

doi:10.3788/gzxb20134203.0373

利用法拉第效应进行永磁体磁场二维光学成像

李淑慧¹, 李小俊², 郭慧爽³

(1 西安邮电大学, 西安 710121)

(2 西北大学 光子学与光子技术研究所, 西安 710069)

(3 石家庄邮电职业技术学院, 石家庄 050021)

摘 要:借助于法拉第磁致旋光效应,以 ZF6 玻璃为磁旋光介质,设计了适当的光学系统,对永磁体磁极附近磁场的分布进行了光学二维成像.利用自编的图像采集软件采集了一系列原始图片,并利用自编的图像处理软件对这些原始图片进行了处理,完成了检偏过程.分别得到了透射成像方式和反射成像方式下永磁体磁场的分布图像,这些图像正确反映了永磁体磁场的实际分布.本研究工作作为宏观尺度磁场的观测与测量提供了一种有效的手段.

关键词:物理光学;磁场图像;光学成像;法拉第效应

中图分类号:O436.4; TP391.9 **文献标识码:**A **文章编号:**1004-4213(2013)03-0373-6

2D Optical Imaging of Magnetic Field for Permanent Magnets by Faraday Effect

LI Shu-hui¹, LI Xiao-jun², GUO Hui-shuang³

(1 Xi'an University of Posts & Telecommunications, Xi'an 710121, China)

(2 Institute of Photonics and Photon-Technology, Northwest University, Xi'an 710069, China)

(3 Shijiazhuang Posts & Telecommunications Technical College, Shijiazhuang 050021, China)

Abstract: Based on the Faraday magneto-optical effect, 2D optical imaging of magnetic field of the permanent magnets is carried out using an applicable optical system with the ZF6 glass as the magneto-optic medium. Original pictures are acquired using a self-programmed software, and processed using a self-programmed image processing software, thus polarization analysis is completed. The permanent magnet field distribution images are obtained under the transmission imaging and the reflection imaging respectively. These images reflect the actual magnetic field distribution. This experiment provides an effective means for observation and measurement of macroscopic magnetic field.

Key words: Physical optics; Magnetic field image; Optical imaging; Faraday effect

0 引言

本课题组建立了一套关于地球磁场光学成像测量的新方法,称作“磁旋光成像地球磁场测量方法”.其基本思路是:由于地表反射的太阳光具有一定的偏振性质,同时地球大气层也具有磁致旋光能力,基于此,以太阳为光源,利用光学系统在卫星平台上测量地表反射光经过大气层时的磁旋光角度,就可以获得地球磁场的信息,再利用特定方法恢复出地磁

场的分布^[1].

本文利用磁光法拉第效应对实验室人工构造的磁场分布进行二维成像,既是一项独立研究,又可以作为“磁旋光成像地球磁场测量方法”总体研究工作的一部分.

利用磁光效应对磁场的分布图像进行研究工作始于对铁磁材料磁畴的观察.此后,各国研究者基于磁光效应,对各种磁性材料的磁畴结构及相关性质进行了大量的实验和理论研究^[2].最近几年,有关

基金项目:陕西省教育厅科研计划项目(Nos. 08JZ68, 2010JS111, 12JK0519)资助

第一作者:李淑慧(1973-),女,高级实验师,硕士,主要研究方向为计算机软件与应用、图像处理. Email:leiny2004@126.com

通讯作者:李小俊(1968-),男,副研究员,博士,主要研究方向为磁光效应、光学成像与测量. Email:lixiaojun@nwu.edu.cn

收稿日期:2012-07-30;录用日期:2012-12-09

磁畴结构图像的研究工作仍然非常活跃,发展了各种不同的磁畴成像方法,例如: X 射线共振散射成像^[3]、近场二次谐波成像^[4]、近场扫描微波显微镜成像^[5]等,研究对象涉及铁材料^[2]、反铁磁材料^[3]、亚铁磁材料以及光学材料^[6]. 在静态图像研究的基础上,基于磁光效应和各种动态显微技术,获得了磁畴及畴壁的动态变化图像^[7],研究了磁畴壁的运动和振荡^[8]、磁畴壁速度测量^[9]、磁场驱动的磁畴壁传播^[10]等.

