

文章编号 1004-924X(2012)12-2633-05

纳米磁微粒的双扫描干涉激光散斑实验

王希军^{1*}, 苏少昌^{1,2}

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 设计了研究纳米尺度磁微粒簇运动的双扫描干涉激光散斑实验。采用干涉条纹作为散斑运动的标度测量了磁流体中磁微粒的运动, 避免了用传统数字散斑相干方法计算量大、精度依赖亚像素搜索算法的缺点; 利用位相延迟扫描补偿横向扫描附加位相带来的干涉条纹变动, 提高了动态散斑测量的空间分辨能力。对尺度为 30~100 nm 的磁微粒簇运动进行了实验分析, 结果表明, 受磁流体磁场变化的非线性、微粒间的碰撞和聚集等复杂因素的影响, 磁微粒簇是以湍流, 非匀速方式运动的, 其运动的平均速度为 6.93 mm/s。另外, 该方法可通过改变条纹间距方便地调节精度以满足不同的测量要求。

关键词: 激光散斑; 磁流体; 干涉条纹; 相位延迟扫描

中图分类号: O436.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20122012.2633

Interferometric experiment of dual-scan laser speckle to characterize nano-magnetic particles

WANG Xi-jun^{1*}, SU Shao-chang^{1,2}

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*

2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)*

* *Corresponding author, E-mail: xijwang@sklao.ac.cn*

Abstract: A double scanning laser speckle interferometric experiment was designed to investigate the movement of nano magnetic particle clusters around 100 nm. In experiments, the interferometric fringes were used as the scales of speckle motion to measure the movement of nano magnetic particles in a magnetic flow field to avoid large computation and the precision dependent on the subpixel searching algorithm. Furthermore, the phase delay scanning was used to compensate the additional phase change caused by a transverse scanning to improve the space resolution of dynamic speckle measurement. An experiment was performed on the nano magnetic clusters with the sizes of 30–100 μm . The experimental results show that the movement of the magnetic particles in the cluster is nonuniform motion and a turbulent flow with an average speed of 6.93 mm/s, which are caused by the nonlinear changes of magnetic field, the collision and aggregation between the particles, and some unknown complex factors. Moreover, the method can meet the different measuring requirements for easy preci-

收稿日期: 2012-08-02; 修订日期: 2012-09-13.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 60748026); 国家自然科学基金委中韩合作研究资助项目(No. 60611140400); 科技部国际合作项目(No. 2011DFA50590)

sion adjustment by changing fringe spaces.

Key words: laser speckle; magnetic fluid; interference fringe; phase delay scanning

1 引言

磁流体是一种载液中分散着纳米尺度磁性粒子,运动相对稳定的胶体^[1],它是目前国内外纳米材料技术研究的热点之一,已在新型纳米管、纳米发电机、纳米泵、纳米马达和其他一些纳米装置中得到了广泛应用^[2-4]。

作为一种磁性流体材料,纳米磁微粒具有超顺磁性,易被磁场激活,对可见光的吸收系数较高,物理特性长期稳定等特点,因此适用于反射式平板光显示器件。目前,韩国 Hongik 大学 Seo 小组已经研制出磁流体光显示器件^[5-8]。

磁流体显示器件的光学性能由磁流体显示器件的设计及显示过程中磁微粒的运动过程决定。但作为工作物质的磁流体既有流体的流动性又有固体的颗粒性,用一般的检测手段很难进行表征。激光散斑测量技术是基于激光散斑特性发展起来的一种现代测量技术,它具有测量精度高、非接触、全场、实时性以及灵活等优点,被广泛应用于速度、距离、振动、位移、应变和医学诊断等方面的测量中^[9-12]。

因此,本文设计了双光束扫描干涉激光散斑实验系统,通过该系统对磁流体显示器件在显示过程中磁微粒的动态行为进行了研究。结果表明,该方法容易实现,精度可根据需要进行调节。

2 磁流体器件的运动过程描述

磁流体显示器件通过器件微单元表面的亮暗状态来表达像素信息。亮暗状态由磁流体薄膜的厚度决定,薄膜的厚度通过加在上面的非均匀磁场来调节,磁场的大小则由通过器件微单元的电强度来决定。

