

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2022.03.007

# 基于开放极板电容器的磁流变液沉降原位监测研究

苏杭<sup>a</sup>, 张红辉<sup>a,b</sup>, 邹致远<sup>a</sup>, 廖昌荣<sup>b</sup>

(重庆大学 a. 光电工程学院; b. 光电技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400044)

**摘要:** 实时原位监测可以感知阻尼器件内部磁流变液沉降状态, 以主动分散提升器件可用性。通过研究磁流变液浓度梯度与沉降体介电常数的关系, 构建了开放电容式磁流变液沉降状态原位监测方法与系统。开展了电容中心柱极高度对磁流变液准静态沉降过程电场分布影响的仿真分析, 并通过沉降监测试验表明: 系统能够有效地监测磁流变液静置沉降状态; 随着沉降体浓度增大, 其介电常数相应增大, 开放极板电容器电容值增大; 随着沉降进程的发展, 沉降速率逐渐降低。

**关键词:** 磁流变液; 沉降; 开放极板电容; 原位监测; 介电常数

中图分类号: TB381

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2022)03-062-07

## Open-plate capacitor based in-situ monitoring for magnetorheological fluid settling

SU Hang<sup>a</sup>, ZHANG Honghui<sup>a,b</sup>, ZOU Zhiyuan<sup>a</sup>, LIAO Changrong<sup>b</sup>

(a. College of Optoelectronic Engineering; b. The Key Laboratory of Optoelectronic Technology & Systems, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China)

**Abstract:** It is of great significance to establish an in-situ settlement monitoring system for the magnetorheological (MR) fluid in devices. By studying the relationship between the concentration gradient of MR fluid and the dielectric constant of the sediment, a monitoring method and system based on an open-plate capacitor is designed. The influence of center pillar height on the electric field distribution is simulated, and the in-situ monitoring of MR fluid show that the system can effectively measure the static settlement of magnetorheological fluid. The dielectric constant of the sediment increases with the heightening of concentration, and the sedimentation ratio lowers with the development of the settling process.

**Keywords:** magnetorheological fluid; sedimentation; open-plate capacitor; in-situ monitoring; dielectric constant

磁流变液(MRF)是以微米级羰基铁粉为分散相,以硅油为分散介质制备而成的智能材料,其表观粘度在外部磁场诱导下可发生可逆变化,在工程减振领域展现出巨大潜力<sup>[1-2]</sup>。由于分散相与分散介质间巨大的密度差,即使添加剂技术已经取得长足进步,磁流变液静置后仍不可避免地发生沉降,限制了该类材料的工程应用范围。

收稿日期: 2021-10-01

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(62073050); 国防基础科研计划资助项目(JCKY2018110C129)。

Supported by National Natural Science Foundation of China (62073050) and National Defense Basic Research Program (JCKY2018110C129).

作者简介: 苏杭(1996—),男,硕士研究生,主要从事磁流变液材料方向研究,(E-mail)1329597102@qq.com。

通讯作者: 张红辉(1977—),男,副教授,主要从事智能结构系统方向研究,(E-mail)hhzhang@cqu.edu.cn。

目前,磁流变液沉降监测主要使用目视法、热导率法、电感法以及电势法等。目视法通过观测泥线的变化来分析磁流变液沉降,无法用于非透明容器内的磁流变液沉降观测;热导率法将温度探头安装在磁流变液样品液柱底部,在固定位置获得磁流变液热导率<sup>[3]</sup>,由于热导率与浓度有关而转化为对磁流变液沉降的监测,受限于样品的热环境稳定性;电感法使用垂直移动扫描的自感传感器跟踪泥线下降评估磁流变液沉降<sup>[4-5]</sup>,无法适用于金属容器内磁流变液沉降监测。总体而言,这些研究只能在实验室监测非服役状态下的磁流变液样品,属于非原位监测,无法满足钢制缸筒内、服役条件下磁流变阻尼器中的磁流变液沉降监测需要。