磁光涡流成像技术^[11]利用电磁感应在导体中产生涡流,然后通过磁光效应对涡流的磁场进行探测,得到机件中腐蚀和疲劳裂纹的实时图像,这一技术被广泛应用于无损检测领域,尤其是在航空技术领域的研究目前相当受重视. 脉冲涡流成像技术的发展^[12],与计算机层析成像技术的结合^[13],更增强了其探测能力.

磁畴成像以及磁光涡流成像均是对微观磁场进行研究的手段,而对于宏观尺度的磁场分布(例如永磁体周围的磁场分布),早期物理教学和实验中采用细铁屑来显示磁力线. 后来开发了一种永磁体磁场立体成像系统^[14],其原理是基于霍尔探头或者巨磁电阻传感头扫描,然后用计算机绘制磁场分布图形. 关于利用磁光方法对宏观尺度磁场进行成像的实验研究目前尚未见报道.

对实验室局部磁场(如永磁体或者电磁器件产生的磁场)进行光学成像,能够达到直观观察磁场分布图形的目的,对相关实验和研究具有重要的意义. 本文的研究成果将为物理学相关实验和研究提供磁场分布图像和测量信息,同时还将为“磁旋光成像地球磁场测量方法”的建立提供实验依据.

本文的磁场成像可看作一种特殊的偏振成像. 各类偏振成像方法及其应用目前得到了广泛研究^[15-17].

1 实验装置

成像形式分为透射型和反射型两种. 透射型成像实验装置如图 1. 光源采用半导体激光器,输出波长为 532 nm 的绿色激光(在“磁旋光成像地球磁场测量方法”中拟采用蓝色光^[1],而在此处由于受实验条件和经费限制,暂采用绿光激光器). 入射光首先被起偏,然后经过扩束,形成宽光束平行光(光束直径约为 100 mm). 平行光束垂直穿过厚度 10 mm 的 ZF6 玻璃,然后经检偏器,最后由 CCD 摄像机接收. 待测磁场由紧贴于玻璃板表面若干永磁体产生. 在待测磁场作用下,穿过 ZF6 玻璃的偏振光发生磁致

旋光. ZF6 玻璃属顺磁性重火石玻璃,根据测量,在 532 nm 光波长下,其费尔德常量为 $0.6927 \text{ '}/\text{mT} \cdot \text{cm}$ ($20.15 \text{ rad}/\text{T} \cdot \text{m}$)^[18]. 永磁体材料为烧结钕铁硼,磁极处的磁感应强度约为 0.4~0.6 特斯拉.

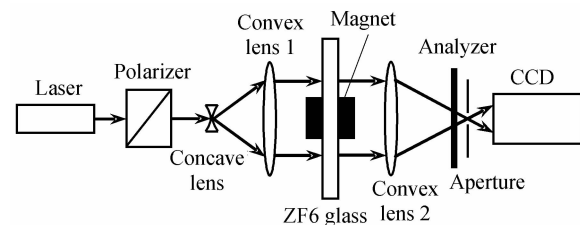


图 1 透射型成像实验装置

Fig. 1 Experiment device of transmission imaging

反射型成像实验装置如图 2. 此处不需要起偏器,扩束后的平行光束仍为自然光. 该自然光束在玻璃板后表面发生反射,通过反射达到起偏的目的,然后在从玻璃板后表面出发到走出玻璃板的途中其偏振面发生旋转. 在“磁旋光成像地球磁场测量方法”中,太阳光经地表反射而起偏,然后偏振光在从地面出发到走出大气层的整个途中发生偏振面旋转^[1]. 因此反射型成像的实验设计模拟了“磁旋光成像地球磁场测量方法”的工作过程. 这里待测磁场由玻璃板后表面处的若干永磁体提供.

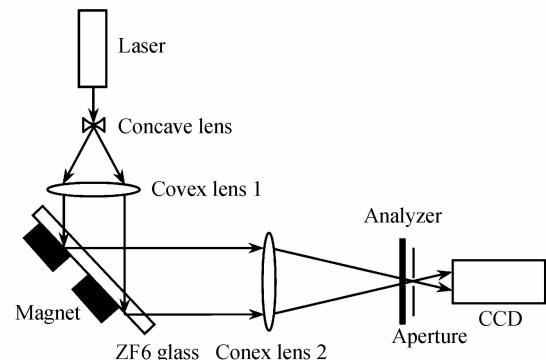


图 2 反射型成像实验装置

Fig. 2 Experiment device of reflection imaging

2 图像的采集

基于图 1 和图 2 的实验装置,旋转检偏器,在检偏器旋转的过程中由 CCD 拍摄一系列图片并存储于计算机,利用自编的图像处理软件对这些图片进行处理,最后得到磁场的二维分布图像.

