

# 数字显微全息应用于磁流变液微观结构与机理的 三维可视化研究

王秋宽 杨 鸿 李光勇 杨 岩

(重庆理工大学, 汽车零部件先进制造技术教育部重点实验室, 重庆 400054)

**摘要** 将数字显微全息(DMH)技术应用于磁流变液微观结构与机理的观测,提出了全局灰度梯度法(OS)和最小二乘方滤波器(CLS)技术来提高铁磁性微粒子的焦平面定位精度,利用校准靶面置于磁流变液测量域中方式获得铁磁性微粒子的真实放大倍率。搭建了用于测试磁流变液特性的数字显微全息测量系统,同时利用以上处理方法,得到了磁流变液在无磁场下其铁磁性微粒子和有磁场下其微观结构的三维空间分布,实时观测了磁流变液微观结构的变换过程,获得了磁流变液在外加磁场下的成链结构、链化速度和响应时间,验证了磁流变液的响应时间为毫秒量级,与电子显微镜观测实验结果进行对比,证明了数字显微全息可以高效、简便、实时地测量磁流变液的流变特性。

**关键词** 全息;微观结构;三维可视化;磁流变液;响应时间

**中图分类号** O438.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0409002

## Three-Dimensional Visualization of the Micro-Structure and Mechanism of Magnetorheological Fluids Using Digital Micro-Holography

Wang Qiukuan Yang Hong Li Guangyong Yang Yan

(Key Laboratory of Advanced Manufacturing Technology for Automobile Parts, Ministry of Education, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China)

**Abstract** A digital micro-holographic (DMH) system is designed for the observation of the micro-structure and mechanism of magneto rheological (MR) fluids. To obtain the actual magnification of ferromagnetism micro-particles in the MR fluids, the experimental method using calibration target is employed. The overall-sharpness (OS) method and the constrained least squares (CLS) filter are introduced to enhance the precision of focal plane of ferromagnetism micro-particles determination in digital holography. Based on the digital holography system and these numerical methods, the three-dimensional (3D) distribution of ferromagnetism micro-particles in MR fluids without an applied magnetic field and the micro-structure of MR fluids with an applied magnetic field are investigated. The transformation process of micro-structure of MR fluids under an applied magnetic field is monitored in real-time, the chaining structure, chaining speed and responding time of MR effect are obtained, and the responding time of MR fluids to be millisecond level is verified. The experimental results of MR fluids measured by DMH are contrasted with electron microscope, which indicates DMH is a high-efficiency, simple and real-time measuring system for measurement of behaviors of MR fluids.

**Key words** holography; micro-structure; three-dimensional visualization; magneto rheological fluids; responding time

**OCIS codes** 090.1995; 100.2000; 100.2960; 180.6900

收稿日期: 2013-10-15; 收到修改稿日期: 2013-12-02

基金项目: 国家自然科学基金(11272368)、重庆理工大学研究生创新基金(YCX2012307)

作者简介: 王秋宽(1986—),男,硕士研究生,主要从事数字显微全息方面的研究。E-mail: wqiukuan@163.com

导师简介: 杨 岩(1975—),男,教授,硕士生导师,主要从事数字全息方面的研究。

E-mail: yangyan@cqut.edu.cn(通信联系人)

# 1 引 言

磁流(MR)变液是一种在汽车、建筑、机械、航空、医疗等诸多领域具有广泛应用前景的智能材料。它是由可磁极化的固体铁磁性颗粒在基液中形成的悬浮液,其流变特性可由外加磁场连续控制<sup>[1]</sup>。当不加磁场时,磁流变液表现出类似牛顿流体的行为;当外加磁场时,磁流变液将产生磁流变效应,其流动表现出 Bingham 塑性体行为,具有粘性和塑性特性<sup>[2]</sup>,这将直接影响磁流变液的力学性能,改变其剪切屈服应力<sup>[3]</sup>。目前,对磁流变液微观结构及流变过程的观测实验基本都是利用普通显微方法进行,运用扫描电子显微镜和透射电子显微镜等先进设备也只是对磁流变液的静态微观形状和静磁特性进行研究,几乎所有对磁流变液微观结构的研究都只停留在二维或者静态三维阶段<sup>[4-7]</sup>,不能够观测到磁流变液中铁磁性微粒子从粒状到链状的实际链化速度、响应时间和真实的三维分布及变换过程<sup>[8-12]</sup>。

20 世纪 40 年代末,Gabor<sup>[13]</sup>提出了全息技术。随着计算机技术的发展,Goodman 等<sup>[14]</sup>提出了数字全息(DH)技术,数字全息由于效率高、操作简单并且能实时连续的采集目标的三维空间信息,可以被广泛应用于粒子场、温度场、应力应变场和振动场的测量以及医学检测等诸多领域<sup>[15-23]</sup>。伴随着计算机技术、数字图像采集技术以及数字信号处理技术的进步,数字显微全息(DMH)技术应运而生。该技术克服了普通显微镜焦深小的缺点,它为使用数值化方法对目标不同层面进行精确定焦扫描提供了可能性,所以能广泛应用于微流场、喷雾场的测量<sup>[24-25]</sup>。

本文利用数字显微全息技术,辅以最小二乘方滤波器(CLS)和全局灰度梯度法(OS)分别对磁流变液有无外加磁场情况下的三维微观结构进行了研究。观测了磁流变液三维微观结构的实时演变过程,测量了磁流变液在外加磁场下的成链结构、链化速度和响应时间,获得了磁流变液响应时间为几毫秒,并与电子显微镜观测实验结果进行对比,最终表明数字显微全息技术可以有效地用于磁流变液微观结构变化的测量。

# 2 原 理

## 2.1 磁流变液原理及动力学模型

磁流变效应,指磁流变液在施加磁场后,由粘性流态转变为固液混合态或者类固态,并且剪切屈服应力明显增强。从微观的角度解释是由于在外加磁场作用下,磁流变液中铁磁性微粒子被外加磁场磁