磁流体光显示器件的基本结构由绝缘衬底、刻蚀凹槽及电极组成,如图 1 所示。图中有两个显示微单元,大小均为 $1.5 \text{ mm} \times 0.5 \text{ mm}$ 。

图 2 为磁流体显示器件的工作原理。通电前,磁微粒充满凹槽,且在平台上均匀分布,当入射光照在平台上时,由于磁流体膜层较薄,对入射

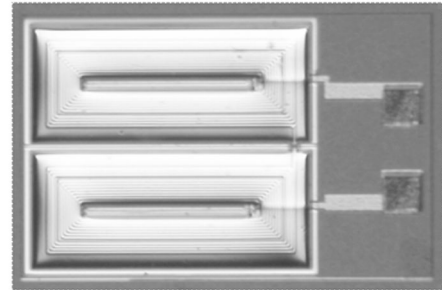


图 1 磁流体显示器件

Fig. 1 Photo of magnetic fluid display device

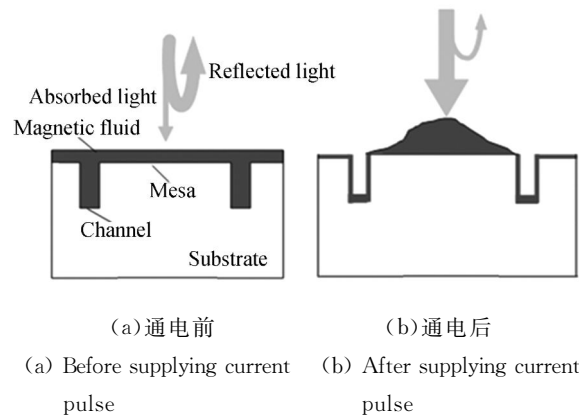


图 2 磁流体器件工作原理示意图

Fig. 2 Schematic of operation of magnetic fluid device

光的吸收较少,器件为亮状态。通电后,平台两边凹槽内的磁微粒在磁场的作用下沿着凹槽壁“涌”上平台且堆积成一小山包形状,这时,照射在平台上的入射光大部分被磁流体吸收,器件变为暗状态。断电后,在表面张力的作用下,平台上的磁微粒又流回两边的凹槽内变为亮状态。

3 双扫描激光干涉散斑实验

3.1 实验设计

双扫描干涉实验如图 3 所示,氦氖激光器发出的激光经准直扩束、分束,形成两束平行光,一束作为物光入射到磁流体显示器件的显示单元上,透过液面进入磁流体,经磁微粒的散射在反射空间形成散斑光场;另一束作为参考光与散斑场进行干涉,从而得到带有干涉条纹的散斑场。为

了获得较高的空间分辨率,在物光光路中加入一平行平板 PS 作为空间扫描装置,以实现样品的横向扫描。由于物光横向扫描样品的过程中会引入附加位相,为了补偿此位相,在参考光路中加入了两个直角棱镜组。

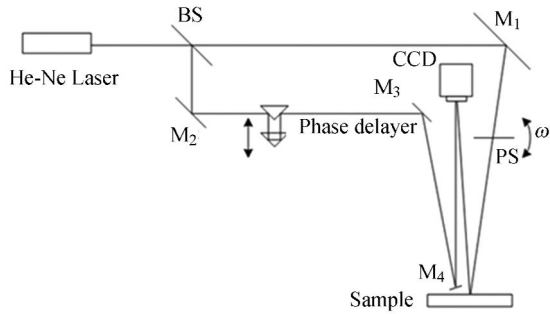


图 3 激光双扫描散斑干涉实验示意图

Fig. 3 Schematic of dual-scan laser speckle interferometric experiment

调节两束光的夹角可以改变干涉条纹的间距,通过激光散斑场可以观测到条纹密度的变化,分辨率也会随之变化。假设物光和参考光以相同的入射角 i 对称入射到 CCD,则干涉条纹的间距为:

$$\Delta x = \frac{\lambda}{2 \sin i} \quad (1)$$

3.2 位相补偿关系

实验中物光光路里的横向扫描引入的附加位相如图 4 所示, α 是入射角, β 是折射角。

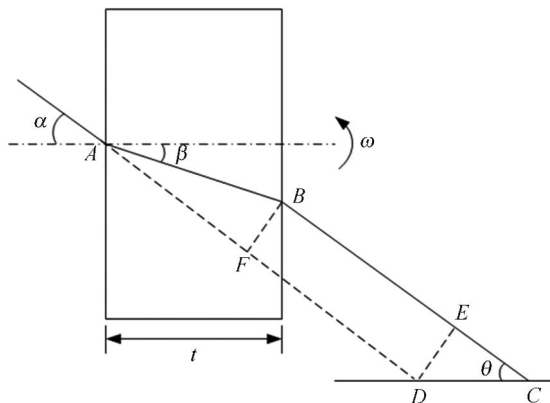


图 4 横向扫描板的附加位相光程差

Fig. 4 OPD of subjoin phase of transverse scan plate

图 4 中,光在横向扫描板上的入射点 A 到样品表面 C 点的光程为 $L = nAB + BC$,其中:

$$AB = t / \cos \beta, \quad (2)$$

$$DE = BF = AB \sin (\alpha - \beta), \quad (3)$$

$$EC = DE \cot \theta, \quad (4)$$

式中: θ 为入射光线与样品表面的夹角,因此可得到此时的光程为:

$$L = AD + \frac{nt}{\cos \beta} - \frac{t \cos (\alpha - \beta)}{\cos \beta} + \frac{t \sin (\alpha - \beta) \cot \theta}{\cos \beta}, \quad (5)$$

式(5)对 α 求导得到光程随横向扫描板旋转角度的变化率为:

$$\frac{dL}{d\alpha} = \frac{t \cos \alpha \cos \beta}{n^2 \cos^3 \beta} [n - \cos (\alpha - \beta) + \cos \theta \sin (\alpha - \beta)] + \frac{t (n \cos \beta - \cos \alpha)}{n \cos^2 \beta} [\cot \theta \cos (\alpha - \beta) + \sin (\alpha - \beta)]. \quad (6)$$

每次驱动步进电机旋转 0.9° ,由式(6)可以得到横向扫描板所引起的物光光程的改变量,如图 5 所示。图中旋转横向扫描板所引入的光程改变是非线性的,它随横向扫描板的角度 α 改变。

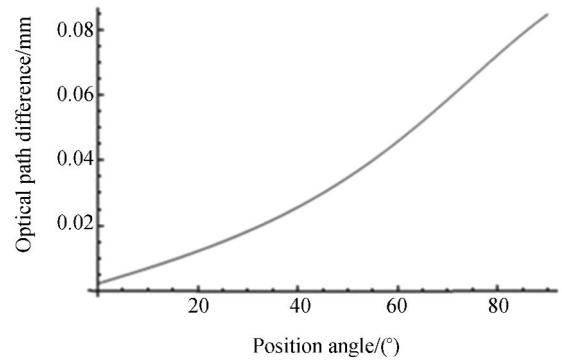


图 5 横向扫描转动引起的附加光程

Fig. 5 Position angle vs. optical path difference in transverse scanning

实验中用步进电机驱动横向扫描板旋转来实现样品的横向扫描,同时还采用步进电机驱动位相补偿装置做直线运动,由位相补偿装置引起的光程改变为其移动距离的 2 倍,结合式(6)计算出横向扫描在不同角度 α 处应给出的位相补偿量,从而确定位相补偿步进电机的转动角度。然后设计驱动器参数,使位相补偿装置与横向扫描同步工作。

4 实验结果

图 3 中 He-Ne 激光器的功率调整到 3 mW 激光输出,磁流体膜厚约为 $20 \mu\text{m}$ 。采用直流矩

形脉冲驱动磁流体, 占空比为 1 : 2, 脉冲宽度为 100 ms, 驱动电流为 70 mA, 磁流体的响应时间在 400 ms 左右。将磁流体样品水平放置在图 3 所示光路中, 首先调节两路光束的能量比, 使其可以产生较清晰的干涉条纹; 然后利用 CCD 记录磁流体变化过程中形成的散斑图样, CCD 的采样频率为 25 frame/s。