实验中偏振片固定于带孔旋转台作为检偏器,旋转台竖直固定,旋转台读数可精确到 0.01° ; CCD 摄像机通过图像采集卡与计算机相连. 采用 Delphi 编程语言,自行编制了相应的图像采集程序. 图 3 是其用户界面. 鼠标点击“保存位图”按钮,由计算机驱动 CCD 拍摄图片,得到 768×576 像素的 8 位灰度图片,以 BMP 位图格式储存于计算机.

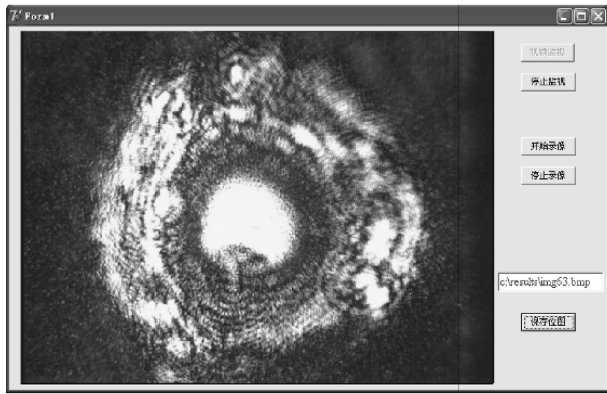


图 3 图像采集程序界面

Fig. 3 Interface of the image acquisition program

当检偏器在零刻度时,其透射方向在水平方向,这时对于未经过旋转的偏振光(其振动方向在竖直方向),其透射光达到最小值.将检偏器在 $-\theta_{\max}$ 角度到 θ_{\max} 角度(θ_{\max} 的大小根据磁场的强弱而定)之间连续转动,每隔一个微小角度 $\Delta\theta$,CCD采集一幅图片.共采集 $N+1$ 幅图片,图片编号为 $0, 1, 2, \dots, N$ (N 为偶数);正中间一张图片,即编号为 $N/2$ 的图片所对应的检偏器转角为 0 ;0号图片对应 $-\theta_{\max}$, N 号图片对应 θ_{\max} .这里 $\theta_{\max} = \Delta\theta \cdot N/2$,且第 k 号图片所对应的检偏器转角可以用式(1)表示

$$\theta_k = (k - N/2)\Delta\theta, (k=0, 1, 2, \dots, N) \quad (1)$$

本文对多种形状的永磁体的多种组合产生的磁场分布进行了二维成像,并且给出其中两次实验的过程与结果.

2.1 透射型成像实验

长度 40 mm,直径 8 mm 的两个圆柱状永磁体

(磁极在圆柱端面)对称紧贴于ZF6玻璃的前后表面,如图4,有效成像视野为图4(a)中虚线圆内部分.检偏器的旋转范围为 -5° 到 $+5^\circ$,每隔 0.05° 拍摄一幅图像,总共拍摄 201 幅图像,图片名称:img000~img200.由于图片数量较大,不能全部给

