

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2311377

磁流变液响应时间检测方法及装置研究^{*}

李 佩¹, 卢 川², 尹剑飞³, 周 威¹, 谢 磊¹

(1. 重庆大学光电技术及系统教育部重点实验室 重庆 400044; 2. 中国核动力研究设计院核反应堆系统设计技术
国家重点实验室 成都 610213; 3. 国防科技大学装备综合保障技术国家重点实验室 长沙 410073)

摘 要:磁流变液的响应时间是一个关键指标,关系到磁流变智能执行器的实时可控性能。然而,MRF 的动态响应面临从电流、磁场强度及剪切应力等多参数耦合中解耦的难题。本文提出基于偏置正弦激励电流的相位检测法,通过施加偏置正弦电流激励正弦磁通密度,由扭矩与磁场相位差获得 MRF 响应时间,无需面临阶跃响应中的复杂解耦问题。此外,本文通过关键机械参数设计,突破商用流变仪的剪切率限制,实现了最高 $3\,000\text{ s}^{-1}$ 下的响应时间测量。基于此,本文设计和制作了一套 MRF 响应时间检测装置,分析了装配偏心和磁场探针位置引起的误差;测得多种样品在 $1\sim 3\text{ A}$ 振幅电流下的响应时间为 $23\sim 140\text{ ms}$,并发现响应时间随 MRF 浓度增大而先减小再延长,且与外部磁场强度呈负相关。

关键词: 磁流变液; 响应时间; 检测方法; 正弦电流; 相位差

中图分类号: TH89 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 460.4099

Study on methodology and instrumentation of measurement of response time of magnetorheological fluids

Li Pei¹, Lu Chuan², Yin Jianfei³, Zhou Wei¹, Xie Lei¹

(1. Key Laboratory of Optoelectronic Technology and Systems (Ministry of Education of China), Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. Key Laboratory of Nuclear Reactor System Design Technology, Nuclear Power Institute of China, Chengdu 610213, China; 3. Laboratory of Science and Technology on Integrated Logistics Support, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: The response time of magnetorheological fluid (MRF) is a critical parameter that relates to the real-time controllability of magnetorheological smart actuators. However, the dynamic response of MRF involves a complex coupling from the circuit to the mechanical system, which requires addressing the challenge of decoupling from multiple parameters such as current, magnetic field strength, and shear stress. This article proposes a phase difference method based on the biased sine excitation current. By applying the biased sine current to excite sinusoidal magnetic flux density, the response time of MRF is obtained from the phase difference between the torque and the magnetic field, without facing the complex decoupling encountered in step response. In addition, this article breaks through the shear rate limitation of the general commercial rheometers through the design of the key mechanical parameters. It achieves MRF response time measurements at shear rates up to $3\,000\text{ s}^{-1}$. Based on this, this article designs and fabricates an MRF response time measurement device, and analyzes errors caused by eccentric assembly and magnetic field probe positioning. It is found that the response time of various samples is $23\sim 140\text{ ms}$ under $1\sim 3\text{ A}$ amplitude currents. In addition, the response time is first accelerated and then prolonged with the increase of sample concentration, which is negatively correlated with the external magnetic field strength.

Keywords: magnetorheological fluid; response time; detection method; sinusoidal current; phase difference

收稿日期: 2023-05-03 Received Date: 2023-05-03

^{*} 基金项目: 重庆市自然科学基金 (CSTB2023NSCQ-MSX0459)、国家重点实验室基金 (KFKT-05-FW-HT-20220008)、国家自然科学基金 (11991032&11702040)项目资助

0 引 言

磁流变液(magnetorheological fluid, MRF)是一种由微米级的软磁性颗粒作为分散相分散于基载液中形成的悬浮液^[1]。MRF 具有独特的磁流变效应,即其软磁性颗粒在磁场激励中发生异常灵敏的链/簇化可逆响应,并伴随着流变特性的连续、可逆、迅速的变化^[2]。利用 MRF 的可控流变特性开发的智能执行器件已经在智能减振^[3]、缓冲^[4-5]以及抛光^[6-7]等应用领域获得广泛关注。作为半主动执行器件,磁流变系统的响应时间是一个极其关键的指标,缘于它决定了实时可控性——对环境瞬变激励的即时自适应控制性能。它通常包含了 MRF 材料自身的响应时间和电磁控制系统的响应时间(含电流源、励磁线圈、信号感知与处理时间等)。因此,实现对相关响应时间的检测是至关重要的,它们为预测控制或滞后补偿策略提供先决条件。现有的少量研究常关注于如何测得磁流变系统的整体响应时间,却忽略了对 MRF 材料响应时间的检测^[8-11]。例如,中国矿业大学的田祖织等^[12]研究了不同串并联励磁线圈下 MRF 对电流的响应,发现串联线圈磁流变器件的响应时间小于并联响应时间。殊不知,MRF 对磁场的响应是其材料特性的反映,研究之不仅有利于提升磁流变器件的响应速度,更有助于深入理解磁流变效应的内在机理,从而为研制更优异的 MRF 材料提供指导。

针对 MRF 响应时间,人们时常引述美国 Load 公司所宣称的“1 ms”,却不能将此数值随意套用在各机构自行开发的材料上。显然,对磁流变系统响应时间的检测易于对 MRF 响应时间的检测,原因是后者难以从磁流变系统的力-电-磁-机械系统的复杂耦合响应中解耦。因此,对于如何将 MRF 响应时间从系统响应时间中解耦分离并如何定义 MRF 响应时间,仍未有定论。

针对 MRF 的响应时间测量,国内外学者用不同试验方法进行了研究^[13-19]。内华达大学的 Sahin 等^[20]设计了两种磁流变阀门,用传感器采集在不同磁场下阀门的压力变化,然后从压降函数中提取样品的响应时间,发现在环形流道和径向流道中,电压上升阶段和下降阶段的 MRF 响应时间都不同,分布在 1.4~22 ms 之间。韩国纽约州立大学的 Widodo 等^[21]设计了一种利用磁流变效应引起液面波动造成的压力变化,在 U 型管中测量不同激励频率下 MRF 的动态响应。然而,此装置不能测量 MRF 剪切作用下的动态响应,难以直接应用于阻尼器等应用场景。

常用的 MRF 响应时间测量方法是阶跃测试法,即测量阶跃激励的作用下 MRF 剪切应力的改变与施加电流或磁场的时间差。Gabriel 等^[22]学者基于商用流变仪