极化,微粒子沿着磁感线方向排列成链柱状,磁流变液在两磁极间形成的链柱状结构限制了磁流变液的正常流动<sup>[26]</sup>,如图 1 所示。

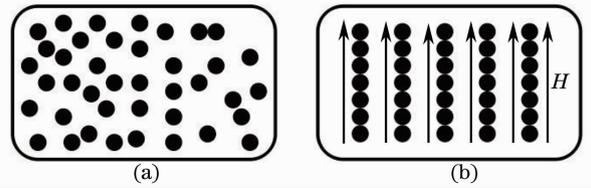


图 1 磁流变液中铁磁性微粒子分布示意图。

(a) 无磁场下粒子随机分布;(b) 有磁场下粒子成链分布  
Fig. 1 Schematic of ferromagnetism micro-particles in MR fluids. (a) Random distribution of particles without magnetic field; (b) chains distribution of particles with magnetic field

响应时间快是磁流变液作为智能材料的重要性能指标之一。磁流变液中铁磁性微粒子的受力和运动特点对研究磁流变液的宏观力学特性至关重要。李海涛等<sup>[27-28]</sup>基于磁偶极子理论,建立了铁磁性微粒子的运动动力学模型,分析了微粒子在外加磁场作用下所受的力,主要包括磁力、微粒子间的排斥力和基液的粘性阻力,最终通过模拟参数及相应公式,推导出了磁流变液的响应时间为毫秒量级。

## 2.2 数字全息基本原理

数字全息的步骤包括空间信息记录和全息图重建,记录过程如图 2 所示。

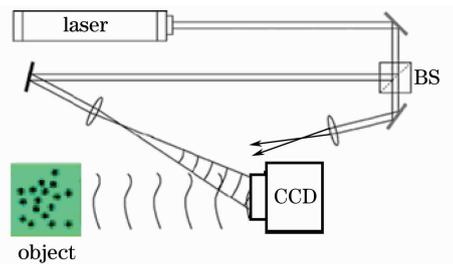


图 2 离轴数字全息记录

Fig. 2 Optical setup for off-axis digital hologram recording

使用离轴数字显微全息对磁流变液微观结构进行观测,如图 3 所示。

使用 He-Ne 激光器作为激光源,利用分光棱镜(BS)将激光分为两束,两束激光分别穿过扩束镜成为平行激光柱,其中一条光路透射测量域,作为物光穿过显微镜物镜和分光棱镜到达 CCD 芯片,另一条光路经反射镜和分光棱镜直接到达 CCD 芯片,作为参考光。物光与参考光相互重叠在 CCD 芯片上形成全息图,然后在计算机上存储和重建。光波传播过程可以用 Fresnel-Kirchhoff 积分表示<sup>[29]</sup>:

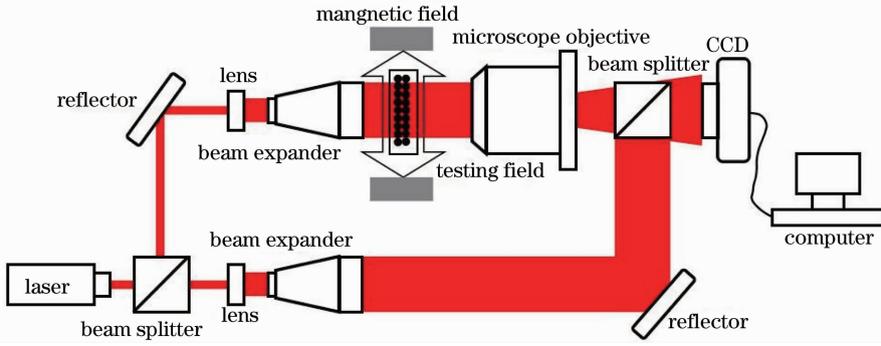


图3 离轴数字显微全息测量磁流变液

Fig. 3 Optical set-up of off-axis digital micro-holography for MR fluids

$$\Gamma(\xi', \eta') = \frac{i}{\lambda} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} h(x, y) E_R(x, y) \frac{\exp[-i(2\pi/\lambda)\rho']}{\rho'} dx dy, \quad (1)$$

式中

$$\rho' = \sqrt{(x - \xi')^2 + (y - \eta')^2 + d^2}, \quad (2)$$

$\Gamma(\xi', \eta')$  是图像复振幅, 包含振幅和相位,  $E_R(x, y)$  是参考光波域,  $h(x, y)$  是全息图函数,  $\rho'$  是全息平面上点与重建平面上点的距离,  $d$  是传播距离, 也就是目标平面和全息平面的距离,  $\lambda$  是激光的波长。对于数字显微全息而言,  $d' = M' \cdot d$  取代了  $d$ ,  $M'$  是实际的放大倍率<sup>[29]</sup>。

重建图像  $\Gamma(\xi, \eta)$  可以用卷积法或者菲涅耳法计算获得<sup>[29]</sup>。菲涅耳法数值重建全息图, 必须满足以下采样条件<sup>[30]</sup>:

$$\frac{L_0}{N} \leq \frac{\lambda \sqrt{d'^2 + 2L_0^2}}{2L_0}, \quad (3)$$

$L_0$  是实际的计算区域,  $d'$  是衍射距离,  $N$  是取样点数。从(3)式可以看出, 当衍射距离较小时, 取样间隔将是激光波长的数量级倍数。由于实际计算区域远远大于激光波长, 大量的取样点数将严格限制计算的速度。但是相对于菲涅耳法而言, 卷积法能够得到高分辨率的重建图像, 并且图像的尺寸和质量不会随着重建距离的变化而变化, 故采用卷积法对全息图进行数值重建<sup>[29]</sup>:

$$\Gamma(\xi, \eta) = \mathcal{F}^{-1} \{ \mathcal{F}[h(x, y) \cdot E_R^*(x, y)] \cdot \mathcal{F}[g(\xi, \eta, x, y)] \}, \quad (4)$$