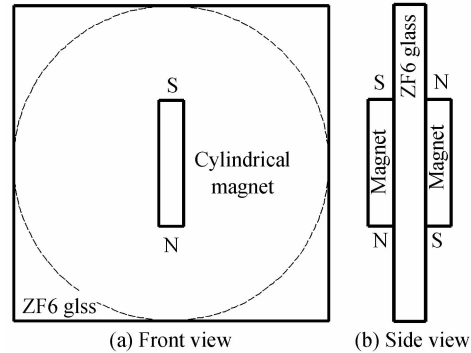


图 4 透射成像柱形磁铁排布

Fig. 4 Cylindrical magnets arrangement in the transmission imaging

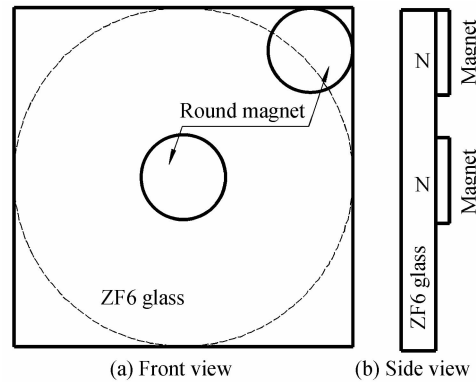


图 5 反射成像圆形磁铁排布

Fig. 5 Round magnets arrangement in the reflection imaging

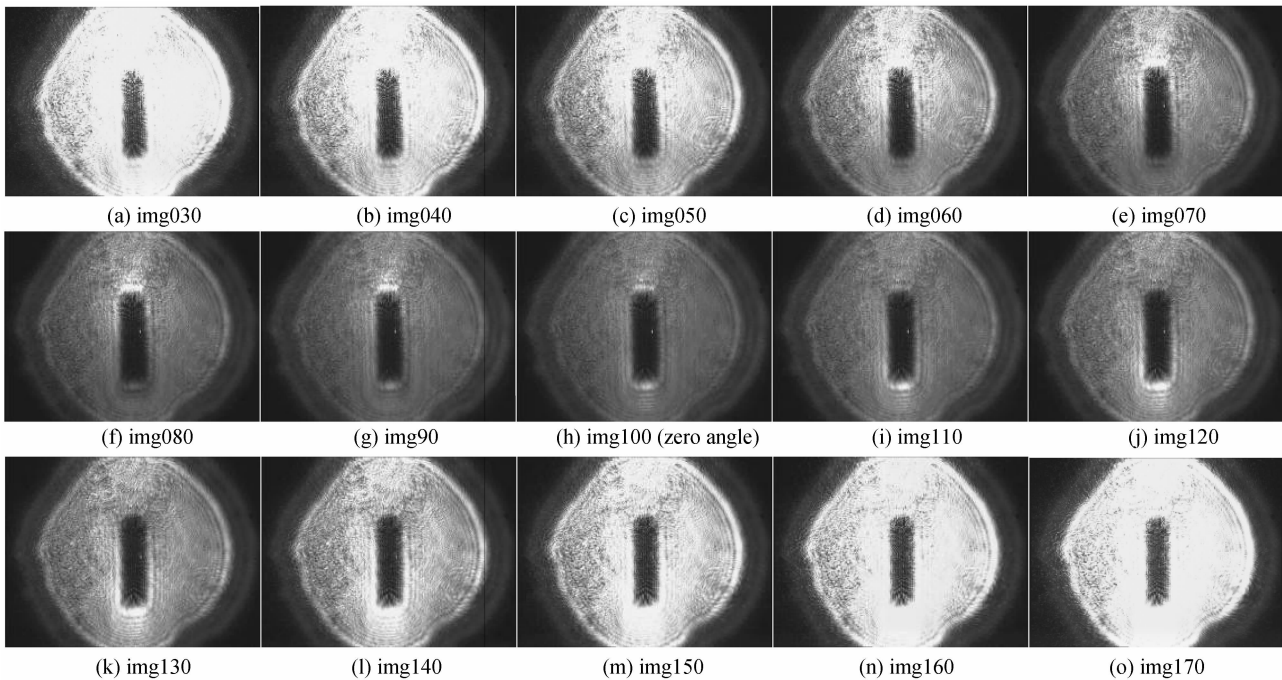


图 6 透射成像采集的图片

Fig. 6 Collected pictures in the transmission imaging

出,图 6 以 0 角度图片为中心,等间隔选取了其中 15 幅图片.

2.2 反射型成像实验

直径 25 mm、厚度 4 mm 的两个圆片状永磁体(磁极在圆面上)紧贴于 ZF6 玻璃后表面,如图 5 所

示,有效成像视野为图中虚线圆内部分. 检偏器的旋转范围为 -11° 到 $+11^\circ$,每隔 0.1° 拍摄一幅图像,总共拍摄 221 幅图像,图片名称:img000~img220. 采集的图片列举于图 7.