Anton Paar MRD180 进行 MRF 响应时间测量。其在流变仪载液盘底部开槽,置入霍尔探针,通过阶跃电流测量了某商用 MRF 的响应时间约为 13 ms(最高至 1 000 s⁻¹ 剪切率条件)。他们以扭矩达到稳定状态的 63.2% 定义响应时间(即视之为为一阶系统)。改装现有仪器的方法虽较为简便,但其测量剪切率的范围以及采集扭矩信号的频率都受制于原流变仪产品。同样地,基于圆盘剪切的原理,Maas 等^[23]设计了平行圆盘测量仪器,采用阶跃电流激励,视为一阶系统测得 MRF 响应时间在 0.76~14 ms。Kubik 等^[24]也利用圆盘剪切结构,在阶跃激励下测量 11~218 s⁻¹ 不同剪切率下 MRF 的响应时间,其响应时间在 5.0~1.9 ms 之间。可以看出,平行圆盘剪切结构的应用广泛^[25-29],然而,受离心力影响,样品易于从平行圆盘间泄露,故此方法测得的剪切率一般在 1 000 s⁻¹ 以下,不足以反映 MRF 的实际工况,亦未对 MRF 的响应时间做出更全面的研究。因此,亟需发展一种能测量高剪切率下 MRF 响应时间的装置。Load 公司^[30]设计了一种狭缝装置,模仿 MRF 在磁流变阻尼器中的实际工况,用活塞挤压 MRF 通过狭缝,同时对狭缝施加磁场,用以测量高剪切速率(至 25 000 s⁻¹)下的响应时间。在 0~200 kA/m 的磁场激励下,测得某 Load MRF 响应时间小于 14 ms。这种测量方法达到了高剪切率,具有重要参考价值。但是,MRF 在快速通过狭缝时有可能尚未达到饱和屈服状态即已被排出,测得的响应时间可能小于真实值。

上文简述了几种典型的测量方法,亦有学者通过理论模型研究了 MRF 的响应时间^[31]。Fu 等^[32]用格子玻尔兹曼方法,为 MRF 建立了两相模型,仿真 MRF 中的磁性颗粒在磁场下的动态过程,发现 MRF 形成稳定簇状物的时间与其体积分数息息相关,且推算其响应时间为 26~42 ms。可知该结果与前述实验测量法的差异较大。

综上所述,MRF 响应时间的测量仍未受到广泛关注,多采用传统的阶跃信号测量,但 MRF 响应时间测量装置结构复杂,难以将 MRF 对磁场的响应时间从复杂的力-电-磁-机械系统响应中解耦。同时,圆盘剪切是一种广受认可的测量 MRF 性能的方法,但受制于离心力的影响,难以实现高剪切率下的测量。本文不同于传统阶跃响应测量法,提出基于偏置正弦激励电流的相位检测法,且突破一般商用流变仪的 1 000 s⁻¹ 剪切率限制,实现最高 3 000 s⁻¹ 条件下的响应时间测量。本研究通过多物理场仿真和磁路优化,设计和制作了一套 MRF 响应时间检测装置,对其装配偏心 and 磁场探针位置进行了误差分析。制备了多种体积分数浓度的 MRF 样品,测得其在不同幅值正弦电流下的响应时间,并进一步研究了样品浓度、磁场强度、剪切率与其响应时间的关系。

1 MRF 响应时间测量原理与装置设计

1.1 MRF 响应时间测量原理

MRF 对磁场的响应是指在磁场激励下从液态相变为类固态的过程,在流变学参数上体现为从牛顿流体转变为黏塑性流体时所伴随的屈服过程,故 MRF 响应时间可定义为此转变过程的时长。表 1 涵盖了国内外测量 MRF 响应时间的若干方法。要检测 MRF 响应时

间,首先依赖于励磁线圈产生的阶跃磁场,也即传统阶跃响应测量方法。但是,在电流→磁场→MRF 响应的因果系统中,受电流源本身因素以及励磁线圈的大感抗、涡流等影响,实际测量系统中的磁场形成时间已接近或超过 MRF 响应时间,也即所谓的阶跃磁场根本不存在。从而,磁场发生过程与 MRF 响应时间相耦合,难以从中分离出后者。鉴于此,本文采用正弦电流激励信号测量 MRF 响应时间,无需面临阶跃响应法中的复杂解耦问题。

表 1 MRF 材料响应时间测量的代表性研究
Table 1 Typical studies of MRF materials' response time

序号	文献	样品	测量条件	方法	结论	年份
1	威斯康辛大学 Ulicny 等 ^[26]	20, 30, 40 vol%, 粒径 8 μm	20~160 rpm, 0.1~4.0 A	圆盘剪切;利用阶跃电流测量扭矩和磁场的信号,63%	动态响应过程与颗粒体积分数和剪切率有关	2005
2	东威斯特法伦立珀大学 Maas 等 ^[23]	Basonetic 5030, Basonetic 4035	12 A, 15 A	圆盘剪切;利用阶跃电流测量扭矩和磁场的信号,63%	0.76~1.23 ms	2011
3	大阪大学 Kikuchi 等 ^[19]	20 vol%, 100 nm; 40 vol%, 1~10 μm	0~1 A, 3~30 rpm	圆盘环剪切;利用阶跃电流测量扭矩和磁场的信号,63%	Nano-MRF; 12 ms 140CG (LORD); 17 ms	2017
4	德国 BASF 公司 Gabriel 等 ^[22]	汽车 MR 阻尼器中的微米级 MRF	4.5 A, 1 A (0.5 Hz, 5 Hz), 1~1 000 s ⁻¹	商用流变仪 MRD180+霍尔传感器,正弦+阶跃激励	响应时间小于 13 ms	2009
5	美国 Load 公司 Koo 等 ^[30]	Load 某型号 MRF	0~200 kA/m 1~25 000 s ⁻¹	狭缝装置,测量在高剪切速率下 MRF 的响应时间,63%	响应时间小于 14 ms	2006
6	清华大学 Chen 等 ^[13]	磁性粉末混合物	5~40 mT, 38~387 s ⁻¹	旋转离合器中测量,阶跃电流, 63%	70~110 ms	2013
7	哈尔滨工程大学 Fu 等 ^[32]	粒径 20 nm, 质量分数 5, 10, 20 wt%	0.01~0.1 T	格子玻尔兹曼法仿真 MRF 在磁场下动态变化过程	对应不同质量分数,形成稳定的簇状物时间为 42, 26, 35 ms	2019
8	内华达大学 Sahin 等 ^[20]	粒径 5 um, 32 vol%	3 A, 0.246 L/s	不同流道磁流变阀的响应时间中提取 MRF 响应时间	环形流道 22~12.5 ms 径向流道 1.4~5.8 ms	2012
9	中国矿业大学田祖织等 ^[12]	-	1 A	不同串并联的励磁线圈下 MRF 对电流的响应时间	并联; 240 ms 串联; 160 ms	2022
10	韩国纽约州立大学 Bidodo 等 ^[21]	MRF 122EG	0.5~1.5 A	不同频率下 MRF 的压力响应	MRF 的响应时间受频率影响较大	2022
11	布尔诺理工大学 Kubik 等 ^[24]	MRF-132LD	2 A, 11~218 s ⁻¹	不同剪切率下 MRF 的响应时间	5.1~1.9 ms	2022