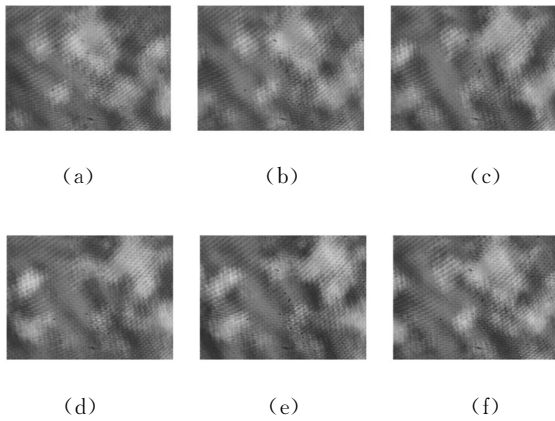


图 6 双扫描干涉激光散斑图序列图

Fig. 6 Sequent patterns of laser dual-scan speckle interferometry

电流脉冲开启后同步连续拍摄多幅散斑图, 图像大小均为 640 pixel \times 480 pixel。CCD 距样品表面的垂直高度为 2 m, 两光束以 12° 的夹角对称入射到 CCD 上, 由此计算出的条纹间距为 181 μm 。图 6 是 CCD 记录的一组激光散斑干涉图序列, 它们的时间间隔为 40 ms。

对图 6 进行小波去噪, 增强对比度以提取干涉亮条纹的中心线和激光散斑。以干涉亮条纹中心线为“刻度”, 并将左下角的第 1 条干涉条纹中

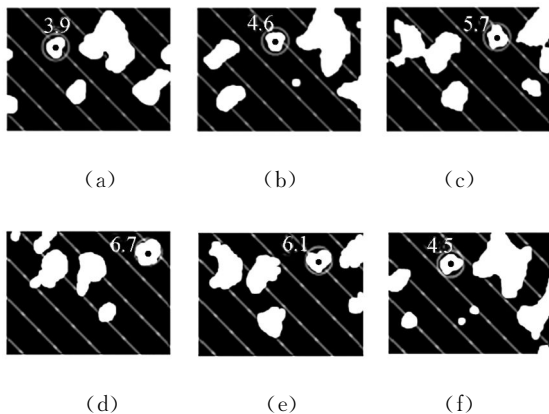


图 7 散斑运动的踪迹

Fig. 7 Track of speckle movement

心线标定为 1, 向右上角依次标定干涉条纹中心线。干涉条纹的间距基本是恒定的, 在垂直条纹方向上形成一维尺度, 进而标定出该方向上散斑的相对运动。

为了突出散斑相对于干涉条纹的运动, 将图像二值化, 其计算结果如图 7 所示。

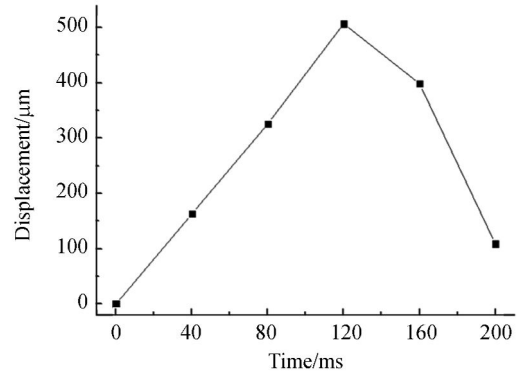


图 8 磁微粒簇位移-时间曲线

Fig. 8 Displacement vs. time curve of magnetic particle group

图 7 中被圆圈起来的为跟踪散斑, 旁边的数字为该散斑在干涉条纹中的相对位置, 其重心以一黑点标记。图 8 是与图 7 对应的散斑的运动轨迹图, 将图 7(a) 作为散斑的起始位置和时间起点, 数字 3.9 表示跟踪散斑的“条纹坐标”。

