

新型磁光介质——铁磁流体特性的研究

杜林, 林明晖, 王士彬, 孙才新

(重庆大学输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400044)

摘要: 分析表明现行几种磁光式光电电流互感器(MOCT)存在的问题均与所采用的磁光介质有关。针对现行磁光介质所存在的问题, 笔者对新型磁光介质——铁磁流体的特性进行初步地研究。结果表明: 铁磁流体在直流磁场作用下存在线性工作区域; 而在工频交流磁场作用时, 其响应并非是工频 50 Hz 信号输出, 而是工频的两倍——100 Hz 输出。分析表明: 与块状玻璃磁光介质相比, 铁磁流体所展示的法拉第磁光特性有较大差异。经初步推断, 铁磁流体异样的磁光特性应与其在磁场作用下线状链的形成密切相关。

关键词: 磁光式光电电流互感器; 水基 Fe_3O_4 磁流体; 磁场; 法拉第效应

中图分类号: TM201.4

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2009)03-0023-05

Characteristics of the New Magneto-optical Media——Magnetic Fluid

Du Lin, LIN Ming-hui, WANG Shi-bin, SUN Cai-xin

(State Key Laboratory of Transmission & Distribution Equipment and Power System Safety and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: The analysis indicates that the problems existing in several conventional magneto-optical current transducers are related to their magneto-optical media. Therefore, the characteristics of the new magneto-optical medium, magnetic fluid, are investigated in this paper. The results indicate that the magnetic fluid has an obvious linear working space under DC magnetic field, but under the power frequency (50 Hz) magnetic field, its response is the output signal with two times of the power frequency (100 Hz) instead of the power frequency output signal. Compared to the massive glass magneto-optical medium, the Faraday magneto-optical properties of the magnetic fluid are quite different. It is inferred that the strange magneto-optical characteristics of the magnetic fluid under magnetic field are closely related to the formation of the linear chain.

Key words: magneto-optical current transducer(MOCT); water-based Fe_3O_4 magnetic fluid; magnetic field; faraday effect

0 引言

目前所研究光学电流互感器多是以 Faraday 磁光效应为原理, 称为磁光式光学电流互感器(简称 MOCT)。MOCT 体积小、重量轻、结构简单, 没有铁心, 不存在磁饱和与铁磁谐振等问题; 另外, 光学电流互感器直接光纤传输、高低压完全隔离, 使绝缘设计简单实现, 频率响应范围宽, 动态范围大, 测量精度高, 适应电力系统数字化、智能化和网络化的趋势等优良特性。但是, 与传统电流互感器技术相比, MOCT 技术仍有不完善之处。从其在电力工业中得到实际应用的角度讲, 磁光式光学电流互感器还存在一些急需解决的、阻碍其实用化的技术问题。

笔者针对当前几种磁光式光电电流互感器存在的问题, 初步研究了新型磁光介质——铁磁流体的特性。

1 磁光式光学电流互感器存在的问题

MOCT 在技术上大体可分为两类: 一是全光纤型 MOCT, 传光与传感部分都采用光纤; 二是混合型 MOCT, 光线传输采用光纤, 而传感材料目前多采用的是块状玻璃晶体磁光材料^[1]。

1.1 全光纤 MOCT 存在的问题

目前阻碍全光纤 MOCT 实用化的主要问题是光纤存在双折射以及对振动等外界环境因素的敏感性, 其中以光纤存在双折射最为关键。光纤产生双折射的原因主要包括两个方面: 一是在光纤使用过程中外部施加的, 如光纤弯曲、缠绕等使光纤发生形变

收稿日期: 2008-04-21; 修回日期: 2008-12-13

基金项目: 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室自主项目资助(2007DA10512708302)。

作者简介: 杜林(1971), 男, 副教授, 主要从事电气设备绝缘在线监测研究。

导致光纤介质的光学各向异性而引起双折射；二是光纤内部固有的，如因制造工艺不完善等原因造成光纤截面产生椭圆度、材料分布不均匀及内应力等，导致光纤介质光学各向异性而引起双折射。

对光纤中弯曲等引起的双折射，其可以通过改进光纤缠绕来加以抑制，如“8”形缠绕法和四方形缠绕法等，但是，对抑制光纤内部固有的双折射就比较困难。目前可以通过3种方法来抑制双折射^[2]：一是通过改进工艺，降低光纤的非圆率和选择合适材料来降低光纤的内应力从而制造低双折射光纤，但是就目前的光纤制造工艺而言，难以满足上述要求；二是在光纤中引入大量的圆双折射以抑制线双折射；三是将光纤圈退火处理以消除线双折射，即退火光纤。理论分析表明：如果在单模光纤中引入大量的固有圆双折射，则可抑制该光纤的内在线双折射。但是，这些方法或是消除不了其双折射特性对外界温度敏感性，或是存在工艺技术等问题至今尚未实际应用。

综上所述，依目前的工艺技术水平，很难消除光纤双折射的影响。随着基于 Sagnac 干涉仪的光纤陀螺技术的实用化，近年来许多国内外研究者纷纷转向利用 Faraday 效应的非互易性采用 Sagnac 干涉仪实现检测，并取得了很大突破。