如图 1(a)所示,在电流→磁场→MRF 响应的因果系统中,正弦电流在励磁线圈中激发滞后的同频率磁场(磁感应强度),进而诱发滞后的 MRF 流变学响应(同频率剪切应力)。三者均将呈现正弦波形特征,则可通过相位差定义磁场与 MRF 的响应时间。如此,则避免了传统阶跃响应测量法中的解耦问题。注意,考虑到励磁线圈中感应电流本身与激励电流的相位差异

(延时),故本文中传感器直接获取感应电流。具体地,如图 1(a)所示,可由各正弦波形的峰点识别相位差,可知 τ_a 即为电磁系统的磁场响应时间, τ_b 为 MRF 响应时间。图 1(b)为测量系统组成原理图。通过双圆盘剪切结构驱动 MRF 的剪切,利用扭矩传感器测得扭矩,从而得知 MRF 剪切力响应。电流、磁感应强度亦由相应的传感器测得。

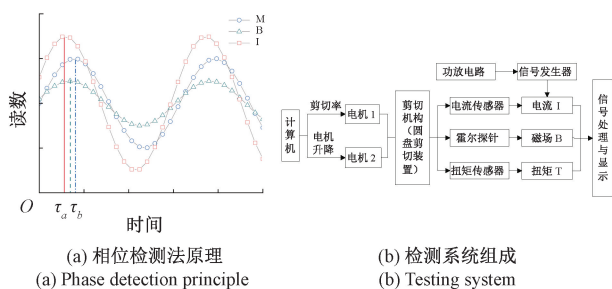


图 1 MRF 响应时间测量方法及系统原理图

Fig. 1 Schematic of MRF response time testing method and system

1.2 剪切应力与传递力矩的理论关系

图 2 为 MRF 响应时间测量装置结构原理及扭矩传递分析模型。图 2 所示的双圆盘密封结构, 避免了 MRF 在高速旋转剪切下的离心泄露, 从而实现了高剪切率检测条件。MRF 的剪切应力响应不能直接测得, 而是间接通过传递至双圆盘剪切结构的扭矩反推而得。所示双圆盘狭缝 MRF 剪切流的分析模型中, h 是缝隙高度, R_1 是剪切盘的内圆半径, R_2 是剪切盘的外圆半径。在此, 采用 Herschel-Bulkley 模型 (简称 H-B 模型) 表征 MRF 的本构模型^[1]。

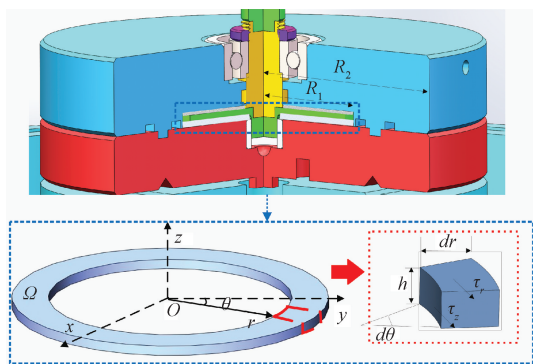


图 2 MRF 响应时间测量装置结构原理及扭矩传递分析模型

Fig. 2 Instrumentation structure for MRF's response time and its torque transfer mathematical analysis model

剪切盘上的扭矩来自平行于剪切盘表面的切向力 τ_z 提供的力矩和在圆周方向与剪切盘内壁摩擦力 τ_r 产生的力矩。取图 2 中剪切盘内的 MRF 微圆环作为分析对象, 其受力情况如下:

$$dT = 2\pi r^2 \tau_z dr + 2\pi r^2 \tau_r dz \quad (1)$$

那么, 剪切盘单面所传递的扭矩为:

$$T = 2\pi \int_{R_i}^{R_o} r^2 \tau_z dr + 2\pi \int_0^d r^2 \tau_r dz \quad (2)$$

对于本 MRF 响应时间测量装置来讲, 由于剪切盘的半径远大于两盘之间的缝隙 d , 故 τ_z 带来的力矩远大于

τ_r 产生的力矩, 因此可忽略 MRF 与内壁摩擦力 τ_r 带来的扭矩, 则剪切盘单面传递的扭矩为:

$$T = 2\pi \int_{R_i}^{R_o} r^2 \tau_z dr \quad (3)$$

为了合理简化 MRF 剪切盘的扭矩分析, 按照惯例假设^[24]: 1) MRF 为不可压缩流体, 且其在剪切盘中处于层流稳态; 2) 剪切运动时不存在径向和轴向流动; 3) 流体充满间隙, 与板面直接接触, 且不存在壁面滑移; 4) 缝隙中磁场均匀。

基于上述假设, 结合 H-B 模型, 将剪切盘扭矩改写:

$$T = 2\pi \int_{R_i}^{R_o} \tau_y r^2 dr + 2\pi \int_{R_i}^{R_o} r^2 K \left(\frac{r\Omega}{d} \right)^n dr \quad (4)$$

其中, Ω 为转子角速度, 由于间隙中磁场强度均匀, 式(4)可写为:

$$T = \frac{2\pi}{3} \tau_y (R_o^3 - R_i^3) + \frac{2\pi K R_o \Omega^4}{(n+3)d} \left[1 - \left(\frac{R_i}{R_o} \right)^{n+3} \right] \quad (5)$$

在此剪切测量装置中, 侧面的 MRF 与外筒之间亦有摩擦, 但由于磁场方向垂直于剪切盘、平行于圆筒圆柱面, 因此该区域磁场不起作用。与端面间隙中的 MRF 相似, 作用在圆盘外圆筒上的流体摩擦计算如下:

$$T_a = 2\pi R_o^2 b_d \tau_{R_o} = 2\pi R_o^2 b_d K_0 \left(\frac{\Omega R_o}{d_o} \right)^{n_0} \quad (6)$$

