拟合结果如图 16 所示。在响应允许误差为 10%且未加磁流体时,传感器的可用频率为 0~161.6 Hz;在添加磁流体的情况下,传感器的可用频率为 0~575.5 Hz,较未添加

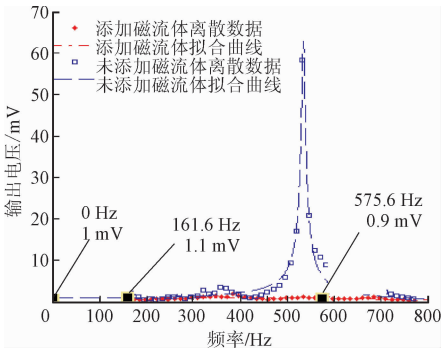


图 16 传感器有无磁流体的频率响应对比

磁流体而言,可用频率范围拓宽 256%,可见磁流体对于传感器频率拓宽的效果非常显著。

综上,在一定范围内,本文设计的传感器具有较好的线性度,并且加入磁流体拓宽了整个加速度传感器的使用频率范围,具有较好的实用价值。

5 结 论

本文设计了一种新型加速度传感器,将加速度信号转化为磁场的变化,利用线性霍尔元件进行检测,实现加速度到电信号的转换。加入磁流体作为阻尼材料,通过仿真和实验研究了磁流体阻尼和悬浮力性能,研究了圆柱形永磁铁的磁场分布规律。通过实验验证了加入磁流体且在无机械磨损的同时,可拓宽加速度传感器的使用频率,传感器具有较大的使用价值。

(1)本文设计的传感器采用永磁铁作为惯性质量,利用线性霍尔元件进行检测,简化了加速度传感器结构。在同等使用频率、精度要求范围内,与传统磁流体加速度传感器相比,具有体积小、制作简单、成本低等优势。

(2)利用仿真和实验研究了磁流体的悬浮性能和阻尼性能,结果表明,在磁铁体积较小的情况下,磁流体所带来的悬浮力在本传感器模型中可忽略不计。基于本文所设计的传感器结构,实验验证了磁流体在磁场作用下具有非常优越的阻尼性能。

(3)通过仿真和实验研究了圆柱形永磁铁的磁场分布规律,发现磁场变化梯度随检测点与磁铁距离而变,并且距离越大磁场梯度越小。本文提供了一种新型的永磁铁磁场研究解决方案。

(4)实验验证了本文设计的传感器具有较好的线性度,且验证了磁流体的加入使得可用频率拓宽了 256%,说明磁流体对于拓宽加速度传感器的可用频率范围具有重要意义。

参考文献:

- [1] AKYILDIZ I F, SU W, SANKARASUBRAMANIAM Y, et al. A survey on sensor networks [J]. IEEE Communications Magazine, 2002, 40(8): 102-114.
- [2] BARSHAN B, DURRANTWHYTE H F. Inertial navigation systems for mobile robots [J]. IEEE Trans on Robotics and Automation, 1995, 11(3): 328-342.
- [3] BARBOUR N, SCHMIDT G. Inertial sensor technology trends [J]. IEEE Sensors Journal, 2001, 1(4): 332-339.
- [4] ZAHN M. Magnetic fluid and nanoparticle applica-

tions to nanotechnology [J]. Journal of Nanoparticle Research, 2001, 3(1): 73-78.

- [5] 张西宁, 尤亚男, 王奔. 一种利用磁流体液流变效应的在线动平衡方法 [J]. 西安交通大学学报, 2016, 50(12): 6-11.
ZHANG Xining, YOU Yanan, WANG Ben. An on-line dynamic balancing method with magnetic fluid magneto-rheological effect [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2016, 50(12): 6-11.
- [6] 张西宁, 张海星, 吴婷婷. 一种转动容器中磁流体液表面形貌测量方法 [J]. 西安交通大学学报, 2017, 51(1): 103-108.
ZHANG Xining, ZHANG Haixin, WU Tingting. Surface topography measurement of magnetic fluid in revolving containers [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2017, 51(1): 103-108.
- [7] BAGLIO S, BARRERA P, SAVALLI N. Novel ferrofluidic inertial sensors [C] // Instrumentation and Measurement Technology Conference. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2007: 2368-2372.
- [8] PISO M I. Applications of magnetic fluids for inertial sensors [J]. Journal of Magnetism & Magnetic Materials, 1999, 201(1/2/3): 380-384.
- [9] 杨文荣, 杨庆新, 孙景峰, 等. 磁流体加速度传感器的研究与设计 [J]. 仪表技术与传感器, 2006, 42(8): 3-4.
YANG Wenrong, YANG Qingxin, SUN Jingfeng, et al. Study and design on acceleration sensor with magnetic fluid [J]. Instrument Technique and Sensor, 2006, 42(8): 3-4.
- [10] QIAN L, LI D, ZHU T. Use of magnetic fluid in accelerometers [J]. Journal of Sensors, 2014, 2014(3): 112-120.
- [11] QIAN L, LI D, YU J. The theoretical and experimental study of a novel two-dimensional magnetic fluid accelerometer [J]. IEEE Sensors Journal, 2016, 16(23): 8412-8419.
- [12] ROSENSWEIG R E. Buoyancy and stable levitation of a magnetic body immersed in a magnetizable fluid [J]. Nature, 1966, 210(5036): 613-614.
- [13] ROSENSWEIG R E. Fluidmagnetic buoyancy [J]. AIAA Journal, 1966, 4(10): 1751-1758.
- [14] PETRESCU C, OLARU R. Performance analysis of ferrofluid actuators with permanent magnets of variable magnetization pattern [C] // International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2015: 374-379.

(下转第 79 页)