磁流变液原位监测方法指在监测对象内部构建的具有伴随运行能力的监测方法,实现基于传感器的实时在线监测系统并输出结果。原位监测广泛应用于水质监测、大气环境监测、海洋资源探测等方面,相较而言,磁流变液沉降原位监测可以实现磁流变阻尼器内部连续、实时的状态监测。

综上所述,为减少测量方法对磁流变液沉降过程的影响,实现对磁流变液器件内部沉降特性的局部、在线、实时动态监测,通过研究磁流变液浓度梯度与沉降体介电常数的关系,设计了基于开放电容的磁流变液沉降状态的原位监测系统,采用电磁有限元开展传感器特性仿真与设计,试验研究了系统对磁流变液静沉降过程监测的有效性。

## 1 监测系统

如图1所示,原位监测系统由带中心孔的底部极板及与之垂直同轴的中心柱极组成,下方的圆形板的底部是绝缘层,开放极板设计可保证监测范围充分覆盖整个沉降区域。该系统将开放极板电容放置在缸筒中,因此,该系统可以实现阻尼器件的沉降状态在线监测。

由于小电容测量容易产生较大的误差,在缸筒直径的约束下,电容极板直径越大越好,以提高测量精度。缸筒内径为42 mm,底部极板直径设计为41 mm,底部极板中心孔尺寸直径为8 mm,用于中心柱极穿过。底部极板与中心柱极距离越近,电容器电容值越大,因此将中心柱极直径设定为7 mm,电容器中心柱极高度对沉降监测具有较大影响,通过电场有限元仿真确定。

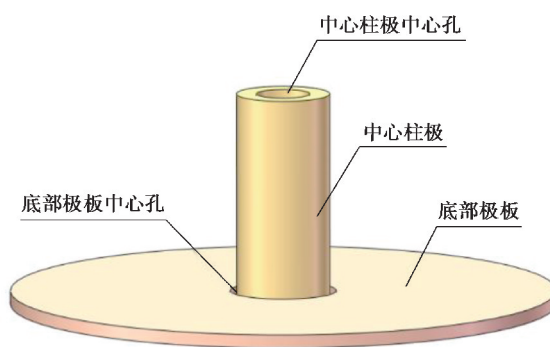


图1 原位监测系统

Fig. 1 The in-situ monitoring system

## 2 数值仿真

由于没有正对面积,开放极板电容难以建立理论模型,笔者采用有限元仿真研究特定介质条件下的电场分布。利用Maxwell软件仿真分析中心柱极高度对电容器电容的影响,对开放极板电容器的设计非常重要。

研究中,仿真模型材料属性有2种:铜、介质,介质选为空气,介电常数约为1,从材料库中选取,中心柱极高度分别设定为10,12,14,16 mm。仿真结果如图2所示。

从仿真结果可以看出,越靠近中心柱极位置场强越大。图3显示的是中心柱极高度与电容器电容之间的关系曲线,随着中心柱极高度的增加,电容器的电容值越来越大。为提高测量精度,在条件允许范围内,电