式中: b_d 是圆盘的厚度, d_o 是圆盘与外筒之间的间隙, K_0 与 n_0 是 MRF 在零场下的流变学参数。因此, 通过 MRF 传递的扭矩为:

$$T = \frac{4\pi \mu R_o^4}{(n+3)d} \left[1 - \left(\frac{R_i}{R_o} \right)^{n+3} \right] \Omega + \frac{4\pi \tau_y}{3} (R_o^3 - R_i^3) + 2\pi R_o b_d K_0 \left(\frac{\Omega R_o}{d_o} \right)^{n_0} \quad (7)$$

将输入电流信号代入最终可得:

$$T = \frac{4\pi \mu R_o^4}{(n+3)d} \left[1 - \left(\frac{R_i}{R_o} \right)^{n+3} \right] \Omega + 2\pi R_o b_d K_0 \left(\frac{\Omega R_o}{d_o} \right)^{n_0} + \frac{4\pi \alpha (\mu_0 \mu_F N a [\sin(bt) + c])^\beta}{3} \times (R_o^3 - R_i^3) \quad (8)$$

式中: a 为电流信号幅值, b 为信号频率, c 为偏置电流。其中 α, β 分别为体积分数和材料常数, 一般取后者为 $2.0^{[23]}$ 。 μ_0 是真空磁导率, μ_F 是铁芯的磁导率, N 是线圈匝数。由式(8)显然可知, 理论上正弦电流的变化引起扭矩的同频率正弦变化。因此, 实验所测得磁场峰值与扭矩峰值之间的时间差即为 MRF 响应时间, 电流峰值与扭矩峰值之间的延时即为 MRF 响应时间和磁场响应时间之和。

1.3 MRF 响应时间测量装置的机械与电磁设计

测量装置主要包括控制系统、信号采集系统和机械系统,其中机械系统的设计是装置的要点。装置机械系统的总体设计思路如图 3(a)所示。由磁流变效应的原理可知,要获得最大的磁控相变效应,施加在 MRF 上的磁场应垂直于液体的流动方向,且工作间隙内的磁感应强度应尽可能大。因此,MRF 响应时间测量装置的磁路设计非常重要,既要最大限度地提高工作间隙的磁感应强度,又要避免磁路中各部分出现饱和^[33-34]。

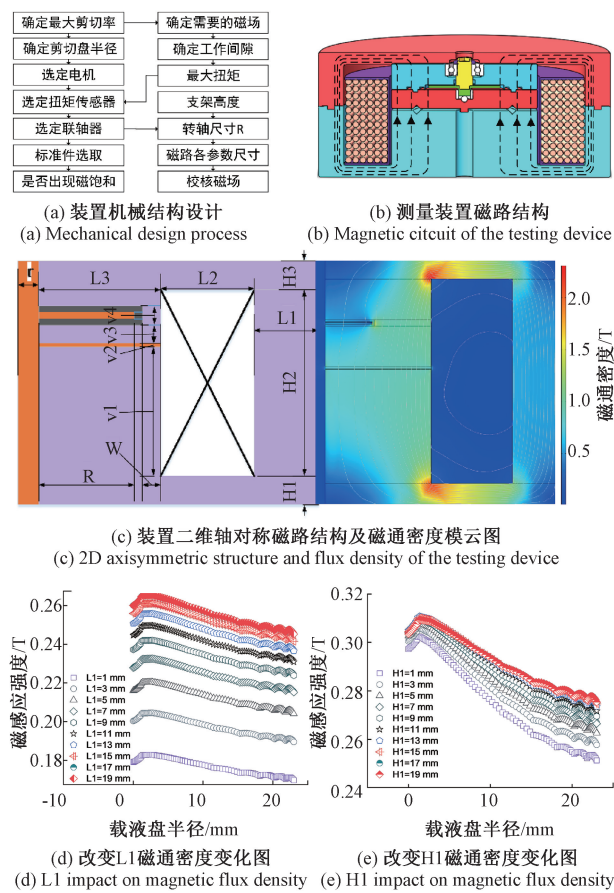


图3 MRF 响应时间测量装置的机械与电磁设计

Fig.3 Mechanical and electromagnetic design of MRF response time testing device

MRF 响应时间测量装置的磁路分布如图 3(b)所示。线圈绕制在下铁芯环形槽的工字型绕线架中,产生的磁场通过下铁芯、铁芯盖,传导至 MRF 工作间隙内,形成回路。为了使磁路中各部件迅速磁化和退磁,磁路中各导磁部件均需软磁材料制作,本研究采用电工纯铁。

采用有限元分析软件 COMSOL 分析装置的磁路。将此装置的结构简化为如图 3(c)所示的 1/2 对称模型,基于 COMSOL 对磁路进行优化设计。考虑到所采用正弦电流频率非常低,且直流磁路仿真已能够得出磁场均

匀性、磁场饱和位置等重要信息,故采用直流仿真简化了交流仿真。对磁路进行设计,给定初始机械尺寸值,得到在稳态电流下如图 3(c)所示的磁通密度模云图。可知,工作间隙磁场均匀,且方向垂直 MRF 剪切流方向,满足设计要求。

由图 3(c)可知,此装置率先达到磁饱和的位置为上下薄层和外缘。为了使其能在满足提供足够磁感应强度的条件下采用更小的尺寸,通过仿真,分别得到改变 H1 和 L1 尺寸时的工作间隙内磁通密度分布图,如图 3(d)、(e)所示。从图中可以看出,随着 H1 和 L1 尺寸的变大,工作间隙中的平均磁感应强度增强,且随着参数值的变大,增长变缓。考虑到装置的材料成本和尺寸限制,最终确定 H1 与 L1 值。随后,对转子及剪切盘进行设计,确定了 $R_1=30\text{ mm}$, $h=1\text{ mm}$ 的关键尺寸。通过转轴的轴承及转子底部的滑动轴承安装保证转子与剪切盘的同轴度,通过转子底部的球支撑减少转子与底部的摩擦,保证转子在高速下的同轴运转。以圆盘的 2/3 处半径作为圆盘剪切率平均值,仅需电机 150 rpm 转速即可实现 $3\,000\text{ s}^{-1}$ 的剪切率。最后,对装置整体的机械结构进行设计,三维模型见图 4(a)。所制作实物装置如图 4(b)所示。

