

[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2018.01.010

磁流变液屈服应力测试装置磁路仿真研究

杨斌, 罗一平, 孙玉香, 刘文涛

(上海工程技术大学汽车工程学院, 上海 201620)

摘要:为了满足磁流变液屈服应力测试所需的磁场要求,针对不同的磁源,提出了永磁式、电流励磁式和复合式3种磁路方案。确定了磁路各部分的材料和尺寸参数,并利用有限元软件建模进行仿真计算,分析3种磁路模型的磁感线分布和磁通密度。研究表明:复合式磁路更加高效节能,为最优的磁路设计方案。所设计的装置能够满足测试的磁场要求,为后续实验平台的搭建及实验的展开奠定了基础。

关键词:磁流变液;屈服应力测试装置;磁路设计;Ansoft Maxwell有限元分析软件

中图分类号:TH122 文献标志码:A 文章编号:1005-2895(2018)01-0046-07

Simulation Research on Magnetic Circuit of Magnetorheological Fluid Yield Stress Testing Device

YANG Bin, LUO Yiping, SUN Yuxiang, LIU Wentao

(School of Automotive Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

Abstract: In order to meet the requirements of the magnetic field required by the yield stress test of magnetorheological fluid, this paper proposed three kinds of magnetic circuit schemes for different magnetic sources, which were permanent magnet type, current exciting mode and compound mode. The material and size parameters of each part of the magnetic circuit were determined. The finite element software was used for modeling and simulation calculation, and the magnetic induction line and the magnetic flux density were analyzed. The results show that the compound magnetic circuit is more efficient and energy saving, which is the optimum design scheme of magnetic circuit. The designed device can meet the test requirement of the magnetic field, which establishes the foundation for the construction of the experimental platform and the development of the experiment.

Keywords: magnetorheological fluid; yield stress testing device; magnetic circuit design; Ansoft Maxwell

磁流变液是一种在外加磁场作用下流变特性发生急剧变化的新型智能材料,其流变特性可由外加磁场连续控制^[1]。基于此设计的磁流变液器件拥有易控制、低耗能、响应迅速、结构简单等优点,具有广泛的工程应用前景^[2]。屈服应力是磁流变液的主要性能参数之一,在磁流变液的理论及应用研究中占有十分重要的地位,而稳定可控的磁场是准确测量磁流变液屈服应力的前提条件^[3]。因而,合理的磁路设计对准确测量磁流变液屈服应力的研究是十分必要的。

美国 Lord 公司的研究人员开发了一种建筑结构抗振的阻尼器^[4-5],把筒体作为磁路的一部分,采用了

3组活塞进行串联,电磁线圈绕制于活塞上,同时设计了专用的补偿装置;中国民航大学的田静^[6]设计了几种不同的剪切阀式磁流变减震器模型,对其进行了磁路分析,比较了以上2个因素对磁场利用率的影响;刘苑辉^[7]等人应用有限元软件中的电磁场分析模块,对剪切式磁流变液阻尼器进行了磁路分析,比较了2种阻尼器的磁力线和磁感应强度分布;武汉科技大学的雷阳^[8]等人提出采用永磁铁作为磁源的圆筒式磁流变液极限转矩联轴器,并进行设计分析。目前,对磁流变液装置的应用和研究一般是采用电磁线圈作为其磁源。相较于电磁线圈,对使用电磁线圈与永磁铁二者

收稿日期:2017-05-15;修回日期:2017-08-10

第一作者简介:杨斌(1992),男,江苏扬州人,硕士研究生,主要研究方向为汽车先进制造与检测技术、智能材料与应用。E-mail:suesyangbin@163.com

结合使用作为磁源的磁流变液装置的研究很少。

因此,课题组结合基于提拉法^[9]的磁流变液屈服应力测试装置的结构特点,提出永磁式、电流励磁式和复合式3种磁路方案,运用有限元分析软件建立3种磁路模型,并进行磁场仿真分析,为磁流变液屈服应力测试实验平台的搭建提供依据。

1 磁路计算基本理论

电磁场理论可以用一组麦克斯韦方程组来表达,它实际上是由4个定律组成,即安培环路定律、法拉第电磁感应定律、高斯电通定律和高斯磁通定律^[10]。麦克斯韦方程组一般有积分形式和微分形式2种表示形式。其积分形式为:

$$\left\{ \begin{array}{l} \oint_{\Gamma} \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \iint_{\Omega} (\mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}) \cdot d\mathbf{S}; \\ \oint_{\Gamma} \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = - \iint_{\Omega} \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \cdot d\mathbf{S}; \\ \oiint_{S} \mathbf{D} \cdot d\mathbf{S} = \iiint_{v} \rho dv; \\ \oiint_{S} \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} = 0. \end{array} \right. \quad (1)$$