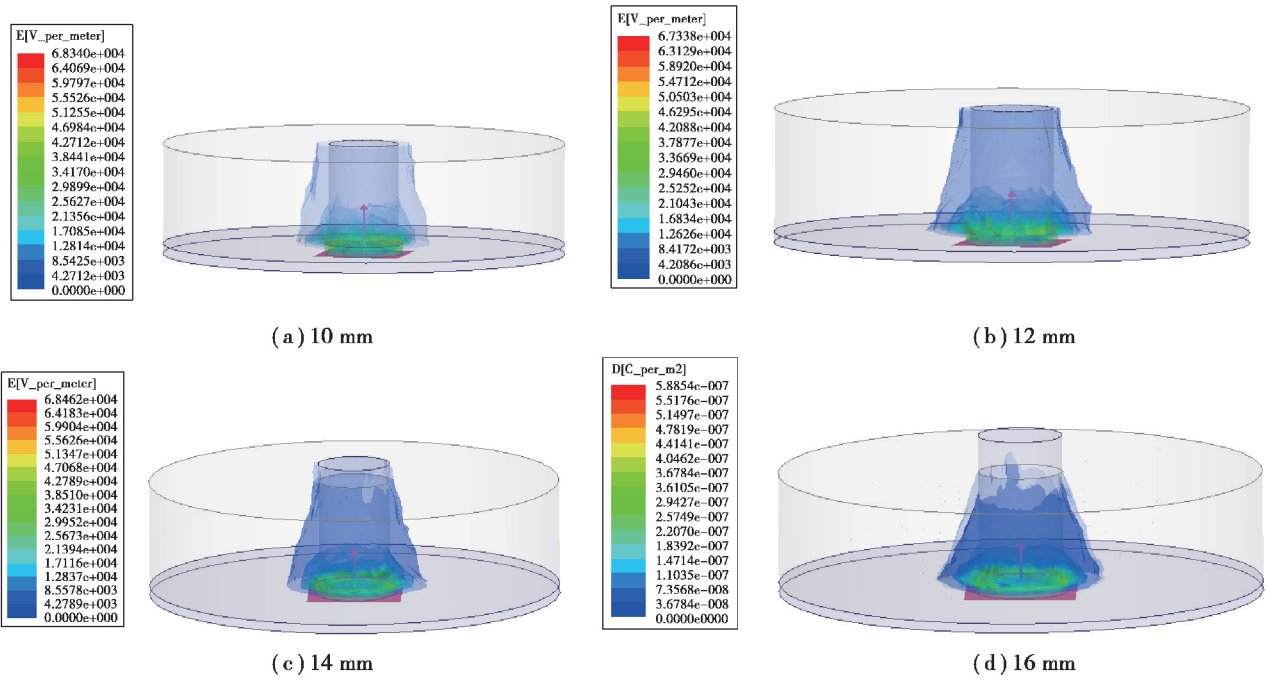


图 2 不同中心柱极高度下的电场强度分布仿真结果

Fig. 2 Electric field under different center pillar heights

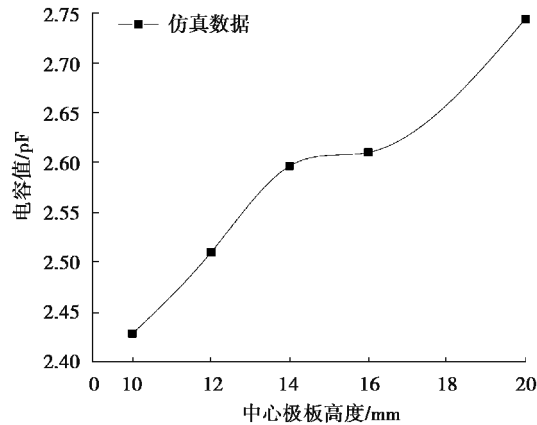


图 3 中心柱极高度与电容器电容关系

Fig. 3 The relationship between the height of the center pillar and the capacitance

容器中心柱极高度越高越好。研究中为了设计合理性,电容器中心柱极高度设定为 16 mm。

### 3 实验分析

开放电容设计难以计算理论容值,只有通过实验才能准确证明其可行性。商业化的磁流变液在数十天以上才发生分层,沉降过程缓慢,这将使实验持续很长时间。为了加快试验过程,将羰基铁粉(粒径为  $3.5\ \mu\text{m}\sim 5\ \mu\text{m}$ )与硅油(粘度为  $100\text{cP}$ )充分搅拌并混合制备,自制简单磁流变液样品开展现场监测研究。研究中的所有样品均表示为 MRFQS,其中 QS 表示颗粒的质量分数<sup>[6-7]</sup>。

实验装置示意图如图 4 所示,实验设备包括开放极板电容器,钢瓶,铁架台,LCR 电容测量仪和计算机。钢瓶是带盖的缸筒,高度为 120 mm。电容器安装在钢瓶底部的中央。导线从钢瓶底部的中心孔引出,并连接到 LCR 电容测量仪器以记录电容。研究选取的电容测量设备为高频率商用电桥 LCR 测量仪,型号为 victor 4092,精度为  $0.01\text{pF}$ 。LCR 采集频率的选取与测量的电容值大小有关,由于开放极板电容器电容值为