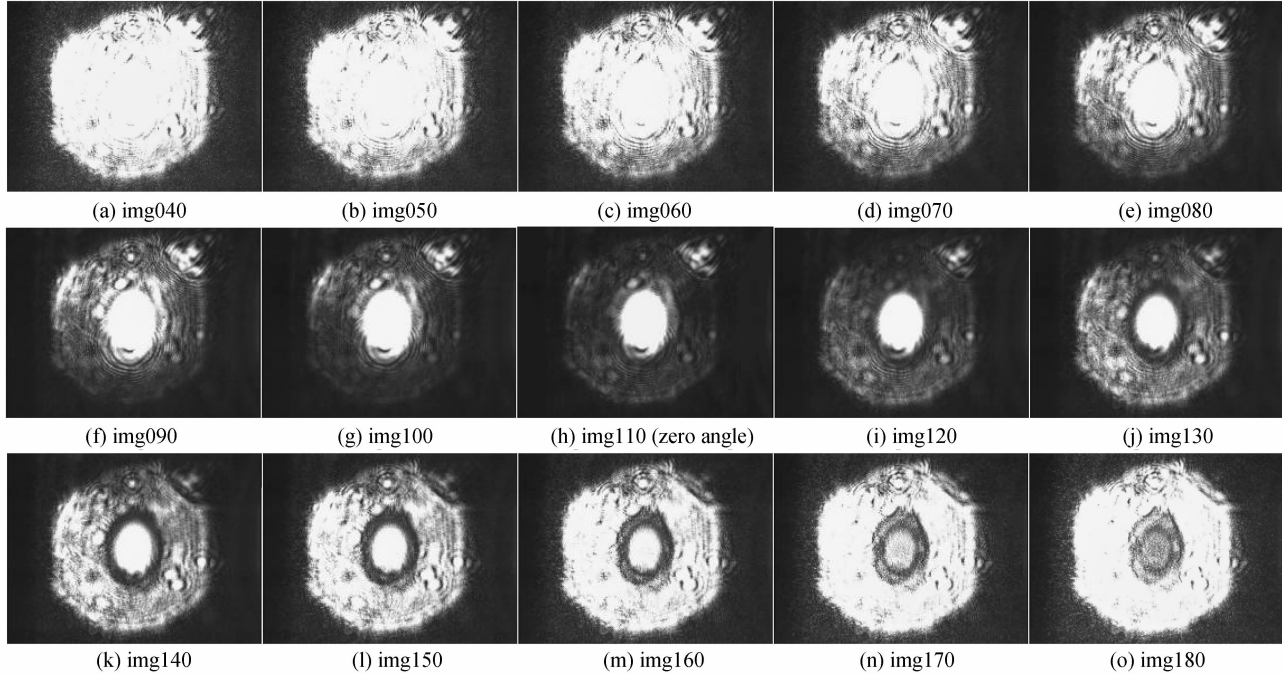


图 7 反射成像采集的图片

Fig. 7 Collected pictures in the reflection imaging

3 图像的处理

CCD 拍摄到的一组图像,并不是磁场的真实分布图像,而需要进行图像处理,才可以最后得到磁场的二维分布图像. 根据法拉第效应公式^[19]

$$\theta = VBL \quad (2)$$

式中 θ 为磁旋光角, V 为介质的费尔德常量, L 为光线在介质中穿行的距离, B 为磁感应强度在光传播方向上的分量. 此式中 B 是一个恒定量,而在本文的实验中 B 实际上是有所变化的,但可以认为式(2)中的 B 是光的传播路径 L 上的平均值. 对于同一次成像过程, V 和 L 都是不变的,因此旋光角度 θ 与 B 成正比. 图像处理的目的就是要得到每一像素处偏振面的旋转角度,从而得到磁场在成像面内的二维分布.