式中: \mathbf{H} 为磁场强度, \mathbf{l} 为闭合路径, Γ 为曲面 Ω 的边界, \mathbf{J} 为传导电流密度矢量, $\frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$ 为位移电流密度, A/m^2 ; \mathbf{D} 为电通密度, C/m^2 ; \mathbf{E} 为电场强度, V/m ; \mathbf{B} 为磁感应强度, T ; ρ 为电荷体密度, C/m^3 ; v 为闭合曲线 S 所围成的体积区域。

式(2)是麦克斯韦方程组的微分形式:

$$\left\{ \begin{array}{l} \nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}; \\ \nabla \times \mathbf{E} = - \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}; \\ \nabla \cdot \mathbf{D} = \rho; \\ \nabla \cdot \mathbf{B} = 0. \end{array} \right. \quad (2)$$

通过其微分形式可以推导出相应的微分方程,为应用有限元分析法求解电磁场问题提供理论依据。

在电磁场问题实际求解过程中,有多种形式的边界条件,但基本上可概括为3种类型:诺依曼(Neumann)边界条件、狄利克莱(Dirichlet)边界条件以及二者的组合^[11]。

诺依曼边界条件表示为:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial n} \Big|_{\Gamma} + f(\Gamma) \Phi|_{\Gamma} = h(\Gamma). \quad (3)$$

式中: Γ 为诺依曼边界, Φ 为磁通量, n 为边界 Γ 的外法线矢量, $f(\Gamma)$ 和 $h(\Gamma)$ 为一般函数,可为常数和零。当为零时称此为齐次诺依曼条件。

狄利克莱边界条件表示为:

$$\Phi|_{\Gamma'} = g(\Gamma'). \quad (4)$$

式中: Γ' 为狄利克莱边界, Φ 为磁通量, $g(\Gamma')$ 是位置的函数,可以为常数和零。当为零时称此狄利克莱边界为齐次边界条件,此时描述的是磁力线平行于所给定的边界线。下文所加载的边界条件即为此边界条件。

2 磁流变液屈服应力测试装置的结构

基于提拉法原理,屈服应力测试装置的结构图如图1所示。装置主要是由磁源、磁流变液及其储液槽、导磁回路、测量块及其拉力系统等部分组成。磁路结构要求能够提供试验要求的最大磁场,且在测试槽内的磁场分布要均匀,提拉块插入装有磁流变液的储液槽内,在加载力 F 的作用下提拉块与磁流变液发生相对运动,使提拉块表面和磁流变液发生剪切现象,进而测得磁流变液屈服应力。

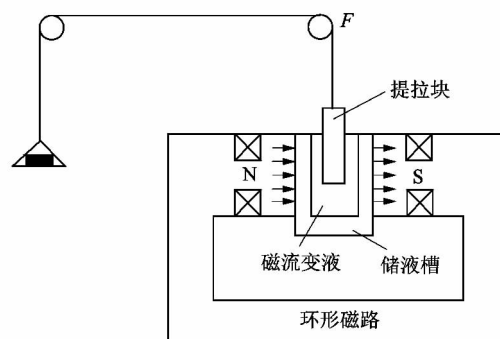


图1 屈服应力测试装置结构图

Figure 1 Structural drawing of yield stress testing device

2.1 储液槽

在装置中,储液槽是盛放磁流变液测试样品,且产生剪切屈服应力的场所。从传递磁场的角度,储液槽的尺寸越小越好,考虑到加工的可行性,储液槽的侧壁厚和底面厚均为4 mm,储液槽长为68 mm,高为60 mm,宽设为34 mm。

2.2 磁源

本文中测试装置的磁场要求覆盖储液槽中全部参与工作的磁流变液,并使其分布尽可能均匀,以保证磁流变液工作时的稳定性。方形永磁铁长为70 mm,高为75 mm,厚为10 mm。线圈采用内径为0.5 mm的漆包线,铁芯半径为20 mm,铁芯外半径为37.5 mm,高度为17 mm,2个线圈均绕线1 000匝。

2.3 导磁回路

导磁回路的主要作用是与磁源、储液槽及其中的磁流变液构成闭合磁路,使工作间隙中的磁流变液得到较

高的磁通密度,减少整个磁路中的漏磁。因此,导磁回路的形状没有很高的要求标准,为了加工的方便,导磁回路采用长方体结构。各段磁路的厚度为 30 mm,为了和磁芯外径保持一致,各段磁路的宽度为 75 mm。