1.2 混合型 MOCT 存在的问题

目前，混合型 MOCT 所采用的磁光介质多以重火石玻璃晶体材料为主，但其仍存在一些缺点：磁光玻璃材料加工难度大、易碎而且成本高等；光在反射过程中引入的反射相移会使线偏振光变成椭圆偏振光而影响测量系统的性能。针对反射相移的影响，已有学者提出双正交反射方案、临界角反射方案和保偏反射膜方案等，取得了一定的效果。

但是，更关键的是磁光玻璃材料因温度变化引起的应力双折射问题，它使线偏振光变成椭圆偏振光，进而产生不必要的光强变化，并引起误差。温度引起的磁光玻璃双折射可分为两大部分^[1]，一部分与晶体制造过程的热历史有关，如对磁光玻璃或纤维，退火控制较为恰当的话影响也比较小；另一部分由于环境温度变化引起的暂时双折射，此部分与温度变化过程有关。此外，对应的温度场也分为两部分：一部分是均匀温度场，如环境温度变化极为缓慢时，可以认为光学材料处于均匀温度场中，暂时双折射效应比较小；另一部分是非均匀温度场，如通电导体中存在电流引起的阻抗功率消耗导致的发热，通过周围的空气传播。对于环绕周围的磁光晶体而言，这种温度场就是非均匀的。

温度引起的双折射问题给多年来研究带来了困难。虽然有研究者提出消除温度引起的测量误差的方法，此方法的主要思想是在确定线性双折射媒介

中存在的特征方向的基础上，建立起一种消除线性双折射的计算方法。但温度变化引起的双折射是随机的，与温度变化过程有关，对于温度变化引起的双折射媒介其特征方向也会变化，因此这种补偿方法具有局限性。

2 铁磁流体特性研究

由上述可以看出，现行几种 MOCT 所存在的问题主要是磁光介质材料制造工艺等引起的内部双折射及外界环境因素等引起的双折射。因此，有人就转向寻找新的磁光介质。

近来热门研究铁磁流体也是一种磁光介质。铁磁流体，是由粒径为纳米级的磁性颗粒，经表面活性剂活化处理后高度弥散于某种液体之中所形成的稳定的胶体体系。磁流体经受一般的离心力和磁场作用不会发生团聚或沉淀，既具有普通磁性材料的磁性，又具有液体的流动性，是一种新型的液体功能材料。铁磁流体的性能主要取决于铁磁性微粒和载液的性能，对磁性微粒和载液的选择决定了铁磁流体的应用领域和范围。与光纤和磁光玻璃材料相比，铁磁流体制备工艺成熟、成本低，并且不存在诸如光纤因制作工艺及弯曲等固有的或外界因素引起的双折射问题。因此，铁磁流体作为磁光介质有着天然的优势。

自 1971 年，美国麻省偏振实验室的 P.Golberg 等人发现铁磁流体的磁致旋光现象^[3]后，就有研究者开始致力于此种物质磁光效应的微观机理研究和应用研究。目前利用铁磁流体的磁光效应来检测电流的研究大都限于实验室阶段。文[4]曾利用铁磁流体在外加磁场作用下研究对激光光束的磁致双折射效应，用铁磁流体薄膜作为传感装置来测量 2-D 空间的磁场矢量。文[5, 6]利用自制水基 Fe_3O_4 磁流体的 Faraday 效应来研究用于磁场及电流的检测。他们得到该水基 Fe_3O_4 磁流体在直流磁场作用下的费尔德常数高达 $122.43 \times 10^3 \text{ rad} \cdot T^{-1} \cdot m^{-1}$ ，比磁光玻璃等其他已知常用的磁光介质的费尔德常数高出几个数量级之多，并且铁磁流体不存在内在固有的双折射^[7]，见表 1。另外该铁磁流体对磁场响应灵敏度高、响应快^[5]，并且可以检测低至 1.51 mA 的泄漏电流^[6]。

表 1 各种磁光介质的费尔德常数

序号	磁光介质	λ / nm	费尔德常数/ $(\text{rad} \cdot T^{-1} \cdot m^{-1})$
1	轻火石玻璃	589.3	3.17
2	重火石玻璃	589.3	8~10
3	铋磷酸玻璃	589.3	3.26
4	YIG	830.0	2.04×10^4
5	(YTb)IG	1 270.0	37.80
6	CS_2	589.3	4.17
7	水	589.3	1.31

2.1 水基磁流体样品

笔者研究所采用的水基 Fe_3O_4 磁流体是由安徽金科磁性液体有限公司提供的。该铁磁流体具有磁性颗粒粒径小(约 15 nm)、分布均匀、稀释稳定性强等特点。与湖南联众科技有限公司合作,测量该水基 Fe_3O_4 磁流体的磁特性,见图 1。从测得的磁滞回线和基本磁化曲线来看,该系列铁磁流体几乎无磁滞现象,具有超顺磁性。另外还测得这些不同浓度铁磁流体的饱和磁化强度为 10.45 mT。将这些铁磁流体注入可拆液体池中,可以制成光程 6~1 000 μm 的试验薄膜样品。