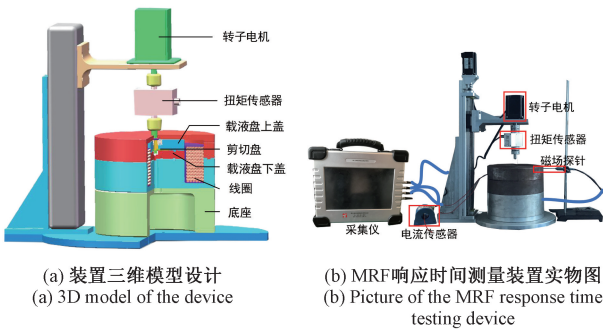


图4 MRF 响应时间测量装置三维模型和实物图

Fig.4 3D model and picture of MRF response time test device

根据式(8)预测扭矩传感器(南京冉控 RK-500)的测量范围。采用广州星辉科技的 LHB-Y2 型高精度电流传感器、北京翠海佳诚磁电科技的二维霍尔磁场传感器。3 个传感器的信号传输给四川拓普测控公司的 TPP 动态测量分析仪。利用功率放大器放大正弦激励电流;利用控制器和 Sigma Win+软件分别控制滑台升降电机和转子电机。

2 MRF 响应时间的测试结果及数据分析

2.1 数据处理

对所配置的 40 vol% MRF 样品进行测试,施加幅值为 3 A 的正弦电流,偏置电流为 6 A。平均剪切率为 100 s^{-1} 时,获得如图 5(a)所示的三路信号波形图。选用

数字低通 FIR 滤波器对原始信号进行预处理^[35],滤波后的信号波形如图 5(b)所示。

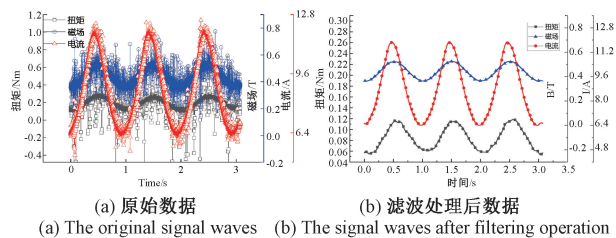


图 5 实验结果

Fig. 5 Experimental results

由图 5 可知,3 种信号波形的频率一致。电流信号以 1 Hz 的频率发生变化,电流的幅值为 3 A。且可知,磁场波形滞后于电流波形,MRF 传递的扭矩波形亦滞后于磁场波形,两者的相位差即 MRF 的响应时间。

2.2 寻峰算法

获得 MRF 响应时间即获得相位差,或波形峰点的时间差 τ_b 。在此,采用对称零面积法寻找波形峰值,即用一个对称面积为零的窗口函数,与原始信号进行卷积叠加变换,最大变换值所在位置即为峰点。数学表达式为:

$$\hat{Y}_i = \sum_{j=-m}^m C_j Y_{i+j} \quad (9)$$

$$\sum_{j=-m}^m C_j = 0 \quad (10)$$

$$C_j = C_{-j} \quad (11)$$

$W = 2m + 1$ 为窗宽, $\hat{Y}_i$ 和 Y_i 分别表示变换后的信号图谱和变换前的信号图谱。 C_j 为对称零面积窗函数,即变换函数:

$$C_j = G_j - \frac{1}{W} \sum_{j=-m}^m G_j \quad (12)$$

寻峰准则为:

$$SR_i = \frac{\hat{Y}_i}{\Delta \hat{Y}_i} = \frac{\sum_{j=-m}^m C_j Y_{i+j}}{\left(\sum_{j=-m}^m C_j Y_{i+j} \right)^{1/2}} > f \quad (13)$$

其中, f 为灵敏因子。

取 $H=4$ 、 $W=11$ 的零面积高斯函数做卷积变换,灵敏因子 $f=2.5$,寻峰结果如图 6 所示。随后,取多对相邻峰值之间的时间差均值,即得出 MRF 的响应时间。

2.3 实验结果分析

为了研究不同浓度 MRF 样品在不同磁场激励下的响应时间,分别配置体积分数为 26、30、40、50 vol% 的 MRF 样品。通过施加激励振幅电流 1、2、3 A 实现不同磁场激励强度,通过控制转子电机转速实现不同的剪切率条件(50~3 000 s^{-1})。

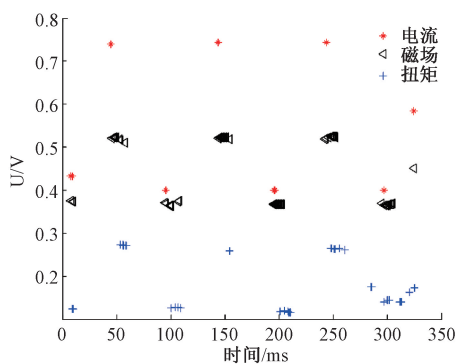


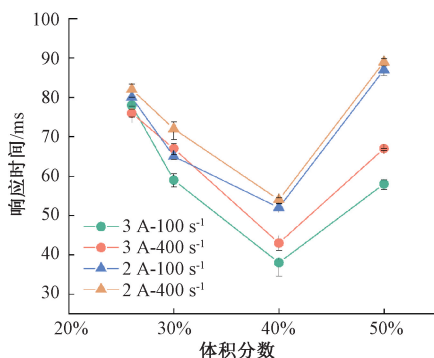
图 6 波形峰点寻峰结果

Fig. 6 Seeking of wave peaks of signal waves

1) 体积分数(浓度)

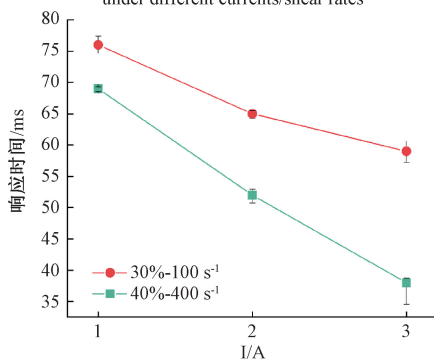
图 7(a)、(b)为电流幅值分别为 3 A 和 2 A 振幅正弦电流,分别对应 100、400 s^{-1} 剪切率下的响应时间与 MRF 体积分数的测试数据。