3 磁路设计方案

3.1 永磁式磁路

永磁式磁流变液测试装置采用双磁体串联磁路的结构形式,它是指由成对永磁铁、导磁回路、储液槽及其中的磁流变液等主要部分组成的闭合磁路,如图 2 所示。永磁式磁流变测试装置的工作原理,是通过依次串联 1 对永磁铁、2 对永磁铁和 3 对永磁铁的方式来改变工作间隙处的磁场大小。

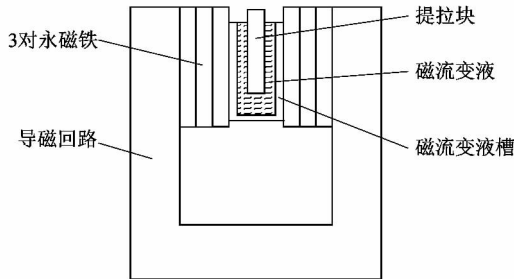


图 2 永磁式磁路结构示意图

Figure 2 Schematic diagram of permanent magnetic circuit structure

3.2 电流励磁式磁路

电流励磁式磁路主要由磁源线圈、铁芯、导磁回路、储液槽及其中的磁流变液与外部直流稳压电源(未在图中画出)等部分组成,如图 3 所示。磁源线圈和外部直流稳压可调电源是 2 个相对独立的部分,两者之间通过电线连接在一起。利用直流稳压电源能够保证提供稳定的、可连续变化的电流,从而达到调控工作间隙磁场强度大小的目的,完成对磁流变液剪切应力的测试。

3.3 复合式磁路

复合式磁路主要由永磁铁、磁源线圈、铁芯、导磁回路、储液槽及其中的磁流变液与外部直流稳压可调电源等部分组成。因为永磁铁与电磁铁安放位置的不同,复合式磁路有 2 种结构形式,如图 4(a)和 4(b)所示。通过调整线圈电流,使磁场正向或反向叠加,对磁流变测试装置工作间隙的磁场达到最大的可控性。

3.4 磁路材料的选择

Q235 钢是一种具有良好的力学性能和导磁性能的碳素结构钢。由于 Q235 钢的加工工艺已经很成熟,材料容易获得,价格便宜且具有良好的机械加工性

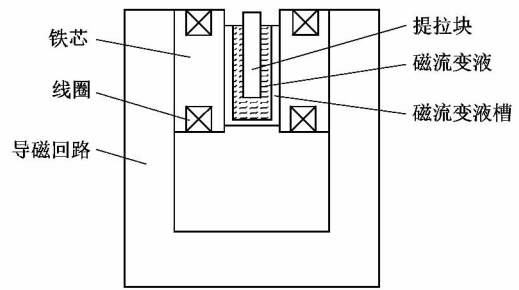
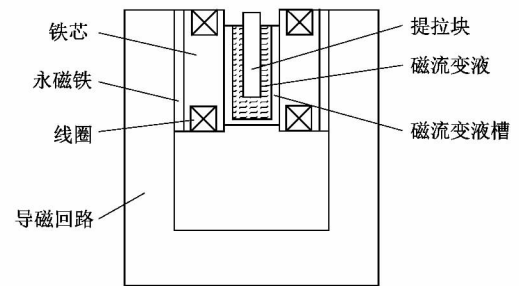
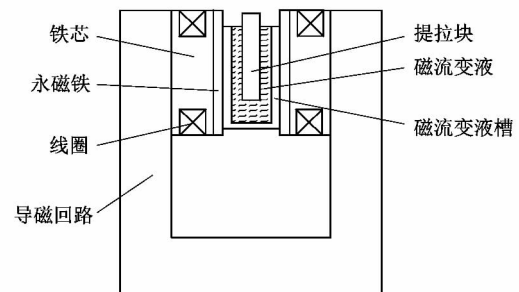


图 3 电流励磁式磁路结构示意图

Figure 3 Schematic diagram of current exciting magnetic circuit structure



(a) 复合结构 1



(b) 复合结构 2

图 4 复合式磁路结构示意图

Figure 4 Schematic diagram of composite magnetic circuit structure

能,故本课题组选择 Q235 钢作为磁流变液屈服应力测试装置中导磁回路、储液槽与导磁铁芯的材料。Q235 钢的 $B-H$ 曲线根据常用钢材磁特性曲线速查手册^[12]查得,如图 5 所示。