式中

$$g(\xi, \eta, x, y) = \frac{i}{\lambda} \frac{\exp[-i(2\pi/\lambda) \sqrt{d^2 + (x - \xi)^2 + (y - \eta)^2}]}{\sqrt{d^2 + (x - \xi)^2 + (y - \eta)^2}}, \quad (5)$$

$\Gamma(\xi, \eta)$  是重建图像的复振幅,  $d$  是重建距离,  $\mathcal{F}^{-1}$  和  $\mathcal{F}$  分别是逆傅里叶变换和傅里叶变换, 由于参考光波  $E_R^*(x, y)$  是平面波, 用常数 1 表示。

### 2.3 粒子焦平面的高精度定位

如何提高目标焦平面的定位精度是数字全息技术的一个重要问题<sup>[31-34]</sup>, OS 对铁磁性微粒子焦平面进行定位, 具有精度高、速度快的特点。OS 可表示为

$$F_{OS} = \frac{1}{N_1} \sum_i^{N_1} F_{1i}(x, y) - \frac{1}{N_2 + N_3} \left[ \sum_i^{N_2} F_{2i}(x, y) + \sum_i^{N_3} F_{3i}(x, y) \right]. \quad (6)$$

如图4所示,  $N_1$ 、 $N_2$  和  $N_3$  分别表示微粒子背

景区域, 微粒子边界区域和微粒子内部区域的像素点数。 $F_{1i}(x, y)$ 、 $F_{2i}(x, y)$  和  $F_{3i}(x, y)$  分别表示上述区域内每个像素点的灰度值。

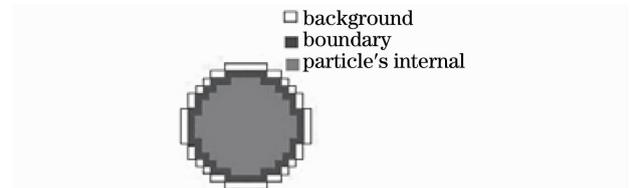


图4 微粒子重建图

Fig. 4 Reconstruction image of micro-particle

不同的物距, 微粒子全息图的重建类似于切片, 如图5所示。对全息图进行重建时, 当重建距离远离微粒子焦平面时, 微粒子重建图的边缘轮廓将变得模

糊不清,定焦微粒子的灰度变化比散焦微粒子的灰度变化更加明显,所以可以使用全局灰度梯度法计算出灰度最大值来获取微粒子的焦平面位置。图 6 展示了不同直径微粒子重建图像的全局灰度梯度随物距变化的曲线,其中  $S_0$  为全局灰度值,  $d$  为重建距离,  $D$  为粒子直径。分析可知,微粒子尺寸越大,其全局灰度梯度曲线的变化趋势越缓慢,并且聚焦误差越大。微粒子尺寸越小,其全局灰度梯度曲线的变化趋势越陡峭,因此微粒子在小尺寸情况下,全局灰度梯度法能够对微粒子的焦平面进行精确定位。从(6)式也可看出,使用全局灰度梯度法计算微粒子灰度梯度时参与计算的像素点数也较多,基本上包含了微粒子的全部特征,因此也就克服了小粒子图像不清晰的缺点。对于较大尺寸的微粒子而言,由于微粒子直径越大而导致焦深越大,微粒子的全局灰度梯度曲线的峰值变化并不明显,也就很难获得微粒子的焦平面位置。基于不同物距下不同直径微粒子的模拟全息图可知,全局灰度梯度法是一种精良的判焦方法,特别适用于直径小于  $37\ \mu\text{m}$  的微粒子。

为了进一步精确锁定目标焦平面,引入了最小二乘方滤波器技术,最小二乘方滤波器能够有效地

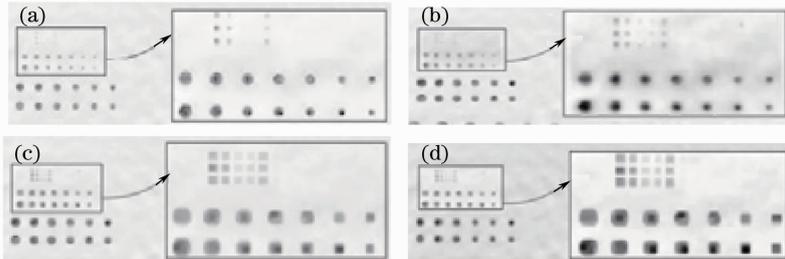


图 7 不同滤波器对圆点目标进行重建。(a) 均值滤波;(b) 最小值滤波;(c) 维纳滤波;(d) 最小二乘方滤波

Fig. 7 Reconstruction images of dot target with different filters. (a) Average filtering; (b) min filtering; (c) Wiener filtering; (d) CLS filtering

### 3 实 验

#### 3.1 实验设置

给定磁流变液浓度和连续恒定磁场强度条件下,记录磁流变液全息图所需要的实验装置如图 8 所示。实验参数为: He-Ne 激光器波长  $\lambda = 632.8\ \text{nm}$ , CCD 相机分辨率为  $1280\ \text{pixel} \times 1024\ \text{pixel}$ , CCD 芯片的像素点尺寸为  $5.2\ \mu\text{m} \times 5.2\ \mu\text{m}$ ,最大幅面下帧率为  $14\ \text{frame/s}$ ,显微镜物镜放大倍率  $M = 40$ ,磁流变液浓度(体积分数)为  $10\%$ ,磁场强度为  $460\ \text{GS}$ 。

如图 3 所示,激光穿过显微镜物镜后并不可能

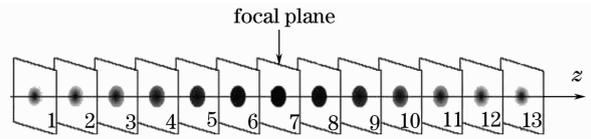


图 5 微粒子全息图在不同位置重建  
Fig. 5 Reconstruction images of micro-particle hologram at different distances