数 pF,采集频率设定为 100 kHz。

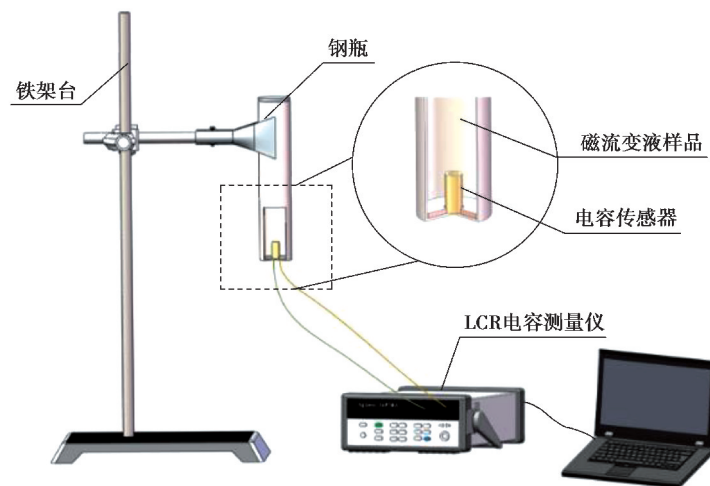


图 4 原位监测系统示意图

Fig. 4 The schematic of the in-situ monitoring system

为了确定样品浓度与容值之间的关系,制备了 7 种磁流变液浓度的样品,分别为 MRF10, MRF20, …… , MRF70。将 100 ml 已知浓度磁流变液样品倒入测量容器中,确保磁流变液样品的液柱高度大于中心柱极高度,记录测得的电容,每个磁流变液样品测量 5 次并做算术平均。在实验过程中,实验装置是固定的,测量容器的外壁连接到 LCR 表的接地端子,以屏蔽电磁干扰。为了确保测量精度,在 20 °C 恒温器中进行测量实验。图 5 为获得的磁流变液样品浓度和开放极板电容器容值间的关系。可见,开放极板电容器容值与磁流变液浓度间呈现较为复杂的正相关关系,并且呈现两边变化大而中间浓度影响较为稳定的特征<sup>[8-12]</sup>。

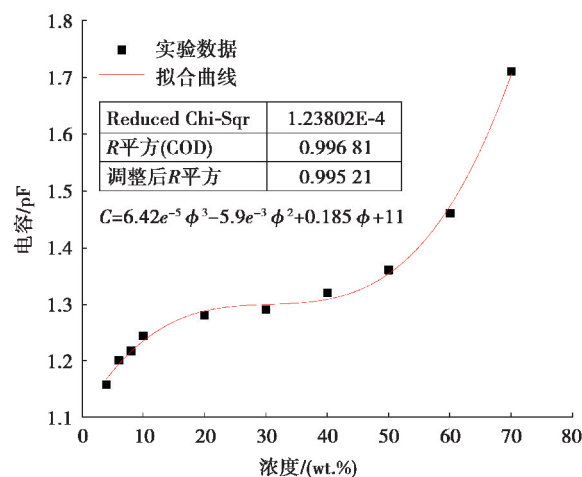


图 5 电容器电容与样品浓度关系

Fig. 5 Relationship between capacitance and sample concentration

由于 MRF20, MRF30, MRF40 的磁流变液样品与容值的关系较为稳定,对其沉降特性开展了更为细致的试验验证。测量容器中沉降区浓度随时间逐渐增加,直到浓度值稳定,图 6(a)显示了 3 组磁流变液样品沉降区浓度与时间的关系曲线, MRF20、MRF30、MRF40 样品沉降达到稳定的时间分别为 550 min、1 350 min 和 1 750 min。随着沉降的进行,沉降体的高度将逐渐增加,导致沉降体的介电常数增加,电容值逐渐增加。分析曲线斜率,3 种磁流变液样品在沉降初期,沉积区的浓度变化较快,对沉降初期曲线进行细分,随着初始浓度增加,沉降的初始斜率逐渐减小,说明低浓度样品在沉积区浓度变化速率更快<sup>[13-14]</sup>。