从图 6 可以看出,钕铁硼类永磁铁具备理想的线性退磁特性,且回复曲线与退磁曲线基本重合,其磁特性的稳定性较好。钕铁硼类永磁铁的剩磁 B_r 较高,最高可达 1.47 T,矫顽力 H_c 也很大,最大为 992 kA/m,最大磁能积为 397.9 N/m³,是目前磁性能最高的材料。所以,钕铁硼类永磁铁适合用于磁流变液测试装置。

磁流变液选择实验室自制体积分数为 58.9% 的磁流变液,其 $B-H$ 曲线如图 7 所示。为使磁流变液的

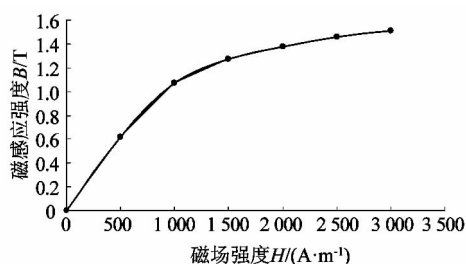
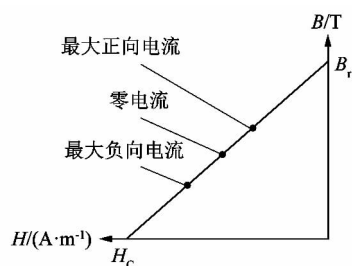
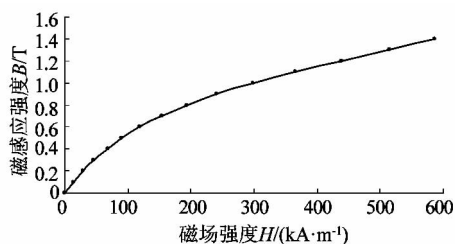
图5 Q235钢的 $B-H$ 曲线Figure 5 $B-H$ curve of Q235 steel

图6 钕铁硼类永磁体的退磁曲线

Figure 6 Demagnetization curves of Nd-Fe-B permanent magnets

屈服应力能达到最大值,磁流变液磁场强度应达到 55 kA/m,由 $B-H$ 曲线可知,此时磁流变液工作间隙中磁感应强度应达到 0.35 T。

图7 体积分数 58.9% 磁流变液的 $B-H$ 曲线Figure 7 $B-H$ curve of volume percentage 58.9% MRF

4 仿真与分析

文中的 3 种磁路模型所涉及的磁场包括永恒磁体的磁场和稳恒电流产生的磁场,属于静态磁场的范畴。由于本文中磁流变液屈服应力测试装置的结构具有对称性,故可选择二维静态磁场求解器对磁路进行求解分析。

4.1 基本假设

为了方便分析,在进行磁路有限元分析时作出如下假设:

1) 由于磁路材料选择的是 Q235 钢, Q235 钢的磁导率比空气的磁导率高很多,故可以忽略空气中的漏磁。

2) 假设磁流变液的性能良好,能在工作间隙内均匀分布,而不会发生沉降问题,即认为工作间隙内的磁流变液磁导率相同。

3) 假设 2 段磁轭结合面的加工精度和装配精度都很高,故忽略磁轭结合部分的磁阻。

4.2 模型简化

为了简化磁路模型,只需在软件中画出屈服应力测试装置的主体部分,主要包括磁源、储液槽、磁流变液和导磁回路这 4 部分,而把提拉块、滑轮组和砝码盘等提拉系统部分省略。

4.3 求解设置

网格划分是完成磁路模型离散化的关键环节,网格的数目和质量会决定仿真结果的精确性。Ansoft Maxwell 软件已经开发出自适应网格剖分的功能,而且可以通过自动加密网格来提高计算精度。文中设置的网格单元最大边长为 1 mm。

首先,磁流变液屈服应力测试装置各部件定义对应的材料属性,空气的相对磁导率一般取为恒定值 1,钕铁硼永磁铁 N35 的剩磁为 1.18 T,矫顽力为 868 kA/m,磁流变液和 Q235 钢的磁导率通过 $B-H$ 曲线输入。由于本文中仿真的磁路模型绝大部分磁通都在闭合磁路中传递,因此,为模型施加平行磁通边界条件,将磁力线限制在求解区域内部。最后对线圈部分施加电流激励后进行仿真求解。