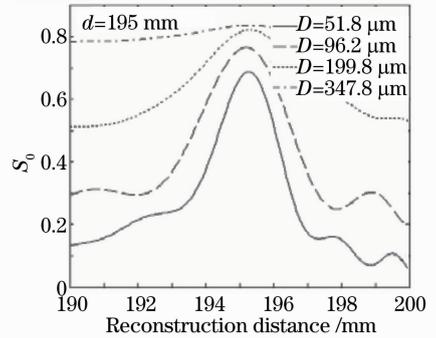


图 6 微粒子的全局灰度梯度曲线

Fig. 6 Overall-sharpness curves of micro-particle

消除噪声对微粒子焦平面定位的影响。最小二乘方滤波器与其他滤波器的实验对比结果,如图 7 所示。实验结果证明最小二乘方滤波器能够有效提高重建图像的质量和微粒子焦平面的定位精度。

得到绝对的平行光,所以铁磁性微粒子的放大倍率随着微粒子与 CCD 相机距离的增加而增加,而这个传播距离不可能精确测量,因此不能获得微粒子的真实放大倍率  $M'$ 。即使能够获取重建距离  $d'$  和使用全局灰度梯度法对微粒子在焦平面进行重建,也不能获取微粒子的实际重建距离  $d$  和具体尺寸,更不能对磁流变液的链化速度和响应时间进行正确分析。为了解决此问题,将加工有标准刻度线的校准靶面(最小刻度  $50\ \mu\text{m}$ )置于磁流变液测量域中,通过对比重建图像中刻度线与标准靶面刻度线间的距离,计算出正确的放大倍率值  $M'$ ,如图 8(b)所示。

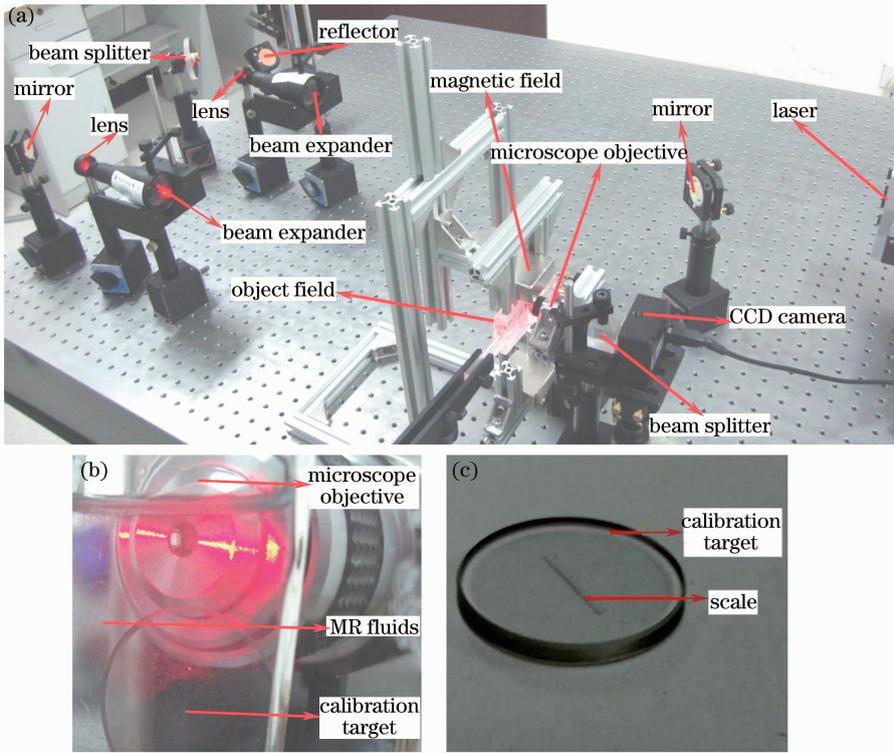


图 8 数字显微全息测量磁流变液实验系统。(a) 数字显微全息实验装置；(b) 实验设置局部图；(c) 校准靶面

Fig. 8 Experimental system of measurement of MR fluids by digital micro-holography.

(a) Experimental devices of digital micro-holography; (b) partial view of experimental setup; (c) calibration target

### 3.2 数字显微全息实验

磁流变液测量域中校准靶面的全息图和重建图,如图 9 所示。分析重建图 9(b),通过对像素点数  $N$  和像素点尺寸  $\Delta x$  的计算获得两刻度线间的距离  $X = N \cdot \Delta x = 1030 \mu\text{m}$ ,校准靶面刻度间实际距离为  $50 \mu\text{m}$ ,故真实的放大倍率  $M' = 1030 \mu\text{m} / 50 \mu\text{m} = 20.6$ ,实际的重建距离  $d = d' / M' = 1.55 \text{ mm}$ 。

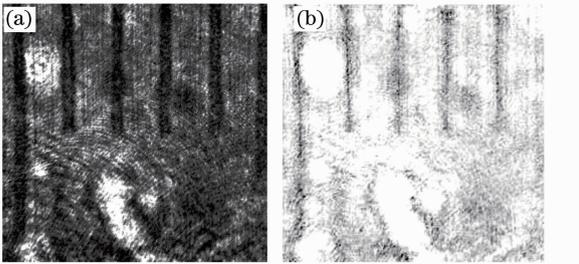


图 9 校准靶面的全息图和重建图(重建距离为 32 mm)。(a) 全息图；(b) 重建图

Fig. 9 Hologram and reconstruction image of calibration target (focal plane is 32 mm). (a) Hologram; (b) reconstruction image

获得显微镜物镜应用于磁流变液测量域的实际放大倍率后,将显微镜物镜利用三维微距平台垂直上移,采集不包含校准靶面的磁流变液区域图像,这

样捕获的磁流变液全息图就能够获得和校准靶面全息图同样的放大倍率。图 10 展示了磁流变液中铁磁性微粒子在无外加磁场时随机分布和有外加磁场时成链柱状分布的全息图。

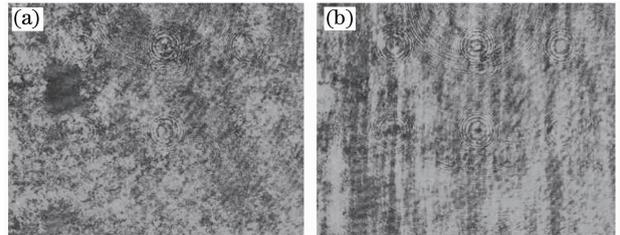


图 10 无磁场和有磁场下磁流变液全息图。

(a) 无磁场；(b) 有磁场

Fig. 10 Holograms of MR fluids MR fluids without and with an applied magnetic field. (a) Without magnetic field; (b) with magnetic field