从图 7(a)可以看出,在输入正弦电流信号幅值为 3 A、剪切率为 100 s^{-1} 时,26、30、40、50 vol% MRF 的响应时间分别为 78、59、38、58 ms;在体积分数小于 40 vol% 时,响应时间随着 MRF 体积分数的增大而减少,在体积分数超过 40 vol% 后,响应时间随 MRF 体积分数的增大反而增长。在输入正弦电流信号幅值为 3 A、剪切率 400 s^{-1} 时,26、30、40、50 vol% MRF 的响应时间分别为



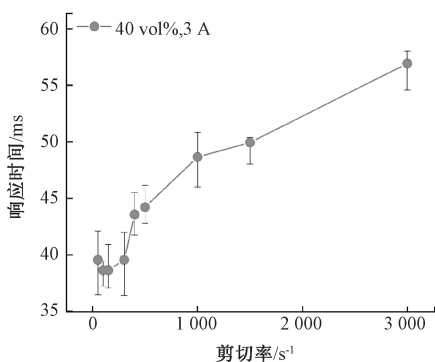
(a) 不同电流和剪切率下响应时间与 MRF 体积分数的关系

(a) Response time of MRF versus fraction under different currents/shear rates



(b) 响应时间与输入电流(磁场强度)的关系

(b) Response time of MRF versus current (field strength)



(c) 响应时间与剪切率的关系

(c) The relationship between response time and shear rate

图7 MRF 体积分数、电流、剪切率对响应时间的影响

Figure. 7 Volume fraction, current and shear rate influences on the response time

76、67、43、67 ms,与前者显示出相同的变化趋势。另取输入正弦信号电流幅值为 2 A,在剪切率分别为 100 s^{-1} 和 400 s^{-1} 时,各浓度下 MRF 的响应时间具有与前文相同的变化趋势。

2) 输入电流/磁场强度的影响

当输入电流大小发生变化时,装置内部的磁场强度亦随之变化。对于 40 vol% MRF,剪切率为 100 s^{-1} 时,对应于输入电流为 1、2、3 A 的响应时间分别为 69、52、38 ms;对于 30 vol% MRF,剪切率为 100 s^{-1} 时,对应输入电流为 1、2、3 A 的响应时间分别为 76、65、59 ms。从图 7(b)中可以看出,两种浓度的 MRF 均随着输入电流的增加而减小响应时间。其中的可能原因是,在 MRF 旋转剪切的过程中,外加磁场增大,MRF 中铁磁颗粒受到的磁力也增大,在相同剪切率和体积分数下,它们更快地聚集成磁链结构,则导致了 MRF 响应时间的缩短。

3) 剪切率的影响

MRF 的流变学性能与剪切率之间是有联系的,如屈服应力一般会随剪切率增大而呈下降趋势,而响应时间与剪切率之间的关系则鲜见报道。图 7(c)揭示了 MRF 响应时间与剪切率的关系。可知剪切率越大,MRF 的响应时间更长。在动态剪切过程中,MRF 受到的外部扭矩与内部剪切力达到动态平衡。当 MRF 处于剪切状态后,磁场作用形成的颗粒链簇不断被剪切破坏,而当剪切率越大时,这种破坏效应越大,则 MRF 在高剪切率下形成动态链簇平衡的时间更长。

2.4 误差分析

根据测量装置的信号传递过程可分析 MRF 响应时间的测量误差来源主要分为 3 部分,分别为剪切机构中扭矩响应与 MRF 响应的不同步、传感器信号采集同步时间的误差,以及探针磁场与实际磁场不同步的误差^[36]。

由于信号测量电路的时延为微秒级,与本文所测的毫秒级 MRF 响应时间之间至少相差 3 个量级,故可忽略该部分误差影响。扭矩的传递过程是由 MRF 传至工作间隙后被扭矩传感器采集,如图 8(a)所示。将已经磁化为类固体的 MRF 等效成一个扭转弹簧,从扭转弹簧上截取自由体,采用牛顿力学的方法建立运动方程,求解传递时间的误差 Δt ,如图 8(b)所示。由平衡条件得到扭转振动的微分方程为:

$$\left(M + \frac{\partial M}{\partial z} dz \right) - M + T(z, t) dz = 0 \quad (14)$$

其中, $M = GJ \frac{\partial \theta(z, t)}{\partial z}$ 为弹性内力矩, G 为材料的杨氏模量, J 为材料的惯性矩, $\theta(z, t)$ 为材料的扭转角。又因为在扭杆自由时,微元 dz 只有惯性力矩:

$$T(z, t) = -I(z) \frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} \quad (15)$$

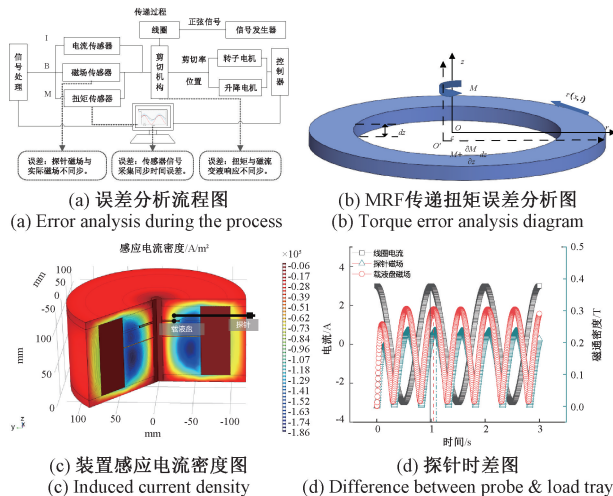


图8 装置误差分析

Fig. 8 Error analysis

联立可得:

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(GJ \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) = I(z) \frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} \quad (16)$$

因此弹性波沿轴向传播速度为:

$$c = \sqrt{\frac{GJ}{I}} = \sqrt{\frac{G\pi(R_0^2 - R_i^2)}{4[m(R_0^2 + R_i^2) + m\varepsilon^2]}} \quad (17)$$

$$\text{则, } \Delta t_1 = \frac{h}{c} = \sqrt{\frac{4h^2[m(R_0^2 + R_i^2) + m\varepsilon^2]}{G\pi(R_0^2 - R_i^2)}} \quad (18)$$

其中, m 为 MRF 质量, ε 为安装时的偏心距。另外,施加正弦变化电流于线圈中会导致铁芯中的涡流,如图 8(c)所示。从感应电流密度图中可以看出,涡流具有趋肤效应,越靠近表面,感应电流越大。