图像处理的过程实际上是一个检偏的过程,其思路是:CCD 拍摄到的某 1 幅图片(第 k 幅)对应着检偏器的一个确定的旋转角度 θ_k (见式(1)). 用计算机程序扫描每一幅图片,对于每个像素 p_{ij} ,可以得到一条明度(对应于透射光强)关于检偏器旋转角度的曲线,找出这条曲线的极小值,则极小值对应的检偏器旋转角度,就是该像素处偏振光振动面的旋转角度. 也就是说,若有

$$M_{ij}^k = \min(M_{ij}^1, M_{ij}^2, \dots, M_{ij}^N) \quad (3)$$

式中 M_{ij}^k 为第 k 幅图片像素 p_{ij} 的明度值,则有

$$\theta_{ij} = \theta_k \quad (4)$$

式中 θ_{ij} 为像素 p_{ij} 处偏振光振动面的旋转角. 这种通过对比图片,寻找明度最小值,确定偏振方向的检偏方法,实际上属于消光法.

根据式(2)可知,偏振面的旋转角与 B 成正比,所以这儿得到的旋光角度的二维分布 θ_{ij} 与 B 的二维分布的形式是相同的(只是在数值上相差一个常数).

为了能够形象直观地显现二维分布,将旋光角度 θ_{ij} 的二维分布在一幅新建的图像上以明度 M_{ij} 表示出来,这一新建的灰度图就可以看作磁场的分布图像. 图像以 8 位数据进行运算和存储,也就是能够区分的明度分为 256 级. 程序在处理图片时,将偏转角度的最大值以饱和明度值 255 表示,零转角以 0 明度值表示,明度值与偏转角度呈线性关系. 明度值与偏转角度之间的关系可以用式(5)表示

$$M_{ij} = \theta_{ij} / \theta_{\max} \times 255 \quad (5)$$

明度值 M_{ij} 所构成的这一二维图像,就是 B 的分布图像,这大体反映了真实磁场的相对分布.

需要说明的是,这里的图像处理即检偏过程中,通过寻找检偏器转动过程中透射光强极小值出现的

位置(即消光位置)来确定每一像素处的旋光角.该消光位置的确定并不依赖于入射光的绝对强度,因此成像视场内入射光强不均匀对成像结果没有影响.

根据以上处理方法,采用 Delphi 编程语言编制开发了图像处理软件对采集的图像进行处理,其用户界面见图 8.

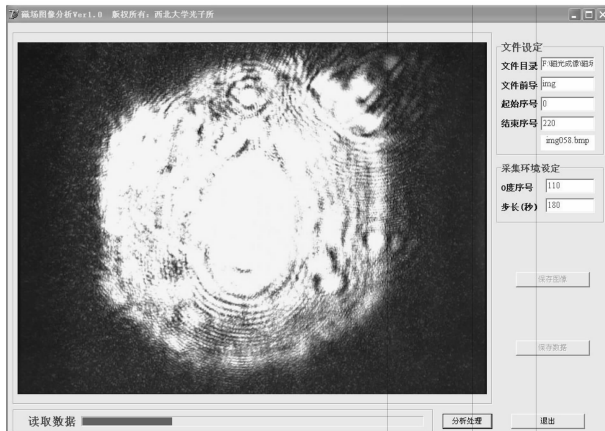


图 8 图像处理软件用户界面

Fig. 8 User interface of the image processing software

图像处理结果:

1) 透射型成像

由如图 6 所示的一组 201 幅图片经过处理可以得到图 4 所示的小型永磁体的磁场分布图,处理结果见图 9. 可以看到圆柱形磁铁两个磁极附近的磁场分布. 随着离开磁极的距离的增加,磁场减弱非常迅速. 由于圆柱形磁铁平行于玻璃表面放置,圆柱侧面紧贴玻璃,而磁极(圆柱端面)则离开玻璃表面有一定距离,磁极中心到玻璃表面的距离为圆柱的半径. 由于磁场随距离衰减极快,所以进入有效区域(玻璃内部)的磁场较弱.

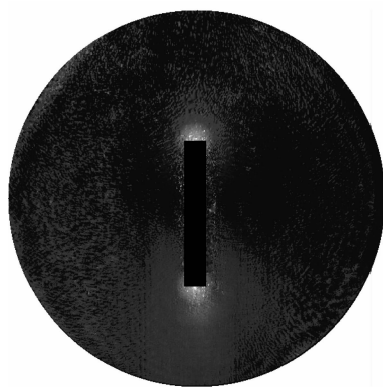


图 9 透射成像实验处理结果

Fig. 9 Results of the transmission imaging experiment

2) 反射型成像

由如图 7 所示的一组 221 幅图片经过处理可以得到图 5 所示的圆形永磁体的磁场分布图,处理结果见图 10. 可以看到圆形磁铁磁极较强的磁场圆形

分布. 右上角的圆形磁铁也部分进入了成像视野,其磁场也得到了反映. 此处由于磁极紧贴玻璃表面,进入有效成像区域(即玻璃内部)的磁场相对较强,图形比较清楚. 磁场大体呈圆对称辐射状分布,离开磁极以后强度迅速减弱.