通过对图 11 中重建图放大图的分析,获得铁磁性微粒子占有  $20 \sim 30$  pixel 点,且像素点尺寸  $\Delta x = 5.2 \mu\text{m}$ ,近似认为其为球体,计算出微粒子放大后的直径为  $104 \sim 156 \mu\text{m}$ ,由于显微镜物镜实际的放大倍率为  $M' = 20.6$ ,故大部分铁磁性微粒子的实际直径在  $5.05 \sim 7.57 \mu\text{m}$  之间,该数据与产品提供商给出数据相吻合。

数字显微全息可以测量磁流变液的三维空间信

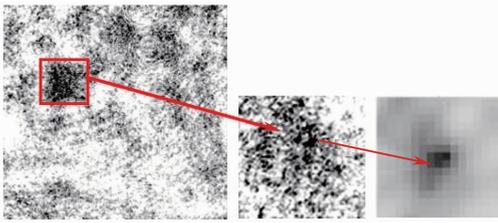


图 11 无磁场下磁流变液重建图和放大图

Fig. 11 Reconstruction and magnified image of MR fluids without applied magnetic field

息,即可以获得磁流变液测量域中所有铁磁性微粒子中心的三维坐标。通过对图 10 在不同的物距重建,可以还原磁流变液测量域中不同位置铁磁性微粒子的分布,其中重建图 11 和 12 分别表示磁流变液测量域其中一位置的铁磁性微粒子在无磁场和有磁场下的分布。通过对重建图 11 和重建图 12 的分析,选取合适的阈值条件,得到微粒子分布的二值图像。在二值图像中,运用基本的图形处理技术,即可

获取微粒子中心的  $x, y$  轴坐标,然后基于全局灰度梯度法和最小二乘方滤波器技术,在不同的重建距离定位不同微粒子的焦平面位置,获取微粒子中心的  $z$  轴坐标,即每个微粒子的  $z$  轴坐标就是其重建图像的重建距离,最终在计算机上可以模拟出微粒子在磁流变液测量域中的三维空间分布。磁流变液测量域中铁磁性微粒子在无磁场和有磁场下的三维空间分布如图 13 所示。

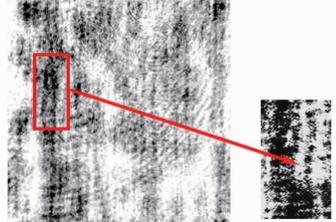


图 12 有磁场下磁流变液重建图和放大图

Fig. 12 Reconstruction and magnified image of MR fluids with applied magnetic field

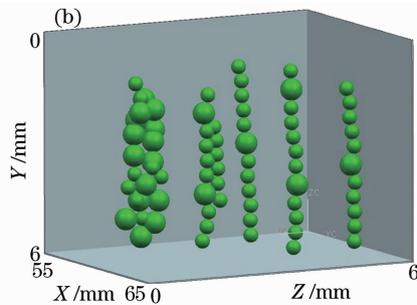
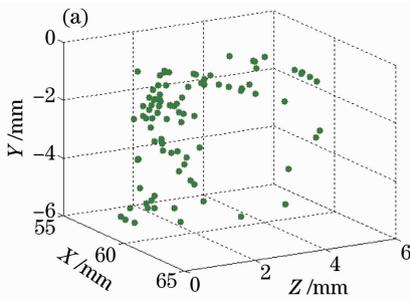


图 13 无磁场和有磁场下磁流变液中铁磁性微粒子三维空间分布示意图。(a) 无磁场;(b) 有磁场

Fig. 13 Three-dimensional distributions of ferromagnetism micro-particles in MR fluids without and with an applied magnetic field. (a) Without magnetic field; (b) with magnetic field

通过采集不同时刻的数字显微全息图,进而获得不同时刻的铁磁性微粒子空间分布,可以得到磁流变液中铁磁性微粒子在磁场作用下的空间位移与速度。为了研究铁磁性微粒子对磁场强度的响应,即沿磁场方向运动的速度和位移,由于实验中施加的磁场是沿  $y$  轴方向,即微粒子的主运动沿  $y$  轴进行,所以只需测量微粒子在  $x-y$  平面内的  $y$  向位移即可。当对磁流变液施加磁场时,磁流变液在外加

磁场作用下的变换过程被 CCD 相机实时的连续捕捉编码,其重建图像如图 14 所示。从图中分析可知,铁磁性微粒子的  $x$  轴坐标变化量并不明显,但是  $y$  轴坐标变化量相对明显,证明了铁磁性微粒子运动、链化都是沿着磁感线方向。同时这些连续的重建图像也表明了磁流变液在磁场中的链化速度、响应时间和成链结构等。

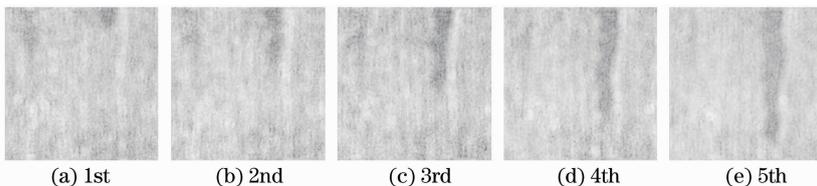


图 14 重建图像(磁场作用下不同时刻磁流变液成链结构)

Fig. 14 Reconstruction images (chaining structure of MR fluids under an applied magnetic field in different time)