另一方面,由于机械尺寸的限制,磁场探针的位置难

以紧贴 MRF 工作间隙,而只能放置于其附近,如图 8(c)。然而,由于感应电流的存在,探针探测到的磁场与工作间隙中的实际磁场存在时间差 Δt_2 。对此进行仿真,分别探测电流变化,得到如图 8(c) 所示之结果。图中空心方框代表激励电流,探针和工作间隙处的磁场信号分别如三角形及圆形线框所示。由此可知,电流信号与磁场信号之间有相位差,代表了系统的电磁响应时间。然而,图中工作间隙磁场与探针磁场之间也存在相位差,即探针磁场先于工作间隙发生,这是因为在铁芯的内部存在涡流。从图 8(d) 可知,探针处的感应电流小于工作间隙中的感应电流,因此探针磁场变化快于工作间隙磁场变化,且在电流幅值为 3 A 时,二者之间的时间差为 $\Delta t_2 = 23 \text{ ms}$ 。

此外,除了上述误差之外,由于设备限制,采集卡各路通道之间会有 $1 \sim 3^\circ$ 的相位延迟,也会造成 MRF 响应时间测量的误差。

3 结 论

针对传统阶跃响应测量法存在的电流、磁场强度及剪切应力等多参数耦合解耦难题,本文提出了一种基于偏置正弦激励电流的 MRF 响应时间相位检测方法,并试制了一套 MRF 响应时间检测装置,通过输入正弦偏置电流产生的磁场信号峰值和扭矩信号峰值之间的相位差,测得 MRF 在不同剪切条件下的响应时间,无需面临阶跃响应法中的复杂解耦问题。此外,本文设计了一种密封式剪切装置,通过磁路设计和剪切盘半径、剪切缝隙高度等关键参数设计,解决高转速下 MRF 的离心泄露问题,实现了 $3\,000 \text{ s}^{-1}$ 高剪切率下的 MRF 响应时间测量,提高了 MRF 检测的剪切率上限,并研究了响应时间与剪切率之间的关系。

具体而言,首先通过 MRF 工作间隙的扭矩传递原理,推导了 MRF 剪切应力与传递力矩的理论关系,得出了扭矩峰值与磁场峰值之间的时间差即为 MRF 剪切应力与磁场峰值的时间差的结论。然后,对装置的磁路进行有限元分析,结合实现高剪切率的机械关键零部件设计,试制了 MRF 响应时间测量装置样机。随后,制备不同体积分数的 MRF,在不同剪切率和磁场下测得其电流、磁场及产生的扭矩信号。滤除信号中的高频干扰后,利用对称零面积法寻找峰值,得出 MRF 响应时间。最后,本文建立了 MRF 扭转弹簧模型,分析在传递转矩过程中由安装偏心 and 转动惯量引起误差,通过仿真分析了由探针位置带来的误差,对测得的响应时间进行了修正,测出 MRF 的响应时间在 $23 \sim 140 \text{ ms}$ 之间。测量了 26、

30、40、50 vol% MRF 样品在不同剪切率、磁场大小下的响应时间,分析了 MRF 响应时间与体积分数、磁感应强度和剪切率的关系。

参考文献

- [1] OSIAL M, PREGOWSKA A, WARCZAK M, et al. Magnetorheological fluids: A concise review of composition, physicochemical properties, and models [J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2023, 34(16): 1864-1884.
- [2] 杨健健, 晏华, 代军, 等. 磁流变液材料的性能与应用综述[J]. *化工进展*, 2017, 36(1): 254-267.
YANG J J, YAN H, DAI J, et al. A review on magnetorheological fluid: Properties and applications [J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2017, 36(1): 254-267.
- [3] DU X, ZHANG Y, LI J, et al. Unsteady and hysteretic behavior of a magnetorheological fluid damper: Modeling, modification, and experimental verification [J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2022, 34(5): 551-568.
- [4] SHOU M, LIAO C, YANG P A, et al. Hybrid modeling of the nonlinear behaviors for magnetorheological energy absorber [C]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2023, 243: 107820.
- [5] MASA'ID A, LENGGAN B W, UBAIDILLAH U, et al. A review on vibration control strategies using magnetorheological materials actuators: Application perspective [J]. *Actuators*. MDPI, 2023, 12(3): 113.
- [6] GONG H, SHU R, XIONG Y, et al. Dynamic response analysis of a motor-gear transmission system considering the rheological characteristics of magnetorheological fluid coupling [J]. *Nonlinear Dynamics*, 2023, 111(15): 13781-13806.
- [7] SINGH G, JAYANT A. Experimental investigation of a novel magnetorheological process based on three revolving curved tip tools for finishing of mild steel [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, 2022, 237(2): 229-239.
- [8] KAVLICOGU N C, KAVLICOGU B M, LIU Y, et al. Response time and performance of a high-torque magnetorheological fluid limited slip differential clutch [J]. *Smart Materials & Structures*, 2007, 16(1): 149.
- [9] TARMIZI S M A, NORDIN N A, MAZLAN S A, et al. Improvement of rheological and transient response of magnetorheological grease with amalgamation of cobalt