为了更深入的分析沉降体的沉降特性,对浓度-时间曲线进行求导得到 3 种磁流变液样品的沉降速率与

时间的关系曲线,如图 6(b)所示。沉降初期,MRF20 的样品浓度变化率高于 MRF30 样品和 MRF40 样品,经过一段时间后,MRF20 样品的沉降率逐渐低于其他 2 个样品。3 种磁流变液样品沉降速率都由快变慢。可见,沉降的初始阶段,样品液柱各区域浓度相对较低,原始浓度区域和可变浓度区域中的铁磁颗粒沉降到了沉积区,从而导致沉积区浓度的显著变化,各区域沉降的分散相在沉积区不断积累,这导致沉降体浓度变化非常明显。随着沉降的进行,各区域的颗粒浓度增加,沉积区沉降速率进一步降低,沉降体浓度随时间变化为指数关系。

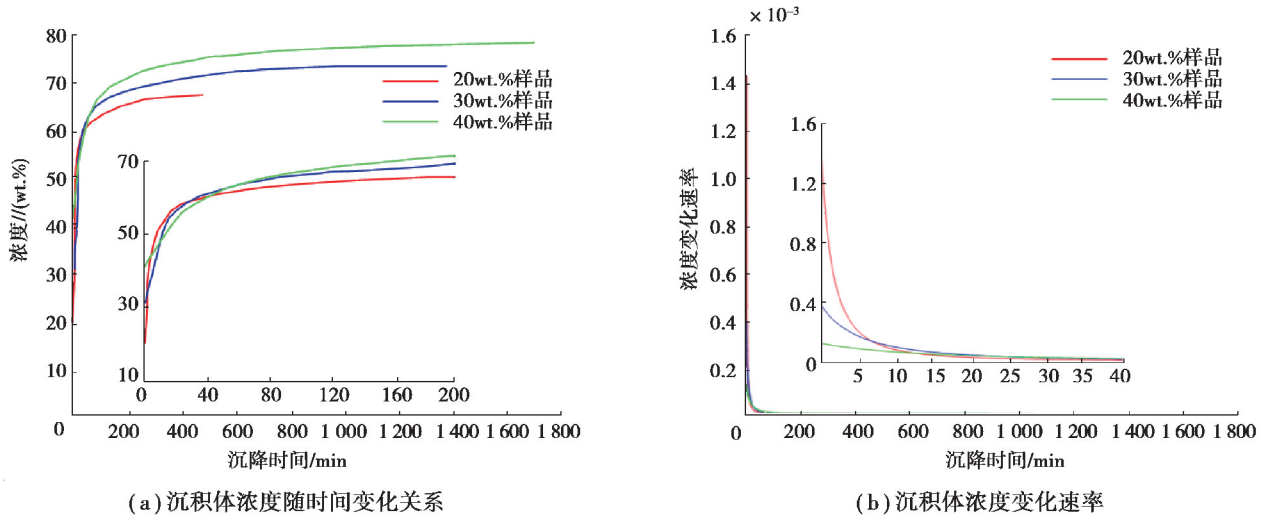


图 6 (a) 沉积体浓度随时间变化关系 (b) 沉积体浓度变化速率

Fig. 6 (a) Concentration change of the sediment, (b) Concentration change rate of the sediment

## 4 结 论

研究针对真实阻尼器件中静置磁流变液的沉降特性,提出了基于开放极板电容的原位监测方法。通过开放极板电容设计,电容容值随磁流变液沉降状态而改变,基于 LCR 仪获取电容值来表征磁流变液的静置沉降特性,并得到如下结论:

- 1) 开放极板电容容值与其沉降区浓度变化呈正相关关系,随着沉降区磁流变液浓度增大,电容值增大,且在沉降初期,低浓度样品在沉积区浓度变化速率更快。
- 2) 基于开放极板电容的沉降原位监测方法能够有效地用于磁流变液静置沉降状态的测量,并克服现有监测方法对容器透明性和材质的限制,可以用于真实磁流变器件,实现其内部磁流变液沉降特性的在线监测。