磁流变液的响应时间,其实质就是磁流变液中铁磁性微粒子对外加磁场的敏感程度。响应时间越小,响应速度越快,敏感程度越高,磁流变液性能越优良。根据实验所使用的采集设备,通过像素点数  $N$  和像素点尺寸  $\Delta x$  可以获得磁流变液在施加磁场时的位移  $N \cdot \Delta x$ ,位移与真实放大倍率  $M'$  的比值,就是链实际的运动距离  $Y$ ,两重建图时间差参数  $t = 1/14$  s 已知,故可求得链化速度  $v(t)$ 。

对图 14 重建像中成链结构的同一位置进行坐标标定,CCD 芯片像素点尺寸  $\Delta x = \Delta y = 5.2 \mu\text{m}$ ,显微镜物镜实际的放大倍率  $M' = 20.6$ ,图 14(a)~(e)不同时间间隔图像中链运动通过的像素点数分别用  $N_1, N_2, N_4, N_5$  表示,  $N_{12} = N_1 - N_2 = 249$ ;  $N_{23} = N_2 - N_3 = 173$ ;  $N_{34} = N_3 - N_4 = 163$ ,  $N_{45} = N_4 - N_5 = 182$ ,则链的位移可用如下函数表示:

$$Y = N \cdot \Delta x / M', \quad (7)$$

计算可得  $Y_{12} = 62.85 \mu\text{m}$ ,  $Y_{23} = 43.67 \mu\text{m}$ ,  $Y_{34} = 41.15 \mu\text{m}$ ,  $Y_{45} = 45.94 \mu\text{m}$ ,CCD 相机每秒钟连续捕捉 14 张全息图,故每张重建图像的时间间隔也为  $t = 1/14$  s,故链化速度可表示为

$$v(t) = Y/t, \quad (8)$$

磁流变液在外加磁场下的链化速度如表 1 所示。

表 1 磁流变液沿着磁感线的链化速度

Table 1 Chaining speed of MR fluids along the magnetic induction line

Parameter	Value			
Interval	$N_1 - N_2$	$N_2 - N_3$	$N_3 - N_4$	$N_4 - N_5$
$v / (\mu\text{m/s})$	879.96	611.38	576.04	643.18
$\bar{v} / (\mu\text{m/s})$	677.64			

CCD 芯片在  $y$  轴方向的最大距离为  $Y_{\max} = N \times \Delta x = 1024 \times 5.2 \mu\text{m} = 5324.8 \mu\text{m}$ ,取运动时间  $t = 1/20$  s,由(8)式计算可得,链的位移分别为  $Y'_{12} = 44.00 \mu\text{m}$ ,  $Y'_{23} = 30.57 \mu\text{m}$ ,  $Y'_{34} = 28.80 \mu\text{m}$ ,  $Y'_{45} = 32.16 \mu\text{m}$ ,则链运动通过的像素点数  $N'$  分别为:  $N'_{12} = Y'_{12} / \Delta x = 8.46$ ,  $N'_{23} = Y'_{23} / \Delta x = 5.88$ ,  $N'_{34} = Y'_{34} / \Delta x = 5.54$ ,  $N'_{45} = Y'_{45} / \Delta x = 6.18$ 。假设链运动一个像素点,就理解为磁流变液在外加磁场下开始响应,所以磁流变液的响应时间可表示为

$$\Delta t = t / N', \quad (9)$$

磁流变液在外加磁场下的响应时间如表 2 所示。

实验所使用的 CCD 芯片像素点分辨率最高精度  $\Delta x = 5.2 \mu\text{m}$ ,而  $\Delta x / M' = 5.2 / 20.6 = 252.2$  nm,以此作为最低位移量来判断铁磁性微粒子是否在磁场作用下移动,精度已经足够。测得了给定磁流变

液浓度和连续恒定磁场强度条件下,磁流变液响应时间为 7.88 ms,属于磁流变液的理论响应时间范畴。

表 2 外加磁场下磁流变液的响应时间

Table 2 Responding time of MR fluids under an applied magnetic field

Parameter	Value			
Interval	$N_1 - N_2$	$N_2 - N_3$	$N_3 - N_4$	$N_4 - N_5$
$\Delta t / \text{ms}$	5.91	8.50	9.03	8.09
$\bar{\Delta t} / \text{ms}$	7.88			

### 3.3 电子显微镜对比实验

为了对比数字显微全息测量结果,利用电子显微镜对磁流变液进行了二维观测,分别获得了磁流变液在无磁场时的二维微观结构和有磁场时的成链结构及二维分布,得到了磁流变液的链化速度  $v(t)$  及响应时间  $\Delta t$ 。

实验设备及参数主要包括:OLYMPUS 变焦体视显微镜(SZ61)、放大倍率( $M = 134$ )、数码成像机 MD20(像素点数:1600 pixel  $\times$  1200 pixel,像素点尺寸:4.2  $\mu\text{m} \times$  4.2  $\mu\text{m}$ ,10 frame/s)、磁铁(磁场强度:240 GS)、夹具、载玻片和盖玻片。电子显微镜观测磁流变液的实验系统如图 15 所示。

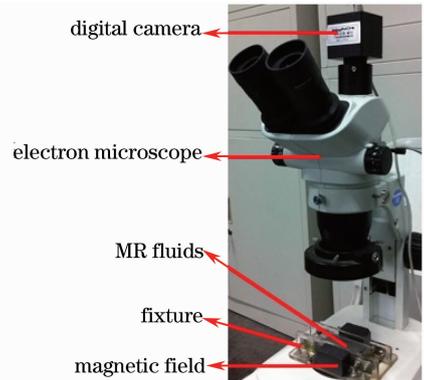


图 15 电子显微镜观测磁流变液实验系统

Fig. 15 Experimental system of observation of MR fluids by electron microscope

调节电子显微镜物镜与观测样本的距离,使其焦点落在样本平面。将同一浓度的磁流变液置于载玻片与盖玻片之间并且固定在夹具上,拍摄磁流变液在无磁场时随机分布的静态图片,如图 16 所示。

对磁流变液施加磁场,连续拍摄外加磁场时成链的图片,如图 17 所示。选取 5 张连续拍摄的图片,每张图片选取如图所示的相同运动链,时间差  $t = 1/10$  s。使用电子显微镜观测磁流变液微观结构实验中,磁流变液的链化速度  $v(t)$  和响应时间  $\Delta t$