4.4 仿真结果

在永磁式结构中,当永磁铁从 1 对增加为 2 对和 3 对时,磁感线基本上都能在装置内部形成磁回路;回路中的磁感线全部垂直穿过磁流变液的工作间隙;工作间隙的磁感线分布越来越密集。当永磁铁的数量增加到 3 对时,工作间隙的最大磁感应强度可达 0.35 T 以上;磁流变液工作间隙的磁感应强度要低于闭合回路中其他各部分的磁感应强度。磁感线分布图和磁感应强度图分别如图 8(a) 和 8(b) 所示。

根据图 9 结果所示,在电流励磁式磁路中,当电流以 0.5 A 的增幅稳步增长时,通过工作间隙的磁感线数目逐渐增多;磁感线基本上都能在装置内部形成磁回路,回路中的磁感线全部垂直穿过磁流变液的工作间隙,即磁场方向均能垂直于磁流变液的剪切方向。

由图 10 可知,当励磁线圈的电流增大到 2.0 A 时,磁流变液工作间隙的最大磁感应强度基本上可达 0.35 T,继续增大电流其磁感应强度仍可增大;磁流变液工作间隙的磁感应强度低于闭合回路中其他各部分的磁感应强度。

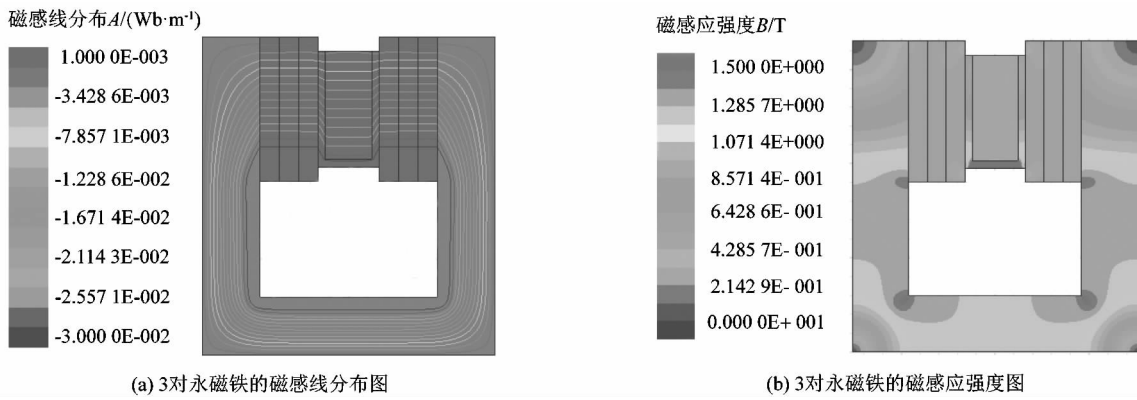


图8 3对永磁铁的云图
Figure 8 Cloud chart of three pairs of permanent magnet

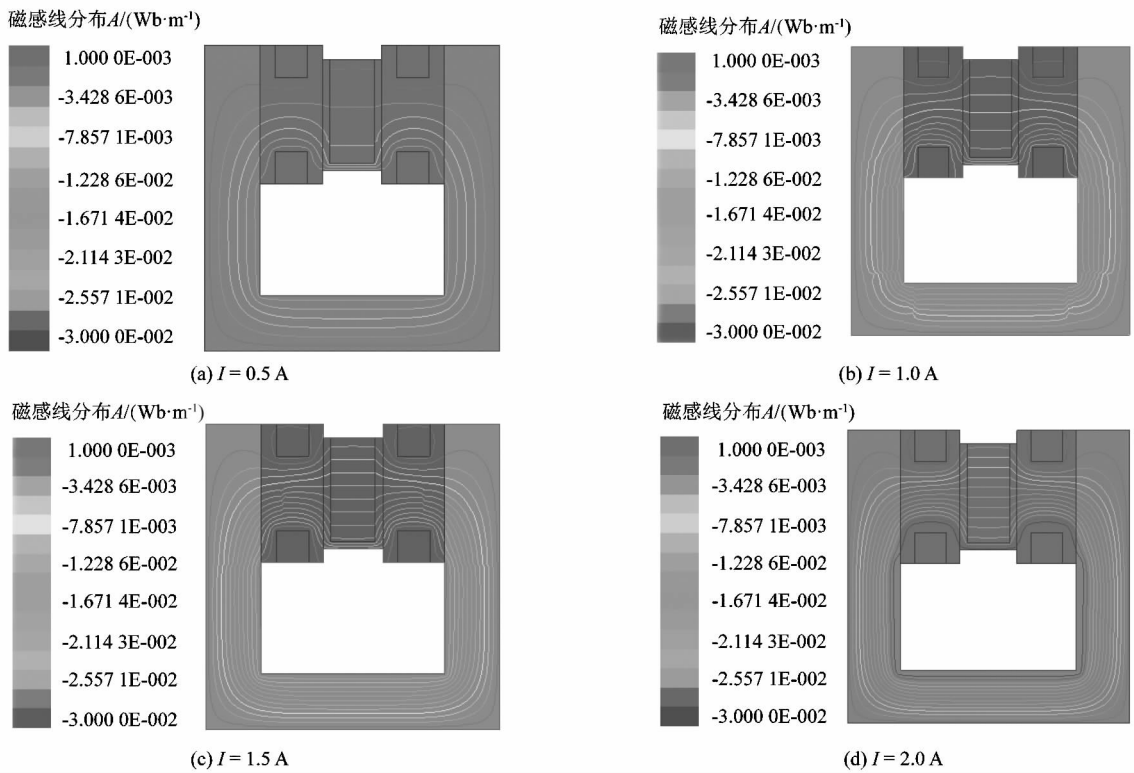