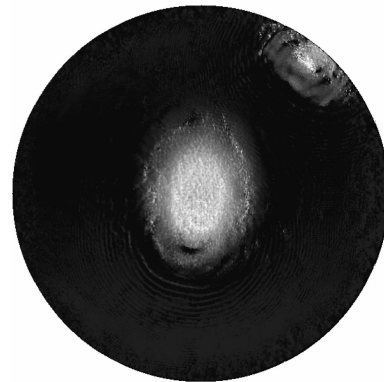


图 10 反射成像实验处理结果

Fig. 10 Results of the reflection imaging experiment

实验中有多种噪音来源,主要的如光源波动的噪音、CCD 本身的噪音、图片拍摄过程中由于人手操作引起的支架震动所带来的噪音等. 本文实验要求入射光强不变,尽管采用了较为稳定的半导体激光器,但光源的波动仍将在一定程度上引入噪音. 由于实验中所用的为非科研级 CCD,本身噪音较大,对光强变化(尤其是弱光)的分辨能力和灵敏度也有限. 这就使得测量能力下降,在检偏过程中引入了噪音. 同时由于 CCD 像素尺寸在微米量级,光学支架的微小位移,就可能使光学像元偏离原来的 CCD 像素,造成前后拍摄的图片像素不能完全严格对应. 而本实验通过比较某一像素处图像明度,寻找明度极值的检偏方法,实际上建立在前后图片像素严格对应的基础之上. 支架震动带来的像素不对应,将会在检偏过程中引入虚假信息,引起处理结果的噪音. 对于此种噪音的规律,目前还缺乏足够掌握,在图像处理软件中进行了较为粗略的噪音滤除.

需要进一步说明的是,根据公式(5),本文得到的成像针对于 B ,只是磁场在光传播方向上的分量,但是 B 的相对分布图像,可以近似代表实际磁场的相对分布图像. 另外,成像结果实际上是 L 范围的平均值,如果 L 很小,则可代表每一测量点的磁场量值. 若介质厚度较大, L 较大,则二维成像的测量结果不能反映 L 上每一点的磁场,这时需要以多次二维成像为基础,运用层析成像方法,恢复出每一点的磁场^[1]. 而且,这时恢复出的磁感应强度不再是在光传播方向上的分量,而是磁感应强度本身. 这实际上也就实现了磁场的三维成像. 从这个意义上讲,本文的磁场二维成像是磁场三维成像的基础. 磁场(矢

量场)层析成像方法本课题组目前已成功建立,将在接下来的文章中予以介绍。

4 结论

本文基于法拉第磁致旋光效应,利用光学实验和计算机图像处理相结合的手段,对由永磁体人工构造的磁场的分布进行了成像,得到了磁极附近磁场的分布图像,反映了永磁体磁场的实际分布。这一研究工作在利用磁光效应对宏观尺度磁场分布进行成像测量方面进行了一些探索,可为物理学相关实验和研究中磁场的观测与测量提供了一种可供选择的有效手段。本文的磁场二维成像也是磁场三维成像的基础。同时,本文的工作也是本课题组所提出并正在建立中的“磁旋光成像地球磁场测量方法”的核心实验环节,是该方法中地磁场二维成像的一种实验室前期预演,将为该方法的最终确立提供实验依据。