- ferrite [J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2023, 23: 1285-1295.
- [10] 司晓冬, 罗明良, 黄万里, 等. 磁流变液智能流体研究进展, 应用及展望[J]. *应用化工*, 2017, 46(9): 1783-1786, 1791.
- SI X D, LUO M L, HUANG W L, et al. Research, application and prospect of magnetorheological fluid[J]. *Applied Chemical Industry*, 2017, 46(9): 1783-1786, 1791.
- [11] WANG S, CHEN F, TIAN Z, et al. Dynamic analytical model containing eddy-current effects for response time of magnetorheological clutch[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2023: 1-12.
- [12] 田组织, 吴向凡, 谢方伟, 等. 磁流变液传动装置时间响应特性[J]. *制造业自动化*, 2022, 46(5): 190-195.
- TIAN ZH Z, WU X F, XIE F W, et al. Time response characteristics of magnetorheological fluid transmission device[J]. *Chinese Hydraulics & Pneumatics*, 2022, 46(5): 190-195.
- [13] CHEN K K, TIAN Y, SHAN L, et al. Transient response of sheared magnetic powder excited by a stepwise magnetic field and its comparison with ER and MR fluids[J]. *Smart Materials and Structures*, 2013, 22(9): 097001.
- [14] YANCHENG L I, JIANCHUN L I. Dynamic characteristics of a magnetorheological pin joint for civil structures [J]. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 2014, 9(1): 15-33.
- [15] BECNEL A C, SHERMAN S G, HU W, et al. Squeeze strengthening of magnetorheological fluids using mixed mode operation[J]. *Journal of Applied Physics*, 2015, 117(17pt.3): 1308-1315.
- [16] KIM H C, HAN C, KIM P, et al. A new measurement method of magnetic flux density using magnetorheological fluid characteristics and a variable resistor circuit[J]. *Smart Materials and Structures*, 2015, 24(8): 087002.
- [17] STRECKER Z, MAZUREK I, ROUPEC J, et al. Influence of MR damper response time on semiactive suspension control efficiency[J]. *Meccanica*, 2015, 50: 1949-1959.
- [18] WERELEY, NORMAN M, GOLINELLI, et al. Experimental characterization of magnetorheological fluids using a custom searle magnetorheometer: Influence of the rotor shape[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2016, 52(7): 1-4.
- [19] KIKUCHI T, ABE I, KUMAGAE T, et al. Torque-controllable device using a magnetorheological fluid with nano-sized iron particles for a haptic device [C]. *Proceedings of the 2017 IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)*, 2017.
- [20] SAHIN H, GORDANINEJAD F, WANG X, et al. Response time of magnetorheological fluids and magnetorheological valves under various flow conditions [J]. *Journal of Intelligent Material Systems & Structures*, 2012, 23(9): 949-957.
- [21] WIDODO P J, BUDIANA E P, UBAIDILLAH U, et al. Effect of time and frequency of magnetic field application on MRF pressure performance [J]. *Micro-machines (Basel)*, 2022, 13(2): 222.
- [22] GABRIEL C, LAUN H M. Combined slit and plate-plate magnetorheometry of a magnetorheological fluid (MRF) and parameterization using the Casson model [J]. *Rheologica Acta*, 2009, 48(7): 755-768.
- [23] MAAS J R, GUTH D. Experimental Investigation of the Transient Behavior of MR Fluids[C]. *Proceedings of the AsConference on Smart Materials*, 2011.
- [24] KUBIK M, VALEK J, ZACEK J, et al. Transient response of magnetorheological fluid on rapid change of magnetic field in shear mode [J]. *Scientific Reports*, 2022, 12(1): 10612.
- [25] BECNEL A C, HU W, WERELEY N M. High shear rate characterization of magnetorheological fluids [J]. *Proc Spie*, 2012, 8341(5): 21.
- [26] ULICNY J C, GOLDEN M A, NAMUDURI C S, et al. Transient response of magnetorheological fluids: Shear flow between concentric cylinders [J]. *Journal of Rheology*, 2005, 49(1): 87-104.
- [27] BERLI C L A, DE VICENTE J. A structural viscosity model for magnetorheology[J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 101(2): 3701-3230.
- [28] HU Z D, YAN H, QIU H Z, et al. Friction and wear of magnetorheological fluid under magnetic field[J]. *Wear*, 2012, 278-279(none): 48-52, DOI: 10.1016/j.wear.2012.01.006.
- [29] JONKKARI I, KOSTAMO E, KOSTAMO J, et al. Effect of the plate surface characteristics and gap height on yield stresses of a magnetorheological fluid [J]. *Smart Materials & Structures*, 2012, 21(7): 416-422.
- [30] KOO J H, GONCALVES F D, AHMADIAN M. A comprehensive analysis of the response time of MR dampers [J]. *Smart Materials and Structures*, 2006,

- 15(2): 351-358.
- [31] 张建, 张进秋, 刘义乐, 等. 磁流变液流变机理的三维动态仿真分析[J]. 中国粉体技术, 2016, 22(5): 47-53.
- ZHANG J, ZHANG J Q, LIU Y L, et al. Three dimensional simulation on mechanism of shear thinning and magnetic response time[J]. China Powder Science and Technology, 2016, 22(5): 47-53.
- [32] FU Y, YAO J, ZHAO H, et al. Simulation of a bidisperse magnetorheological fluid using the combination of a two-component lattice Boltzmann method and a discrete element approach [J]. Soft Matter, 2019, 15(34): 6867-6877. DOI:10.1039/C9SM01408J.
- [33] 李治澎, 解明利. 一种磁流变液性能测试用的凹字型磁路结构设计研究[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(7): 62-73.
- LI ZH P, XIE M L. Design and research of concave magnetic circuit structure for magnetorheological fluid performance test [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(7): 62-73.
- [34] 卢少波, 赵路毅. 矩形凹结构转子磁流变阻尼器的设计与优化[J]. 振动与冲击, 2023, 42(10): 172-179.
- LU SH B, ZHAO L Y. Design and optimization of magnetorheological damper for rotor with rectangular concave structure[J]. Journal of Vibration and Shock, 2023, 42(10): 172-179.
- [35] 赖联有, 许伟坚. 用扩散方程实现零相位误差滤波[J]. 电子测量与仪器学报, 2018, 32(5): 176-181.
- LAI L Y, XU W J. Method of zerophase error filtering using diffusion equation [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2018, 32(5): 176-181.
- [36] 林海军, 黄国良, 赖小强, 等. 旋转式粘度仪误差补偿方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2018, 32(3):

189-194.

LIN H J, HUANG G L, LAI X Q, et al. Method for compensating errors of the rotational viscometer [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2018, 32(3): 189-194.

作者简介



李佩, 2015 年于华北电力大学获得学士学位, 2019 年于重庆大学获得硕士学位。现为重庆大学博士研究生, 主要研究方向为智能材料与柔性压力传感器。

E-mail: Alixiaopei@cqu.edu.cn

Li Pei received her B. Sc. and M. Sc. degrees both from North China Electric Power University and Chongqing University in 2015 and 2019, respectively. She is currently a Ph. D. candidate at Chongqing University. Her main research focus on the smart materials and structures and flexible electronics.



谢磊(通信作者), 2010 年于重庆大学获得学士学位, 2013 年至 2015 年在美国马里兰大学航空航天工程系担任客座博士生, 2016 年于重庆大学获博士学位, 现为重庆大学光电工程学院副教授。主要研究方向为智能材料和结构、柔性电子。

E-mail: lxie@cqu.edu.cn

Xie Lei (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Chongqing University in 2010. He was a visiting doctoral student in the Department of Aerospace Engineering at the University of Maryland in United States from 2013 to 2015, and received his Ph. D. degree from Chongqing University in 2016. He is currently an associate professor in the College of Optoelectronic Engineering at Chongqing University. His main research interests include smart materials and structures and flexible electronics.