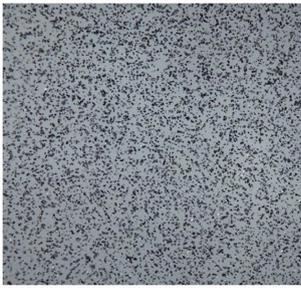


图 16 电子显微镜观测磁流变液无磁场时  
微观结构及分布

Fig. 16 Micro-structure and distribution of MR fluids without applied magnetic field observed by electron microscope

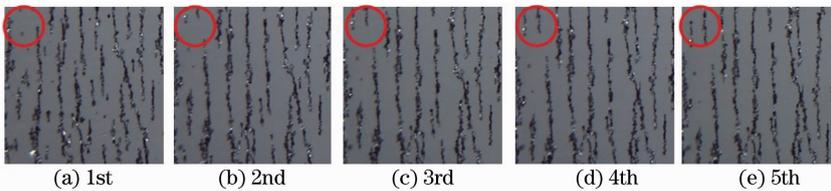


图 17 电子显微镜观测磁流变液施加磁场时成链结构及分布

Fig. 17 Chaining structure and distribution of MR fluids with applied magnetic field observed by electron microscope

该数字显微全息实验采用的显微镜物镜质量不高、放大倍率较低,导致全息图清晰度不高,但是通过使用高质量高倍物镜可以简单地提高全息图清晰度,进而可以通过对全息图在不同的物距重建来获得磁流变液中铁磁性微粒子的三维空间信息;电子显微镜观测磁流变液的图片虽然看起来清晰度较高,但是只能对一个截面进行观测,不能获得磁流变液在磁场作用下的空间信息。所以,数字显微全息技术比一般显微观测技术更适合于观测磁流变液的三维微观结构及分布。

## 4 结 论

利用数字显微全息技术对磁流变液微观结构进行了观测与测量,提出了 OS 与 CLS 技术对微粒子焦平面进行精确定位。结合以上方法,利用数字显微全息系统捕捉了磁流变液在无磁场和有磁场下的全息图。为了获得铁磁性微粒子实际的放大倍率,将校准靶面置于磁流变液测量域中同一位置,以校准正确的放大倍率。观测到了磁流变液中铁磁性微粒子的随机分布情况、尺寸信息、铁磁性微粒子在磁场中沿磁感线方向运动及整个实时三维的链化变换过程,分析了磁流变液在磁场中的成链结构、链化速度及响时间,获得了磁流变液在外加磁场下作用的响应时间可达毫秒量级,对比进行了电子显微镜观

也是通过计算链运动的像素点数  $N$  和像素点尺寸  $\Delta x$  获得。电子显微镜观测磁流变液获得的响应时间同样是毫秒量级,如表 3 所示。

表 3 电子显微镜观测磁流变液的链化速度和响应时间

Table 3 Chaining speed and responding time of MR fluids observed by electron microscope

Parameter	Value			
Interval	$N_1 - N_2$	$N_2 - N_3$	$N_3 - N_4$	$N_4 - N_5$
$v / (\mu\text{m/s})$	680.06	631.38	596.14	623.08
$\bar{v} / (\mu\text{m/s})$	632.67			
$\Delta t / \text{ms}$	8.21	8.66	9.23	7.98
$\overline{\Delta t} / \text{ms}$	8.52			

测实验,结果证明,数字显微全息技术能够精确、高效地测量磁流变液的三维微观结构及流变特性。

## 参 考 文 献

- 1 K H Song, B J Park, H J Choi. Effect of magnetic nanoparticle additive on characteristics of magnetorheological fluid [J]. Magnetics, IEEE Transactions, 2009, 45(10): 4045-4048.
- 2 Guan Xinchun, Huang Yonghu, Gao Jiuwang, *et al.*. A study on the evaluation indicator of thixotropy of magnetorheological fluid [J]. Journal of Functional Materials, 2010, 41(4): 632-636.
- 3 关新春, 黄永虎, 高久旺, 等. 磁流变液触变性评价指标研究 [J]. 功能材料, 2010, 41(4): 632-636.
- 4 Y Yang, S G Huang, B S Kang. Research on circular plate MR fluids brake [J]. J Central South University of Technology, 2007, 14(1): 257-259.
- 5 C Y Hong, I J Jang, H E Horng, *et al.*. Ordered structures in  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  kerosene-based ferrofluids [J]. J Appl Phys, 1997, 81(8): 4275-4277.
- 6 H Y Wang, C Bi, J W Kan, *et al.*. The mechanical property of magnetorheological fluid under compression, elongation, and shearing [J]. J Intelligent Material Systems and Structures, 2011, 22(8): 811-816.
- 7 R Patel. Mechanism of chain formation in nanofluid based MR fluids [J]. J Magnetism and Magnetic Materials, 2011, 323(10): 1360-1363.
- 8 W Q Jiang, Y L Zhang, S H Xuan, *et al.*. Dimorphic magnetorheological fluid with improved rheological properties [J]. J Magnetism and Magnetic Materials, 2011, 323(24): 3246-3250.
- 9 V V Murashov, G N Patey. Structure formation in dipolar fluids driven by rotating fields [J]. J Chem Phys, 2000, 112(22): 9828-9833.
- 10 S Melle, O G Calderón, M A Rubio, *et al.*. Rotational dynamics in dipolar colloidal suspensions: video microscopy experiments