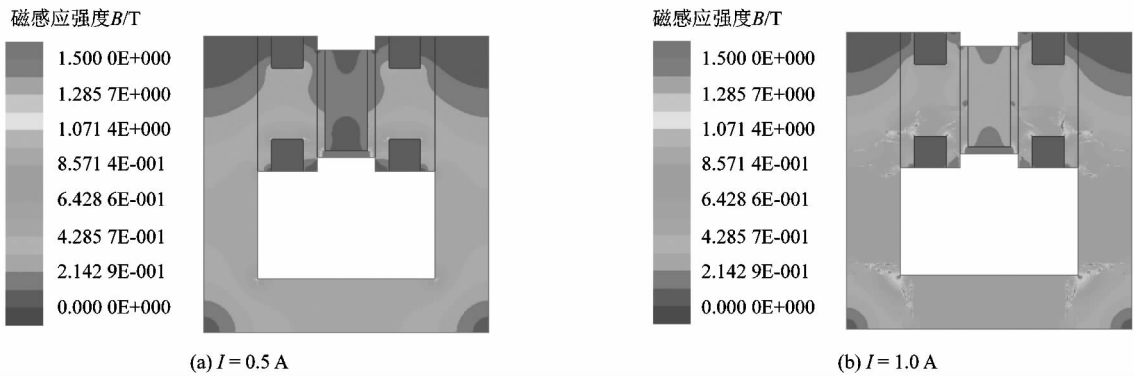


图9 电磁结构磁感线分布图
Figure 9 Magnetic induction line distribution of electromagnetic structure



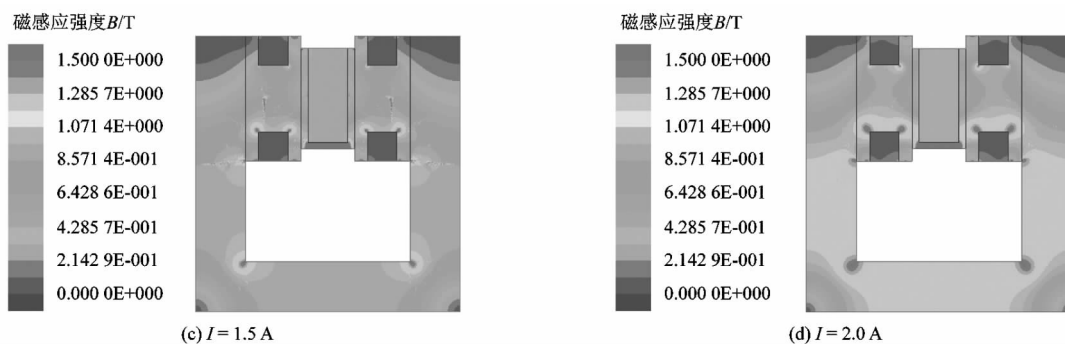


图 10 电磁结构磁通密度图

Figure 10 Magnetic flux density map of electromagnetic structure

对比图 11 至图 14 可以看出,复合结构 1(永磁铁外置、电磁铁内置的磁路结构)与复合结构 2(电磁铁外置、永磁铁内置的磁路结构)磁流变液工作间隙的磁感应强度变化趋势基本相同,磁感线的分布状况也几乎一致。

根据图 11 和图 13 结果所示,在复合结构中,当电流以 0.5 A 的增幅稳步增长时,通过工作间隙的磁感

线数目明显增多,表明此处磁感应强度也能实现持续稳定增长,且比同等电流下电磁结构的磁感线数目要多;磁感线基本上都能在装置内部形成磁回路,只有极少数在储液槽穿出,证明测试装置依然只是在磁流变液表面发生了漏磁现象;磁感线全部垂直穿过磁流变液的工作间隙,即磁场方向均能垂直于磁流变液的剪切方向。