参考文献

- [1] LI X J, BAI J T, LI Y A, *et al.* Magnetic rotation imaging method to measure the geomagnetic field [J]. *Progress in Natural Science*, 2008, **18**(1): 21-26.
- [2] GE Y, HECZKO O, SÖDERBERG O, *et al.* Comparison of different methods for studying magnetic domains in Ni-Mn-Ga martensites [C]. *Materials Science & Engineering A, Proceedings of the 7th European Symposium on Martensitic Transformations, ESOMAT 2006*, 2008, **481-482**: 302-305.
- [3] KIM J W, KREYSSIG A, TAN L, *et al.* Imaging antiferromagnetic domains in GdNi₂Ge₂ with x-ray resonant magnetic scattering [J]. *Applied Physics Letters*, 2005, **87**(20): 202505.
- [4] DICKSON W, TAKAHASHI S, MCHUGH D, *et al.* Near-field second-harmonic imaging of magnetic domains [J]. *Journal of Applied Physics*, 2005, **97**(3): 033505.
- [5] LEE K, MELIKYAN H, BABAJANYAN A, *et al.* Visualization of magnetic domains by near-field scanning microwave microscope [J]. *Ultramicroscopy*, 2009, **109**(8): 889-893.
- [6] FERRARIA H, BEKERISA V, JOHANSEN T H. Magneto-optic imaging of domain walls in ferrimagnetic garnet films [J]. *Physica B*, 2007, **398**(2): 476-479.
- [7] MOSES A J, WILLIAMS P I, HOSHTANAR O A. Real time dynamic domain observation in bulk materials [J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2006, **304**(2): 150-154.
- [8] BOCKLAGE L, KRÜGER B, FISCHER P, *et al.* Analytical modeling and x-ray imaging of oscillations of a single magnetic domain wall [J]. *Physical Review B*, 2010, **81**(5): 054404.
- [9] MOORE T A, KLÄUI M, HEYNE L, *et al.* Domain wall velocity measurement in permalloy nanowires with X-ray magnetic circular dichroism imaging and single shot Kerr microscopy [J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2010, **322**(9-12): 1347-1352.
- [10] WANG X R, YAN P, LU J, *et al.* Magnetic field driven domain-wall propagation in magnetic nanowires [J]. *Annals of Physics*, 2009, **324**(8): 1815-1820.
- [11] CHENG Yu-hua, ZHOU Zhao-fei, YIN Bo-biao. Study on magneto-optical/eddy current imaging system for real-time testing [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2006, **14**(5): 797-801.
程玉华,周肇飞,尹伯彪. 磁光/涡流实时成像检测系统的研究 [J]. *光学精密工程*, 2006, **14**(5): 797-801.
- [12] HE Y Z, PAN M C, LU F L, *et al.* Pulsed eddy current imaging and frequency spectrum analysis for hidden defect nondestructive testing and evaluation [J]. *NDT & E International*, 2011, **44**(4): 344-352.
- [13] TAMBURRINO A, CALVANO F, VENTRE S, *et al.* Non-iterative imaging method for experimental data inversion in eddy current tomography [J]. *NDT & E International*, 2012, **47**: 26-34.
- [14] CHRISTIDES C, PANAGIOTOPOULOS I, NIARCHOS D, *et al.* Fast magnetic field mapping of permanent magnets with GMR bridge and Hall-probe sensors [J]. *Sensors and Actuators A*, 2003, **106**(1-3): 243-245.
- [15] ZENG Hai-fang, GU Guo-hua, HE Wei-ji, *et al.* Adaptive fusion algorithm of polarization images in visible light [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(1): 132-135.
曾海芳,顾国华,何伟基,等. 可见光偏振图像的自适应融合算法 [J]. *光子学报*, 2011, **40**(1): 132-135.
- [16] ZHOU Pu-cheng, ZHANG Hong-kun, XUE Mo-gen. Polarization image fusion method using color transfer and clustering-based segmentation [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(1): 149-153.
周浦城,张洪坤,薛模根. 基于颜色迁移和聚类分割的偏振图像融合方法 [J]. *光子学报*, 2011, **40**(1): 149-153.
- [17] FANG Shuai, ZHOU Ming, CAO Yang, *et al.* Scene segmentation of hazy image using polarization measurement [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(12): 1820-1826.
方帅,周明,曹洋,等. 基于偏振测量的雾天图像场景分割 [J]. *光子学报*, 2011, **40**(12): 1820-1826.
- [18] LI S H, LI X J. An experimental research on Faraday effect of magneto-optical medium [J]. *Key Engineering Materials*, 2012, **500**: 45-51.
- [19] 潘英俊,邹建. 光电子技术 [M]. 重庆:重庆大学出版社, 2000: 136.