- and simulations results[J]. *J Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 2002, 102(2): 135–148.
- 10 H Li, X Peng, W Chen. Simulation of the chain-formation process in magnetic fields[J]. *J Intelligent Material Systems and Structures*, 2005, 16(7-8): 653–658.
- 11 M R Jolly, J D Carlson, B C Muñoz. A model of the behavior of magnetorheological materials [J]. *Smart Materials and Structures*, 1996, 5(5): 607–614.
- 12 M Mohebi, N Jamasbi, J Liu. Simulation of the formation of nonequilibrium structures in magnetorheological fluids subject to an external magnetic field[J]. *Phys Rev E*, 1996, 54(5): 5407–5413.
- 13 D Gabor. A new microscopic principle[J]. *Nature*, 1948, 161(4098): 777–778.
- 14 J W Goodman, R W Lawrence. Digital image formulation from electronically detected holograms[J]. *Appl Phys Lett*, 1967, 11(3): 77–79.
- 15 V R Palero, J Lobera, M P Arroyo. Three-component velocity field measurement in confined liquid flows with high-speed digital image plane holography[J]. *Experiments in Fluids*, 2010, 49(2): 471–483.
- 16 Li Guangyong, Yang Yan. Digital holography particle image velocimetry applied for measurement of the rotating flow fields [J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(6): 0609001.  
李光勇, 杨岩. 数字全息粒子图像测速技术应用于旋转流场测量的研究[J]. *中国激光*, 2012, 39(6): 0609001.
- 17 X F Xu, L Z Cai, Y R Wang, *et al.*. Correction of wavefront reconstruction errors caused by light source intensity instability in phase-shifting interferometry[J]. *J Opt A: Pure & Appl Opt*, 2008, 10(8): 085008.
- 18 A Faridian, D Hopp, G Pedrini, *et al.*. Nanoscale imaging using deep ultraviolet digital holographic microscopy[J]. *Opt Express*, 2010, 18(13): 14159–14164.
- 19 T Saucedo-A, M H Torre-Ibarra, F M Santoyo, *et al.*. Digital holographic interferometer using simultaneously three lasers and a single monochrome sensor for 3D displacement measurements[J]. *Opt Express*, 2010, 18(19): 19867–19875.
- 20 H Lycksam, M Sjö Dahl, P Gren. Measurement of spatiotemporal phase statistics in turbulent air flow using high-speed digital holographic interferometry[J]. *Appl Opt*, 2010, 49(8): 1314–1322.
- 21 Qu Weijuan, Liu Dean, Zhi Yanan, *et al.*. Visualization of domain inversion region characteristics in  $\text{RuO}_2 : \text{LiNbO}_3$  crystal by digital holographic interferometry[J]. *Acta Physica Sinica*, 2006, 55(8): 4276–4281.  
曲伟娟, 刘德安, 职亚楠, 等. 利用数字全息干涉术观察  $\text{RuO}_2 : \text{LiNbO}_3$  晶体中畴反转的区域特性[J]. *物理学报*, 2006, 55(8): 4276–4281.
- 22 Wang Huaying, Guo Zhongjia, Zhang Zhihui, *et al.*. Image-plane digital holography for quantitative imaging of cells of chinese medical decoction pieces[J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(2): 0209002.  
王华英, 郭中甲, 张志会, 等. 基于像面数字全息术的中药饮片细胞定量成像技术研究[J]. *中国激光*, 2012, 39(2): 0209002.
- 23 Ouyang Liting, Wang Dayong, Zhao Jie, *et al.*. Experimental study on the phase-contrast imaging of the living hippocampal neuron cells by digital holographic microscopy [J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(9): 0909001.  
欧阳丽婷, 王大勇, 赵洁, 等. 老鼠大脑海马区神经元活细胞的数字全息相衬成像实验研究[J]. *中国激光*, 2013, 40(9): 0909001.
- 24 F Dubois, C Schockaert, N Callens, *et al.*. Focus plane detection in digital holography microscopy by amplitude analysis[J]. *Opt Express*, 2006, 14(13): 5895–5908.
- 25 Y Yang, B S Kang. Measurements of the characteristics of spray droplets using in-line digital particle holography[J]. *J Mechanical Science and Technology*, 2009, 23(6): 1670–1679.
- 26 Y Zhu, M Gross, J Liu. Nucleation theory of structure evolution in magnetorheological fluid[J]. *J Intelligent Material Systems and Structures*, 1996, 7(5): 594–598.
- 27 Li Haitao, Peng Xianghe. Dynamic analysis on ferromagnetic particles of magnetorheological fluids[J]. *Journal of Chongqing University*, 2010, 33(5): 100–104.  
李海涛, 彭向和. 磁流变液铁磁颗粒的动力学分析[J]. *重庆大学学报*, 2010, 33(5): 100–104.
- 28 Li Haitao, Peng Xianghe, Chen Weimin. Analysis on the rheological properties of MRF [J]. *Journal of Functional Materials*, 2006, 37(5): 710–712.  
李海涛, 彭向和, 陈伟民. 磁流变液流变特性的数值模拟分析[J]. *功能材料*, 2006, 37(5): 710–712.
- 29 U Schnars, W Jueptner. *Digital Holography: Digital Hologram Recording, Numerical Reconstruction, and Related Techniques* [M]. Springer, 2005.
- 30 Li Junchang, Xiong Bingheng. *Tutorial of Information Optics* [M]. Beijing: Science Press, 2011. 58–64.  
李俊昌, 熊秉衡. *信息光学教程* [M]. 北京: 科学出版社, 2011. 58–64.
- 31 Y Yang, B S Kang, Y J Choo. Application of the correlation coefficient method for determination of the focal plane to digital particle holography[J]. *Appl Opt*, 2008, 47(6): 817–824.
- 32 T Kim, T C Poon, G Indebetouw. Depth detection and image recovery in remote sensing by optical scanning holography[J]. *Opt Eng*, 2002, 41(6): 1331–1338.
- 33 T Kim, T C Poon. Three-dimensional matching by use of phase-only holographic information and the Wigner distribution[J]. *J Opt Soc Am A*, 2000, 17(12): 2520–2528.
- 34 Wu Yiquan, Yin Jun. Reconstructed image enhancement digital holography in Contourlet domain based on particle swarm optimization[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(8): 0809002.  
吴一全, 殷骏. 粒子群优化的Contourlet域数字全息再现像增强[J]. *中国激光*, 2013, 40(8): 0809002.

栏目编辑:何卓铭