### 参考文献:

- [1] 李凯权,代俊,常辉,等. 磁流变材料的应用综述[J]. 探测与控制学报, 2019, 41(1): 6-14.  
Li K Q, Dai J, Chang H, et al. Review of magnetorheological materials application[J]. Journal of Detection & Control, 2019, 41(1): 6-14. (in Chinese)
- [2] Choi Y T, Xie L, Wereley N M. Testing and analysis of magnetorheological fluid sedimentation in a column using a vertical axis inductance monitoring system[J]. Smart Materials and Structures, 2016, 25(4): 04LT01.
- [3] Cheng H B, Zhang X P, Liu G Z, et al. Measuring the sedimentation rate in a magnetorheological fluid column via thermal conductivity monitoring[J]. Smart Materials and Structures, 2016, 25(5): 055007.
- [4] Vežys J, Dragašius E, Volkovas V, et al. The sedimentation of magneto-rheological fluid monitoring system based on resistivity measuring[J]. Mechanics, 2016, 22(5): 449-452.
- [5] 陈乐生,陈大跃,黄震宇,等. 电感法测量磁流变液沉降系数的研究[J]. 仪表技术与传感器, 2002(10): 50-52, 54.

- Chen L S, Chen D Y, Huang Z Y, et al. Research on inductance methods of measuring the sedimentation constant of MRF[J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2002(10): 50-52, 54. (in Chinese)
- [6] 林忠华. 磁流变液的介电常数研究[C]//福建省科协第五届学术年会数字化制造及其它先进制造技术专题学术年会论文集. 厦门, 2005: 408-411.
- Lin Z H. Study on dielectric constant of magnetorheological fluid[C]//Proceedings of the 5th fujian association for science and technology annual conference on digital manufacturing and other advanced manufacturing technologies. Xiamen, 2005: 408-411.
- [7] 赵建柱, 孙凤涛, 王枫辰, 等. 基于电容率测量的磁流变液静置沉降特性研究[J]. *功能材料*, 2017, 48(8): 8092-8096.
- Zhao J Z, Sun F T, Wang F C, et al. Magneto-rheological fluid static sedimentation characteristic measurement method study based on the capacitance testing[J]. *Journal of Functional Materials*, 2017, 48(8): 8092-8096. (in Chinese)
- [8] Aruna M N, Rahman M R, Joladarashi S, et al. Influence of additives on the synthesis of carbonyl iron suspension on rheological and sedimentation properties of magnetorheological (MR) fluids[J]. *Materials Research Express*, 2019, 6(8): 086105.
- [9] Wen M F, Chambers J, Sherman S G, et al. Monitoring sedimentation of magnetorheological fluids using a vertical axis monitoring system with a low aspect ratio sensor coil[J]. *Smart Materials and Structures*, 2019, 28(2): 025-039.
- [10] Zhang Y J, Li D C, Zhang Z L. The study of magnetorheological fluids sedimentation behaviors based on volume fraction of magnetic particles and the mass fraction of surfactants[J]. *Materials Research Express*, 2020, 6(12): 126-127.
- [11] 廖昌荣, 张红辉, 余森, 等. 磁流变液的流变学特性检测方法与仪器研究[J]. *仪器仪表学报*, 2008, 29(12): 2475-2479.
- Liao C R, Zhang H H, Yu M, et al. Study on test methodology and instrument for rheological properties of magnetorheological fluids[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2008, 29(12): 2475-2479. (in Chinese)
- [12] 张晓飞. 基于介电常数测量的油液监测技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2008.
- Zhang X F. Study of oil monitoring technology based on dielectric constant measurement[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2008. (in Chinese)
- [13] 赵明媚, 张进秋, 姚军, 等. 磁流变液沉降稳定性影响因素分析[J]. *金属功能材料*, 2017, 24(3): 29-32.
- Zhao M M, Zhang J Q, Yao J, et al. Analysis of magnetorheological fluid settling stability influence factors[J]. *Metallic Functional Materials*, 2017, 24(3): 29-32. (in Chinese)
- [14] Zhu W N, Dong X F, Huang H, et al. Enhanced magnetorheological effect and sedimentation stability of bimodal magnetorheological fluids doped with iron nanoparticles[J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2021, 32(12): 1271-1277.

(编辑 侯 湘)