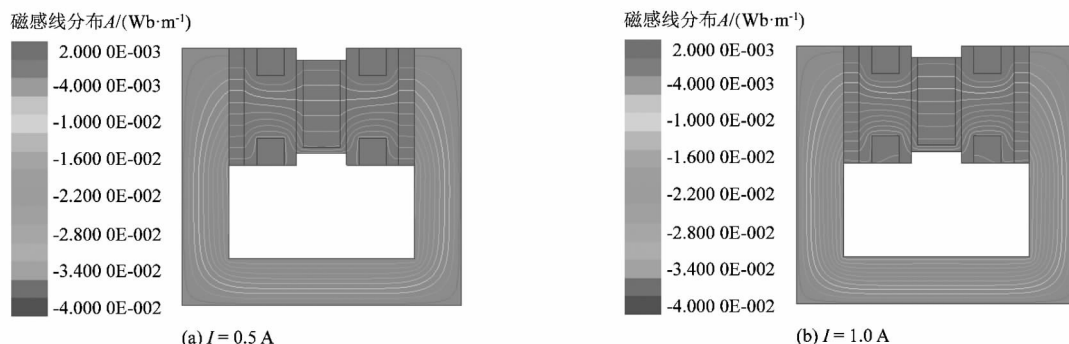


图 11 复合结构 1 磁感线分布图

Figure 11 Magnetic induction line distribution of composite structure 1

从图 12 和 14 可以看出,当励磁线圈的电流增大到 1.0 A 时,磁流变液工作间隙的最大磁感应强度可达到 0.35 T,继续增大电流其磁感应强度仍可增大;磁流变