由此可见, 在磁场作用下磁流体显示器件中的磁流体单向运动堆积, 但受磁场变化的非线性和微粒间的碰撞团聚等复杂因素的影响, 其磁微粒簇的运动过程不是匀速运动。断电后, 磁微粒簇在表面张力的作用下, 又向初始位置做反向运动。

5 结 论

本文设计了双扫描干涉激光散斑检测系统, 利用位相延迟补偿横向扫描带来的附加位相提高了测量系统的分辨能力, 该系统能够分辨尺度为 30 nm 的磁微粒及尺度为 100 nm 的聚集, 为研究纳米尺度的粒子运动提供了一种技术手段。

本系统采用干涉条纹作为散斑运动的标度来测量磁流体中磁微粒的运动, 克服了传统数字散斑相关方法计算量大、精度依赖亚像素搜索算法

的缺点。通过改变条纹间距可以方便地调节系统精度,以满足不同的测量需求。

根据统计光学对激光散斑的解释,散斑运动

的速度为 6.93 mm/s,纳米微粒簇的平均速度基本处于同样的量级。初步判断磁流体的运动是湍流补偿层流。

参考文献:

- [1] BERKOVSKY B M, MEDVEDEV V F, KRAKOV M S. *Magnetic Fluids Engineering and Applications* [M]. Oxford:Oxford University Press, 1993.
- [2] ZAHN M. Magnetic fluid and nanoparticle applications to nanotechnology [J]. *Journal of Nanoparticle Research*, 2001, 3:73-78.
- [3] NAKATSUKA K. Trends of magnetic fluid applications in Japan [J]. *J. Magn. Magn. Mater.*, 1993,122:387-394.
- [4] RAJ K, MOSKOWITZ B, CASCIAARI R. Advances in ferrofluid technology [J]. *J. Magn. Magn. Mater.*, 1995, 149:174-180.
- [5] SEO J W, PARK S J. An experimental study of light modulator using magnetic fluid for display applications [J]. *V. Magn. Magn. Mater.*, 1999, 192: 499-504.
- [6] SEO J W, JEON S M, PARK S J, *et al.*. An experimental and numerical investigation of flat panel display cell using magnetic fluid [J]. *J. Magn. Magn. Mater.*, 2002, 252: 353-355.
- [7] SEO J W, KIM H, SUNG S. Design and fabrication of a magnetic microfluidic light modulator using magnetic fluid [J]. *J. Magn. Magn. Mater.*, 2004, 272:e1787-e1789.
- [8] SEO J W, WANG X J. Magnetic-fluid microelectromechanical light modulator [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2005, 13(5): 542-547.
- [9] THOMPSON C A, WEBB K J, WEINER A M. Diffusive media characterization with laser speckle [J]. *Appl. Opt.*, 1997, 36(16):3726-3734.
- [10] LU R SH, TIAN G Y, DUKE G, *et al.*. Grinding surface roughness measurement based on the co-occurrence matrix of speckle pattern texture [J]. *Appl. Opt.*, 2006,45(35):8839-8847.
- [11] 李善祥, 孙一翎, 李景镇. 时间序列动态散斑相关跟踪测量原理及其应用[J]. *光子学报*, 2005, 34(7):1066-1068.
- LI SH X, SUN Y L, LI J ZH. The tracking method of digital speckle correlation using the sequential dynamical speckle patterns and its applications [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, 34(7):1066-1068. (in Chinese)
- [12] 云礼宁, 马少鹏, 李霞镇, 等. 用数字散斑相关方法研究竹材在拉伸载荷下的断裂行为[J]. *北京理工大学学报*, 2011, 31(3):258-261.
- YUN L N, MA SH P, LI X ZH, *et al.*. Experimental study of the fracture behavior of bamboo under tension based on digital speckle correlation method [J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2011, 31(3):258-261. (in Chinese)

作者简介:



王希军(1963—),男,吉林省吉林市人,研究员,博士生导师,主要从事有机光电功能材料及固体激光技术的研究工作。Email: xijwang@sklao. ac. cn



苏少昌(1978—),男,河北人,博士研究生,主要从事有机光电功能材料及固体激光技术的研究工作。Email: susc403@163. com