液工作间隙的磁感应强度要低于闭合回路中其他各部分的磁感应强度;环形磁路结构内部尖角的存在容易发生聚磁现象,而磁通量在外部尖角处的通过率较小。

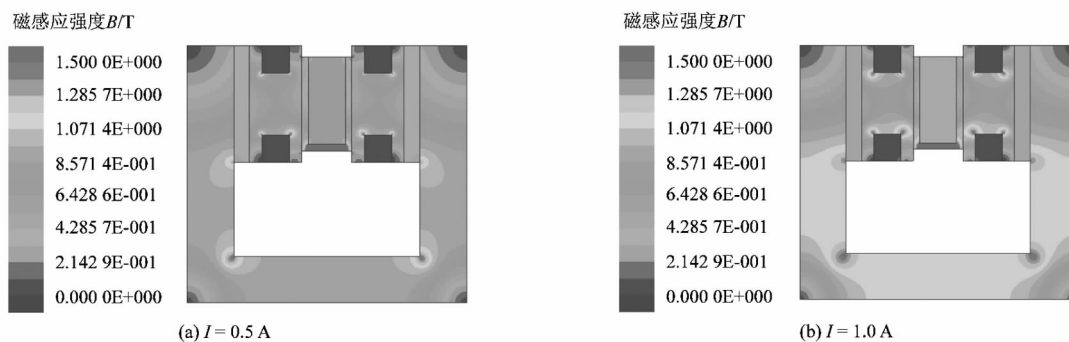


图 12 复合结构 1 磁通密度图

Figure 12 Magnetic flux density map of composite structure 1

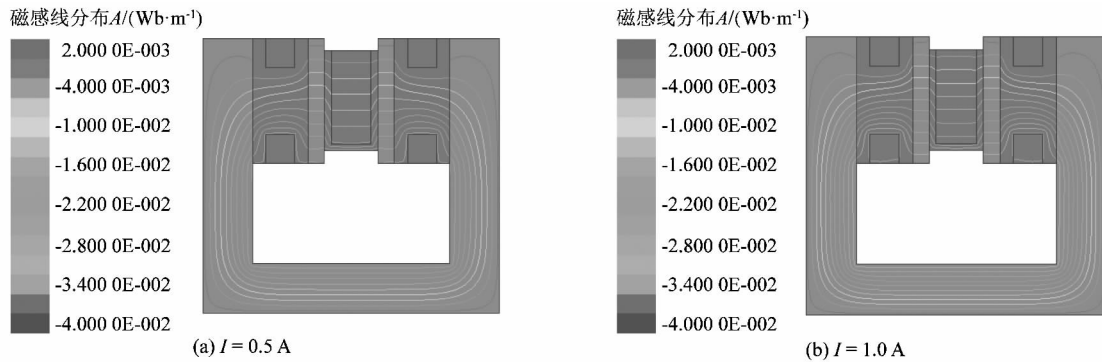


图 13 复合结构 2 磁感线分布图

Figure 13 Magnetic induction line distribution of composite structure 2

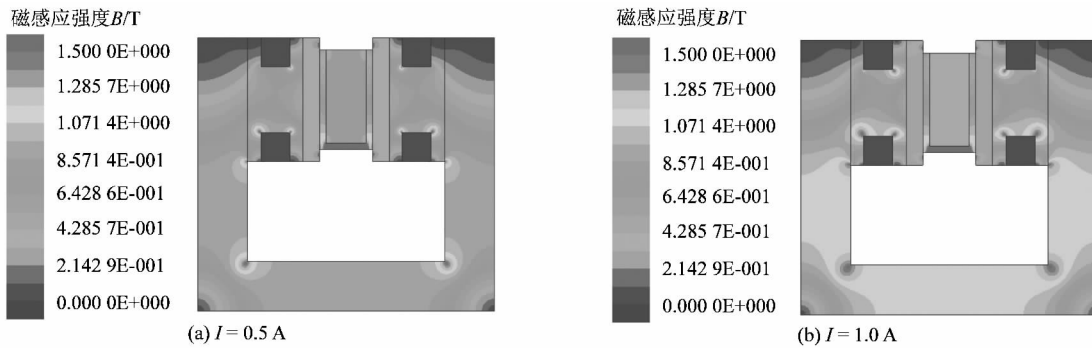


图 14 复合结构 2 磁通密度图

Figure 14 Magnetic flux density map of composite structure 2

5 结论

基于提拉法的磁流变液屈服应力测试装置特点和原理,提出了永磁式磁路、电流励磁式磁路和复合式磁路 3 种方案,确定磁路各部分的材料和一般尺寸参数。建立 3 种磁路模型,并进行磁场仿真,通过分析比较得出以下结论:

1) 与电流励磁式相比,复合式磁路更加高效节能,同时由于永磁体磁场的存在,磁流变液不易于沉降。复合式磁路为最优磁路设计方案。

2) 复合式结构中,永磁铁和电磁铁安放位置的不同对磁流变液工作间隙中磁场的影响较小。

3) 磁流变液屈服应力测试装置的加工材料有待进一步优化,可将储液槽底部的材料确定为导磁率低或非导磁的材料。

4) 磁流变液屈服应力测试装置的结构形式有待进一步优化,应减少聚磁尖角的存在,提高闭合回路中磁通量的传递率。

参考文献:

[1] 郑军,曹兴进.磁流变液特性及其装置在工程领域中的应用[J].现代制造工程,2005(6):6-8.
 [2] 田柳滨,蔡世波,鲍官军,等.磁流变液柔顺关节的设计和运动学

建模研究[J].机电工程,2017,34(5):432-437.
 [3] 刘晓梅,李洪友,黄宜坚.磁流变阻尼器的分数阶 Bingham 模型研究[J].机电工程,2015,32(3):338-342.
 [4] JOLLY M R, BENDER J W, CARLSON J D. Properties and applications of commercial magnetorheological fluids[J]. Journal of intelligent material system and structures,1998,10(1):5-13.
 [5] HOUSNER G W, BERGMAN L A, CAUGHEY T K, et al. Structural control: past, present and future [J]. Journal of engineering mechanics,1997,123(9):897-971.
 [6] 田静,倪卫国,祝世兴.剪切闸式磁流变减振器磁路分析与仿真[J].液压与气动,2015,12(1):45-48.
 [7] 刘苑辉,汪建晓,周照耀.基于 ANSYS 的剪切式磁流变液阻尼器磁路的有限元分析及相关研究[J].佛山科学技术学院学报(自然科学版),2011,29(1):63-69.
 [8] 雷阳,李友荣,吕晶.永磁型磁流变液极限转矩联轴器的设计分析[J].机械科学与技术,2012,31(2):295-299.
 [9] 潘胜.磁流变液的屈服应力与温度效应[J].功能材料,1997,28(2):264-266.
 [10] 唐兴伦,范群波,张朝晖. ANSYS 工程应用教程-热与电磁学篇[M].北京:中国铁道出版社,2003.
 [11] 龚曙光,边炳传.有限元基本理论及应用[M].武汉:华中科技大学出版社,2013.
 [12] 兵器工业无损检测人员技术资格鉴定考核委员会.常用钢材磁性曲线速查手册[M].北京:机械工业出版社,2003.