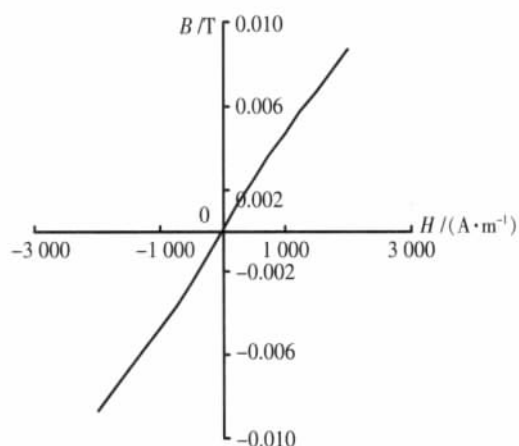


图1 铁磁流体磁滞回线和基本磁化曲线

2.2 实验平台

根据法拉第效应单光路检测法,笔者设计了一套用于研究铁磁流体磁光效应的实验平台,见图 2。由激光器产生的光束,经起偏器产生线偏振光,线偏振光通过置于磁场中的水基 Fe_3O_4 磁流体试样,经检偏器后垂直均匀传输至光电接收器上;光电接收器将接收到的光强信号转化为电压信号输入至数据采集卡,最后由计算机响应软件进行分析处理。

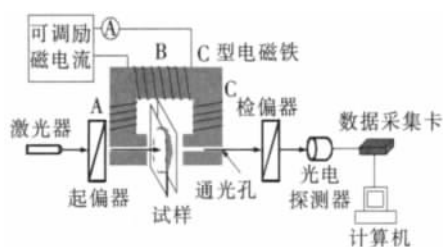


图2 实验平台总体示意图

实验装置中,产生磁场的 C 型电磁铁采用冷轧硅钢片制成,所绕线圈匝数为 250 匝。用 MODEL7010 特斯拉计对该 C 型电磁铁进行磁场标定。电磁铁两极头大小为边长 100 mm 的正方形柱,磁路中通有边长为 10 mm 的等高同轴正方形通光孔,确保入射光平行通过。两磁极间隙为 68 mm,以便安放薄膜样品。为确保测量的准确性,笔者采用稳定性较高、单色性较好的半导体激光器,其波长为 650 nm、功率 5 mW;

在光电探测单元,采用的是 S3590-08 光电探测器,其突出特点是暗电流小(2 nA)、光敏度大(0.46 A/W)且响应频率高(可达 40 MHz);在数据采集单元,采用的是美国 NI 公司生产的 NIUSB6211 数据采集卡,其最高采样频率为 400 kS/s,分辨率可达 16 bit,满足测量要求。

2.3 直流特性

为证明所发生的磁致旋光效应确实为磁场中的水基 Fe_3O_4 磁流体所作用,笔者在同样条件下分别用该铁磁流体载液——蒸馏水、空气和铁磁流体作试验。结果表明,法拉第磁光效应确实为磁场中的铁磁流体所致。整个实验过程是保持在室温(15 $^{\circ}\text{C}$)下进行的。

调节励磁电流以控制电磁铁产生的磁感应强度,以一定的步长反复输出 0~9 mT(不超过该铁磁流体饱和磁化强度)磁场,记录每次测得的探测器检测到的光强信号 I 。结果表明:在一定磁场强范围内,光强信号 I 随着磁感应强度 B 的增大而增大,随着磁感应强度 B 的减小而减小;改变磁场方向,重复上述过程,发现该过程与磁感应强度 B 的方向无关;但是当所加磁场大约超过 10 mT 时,探测器所探测到的透射光强会急剧下降,见图 3。当保持磁场不变(如 15 mT)时,透射光强仍继续下降,之后会缓慢停止变化,到光强停止变化有一定的滞后时间。当磁场下降时,光强会随之增大,当磁场大约降至 10 mT 时,光强停止增大;继续降低磁场,光强则随之线性减小。该整个过程也都与磁场的方向无关。反复试验亦如此。

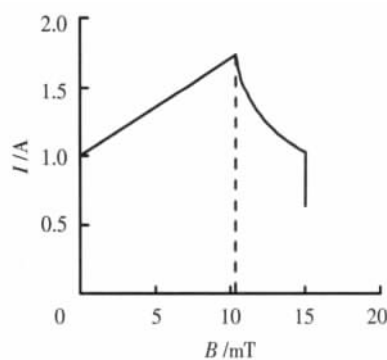


图3 直流磁场作用下光透射率变化情况

由上述实验结果看,铁磁流体存在线性工作区域。经反复实验,结果发现,饱和磁化强度是个关键点。在磁场小于该铁磁流体的饱和磁化强度时,该铁磁流体的磁致法拉第效应是随着磁场线性变化的。

另外,可以看出铁磁流体的这些特性与所熟知的块状磁光玻璃相比是明显不同的。首先,在直流磁场作用下,磁光玻璃的法拉第效应是与磁场方向有关的;再者,在超过一定磁场的情况下,磁光玻璃不存在有突变的情况。

2.4 交流特性

当在薄膜样品上施加工频交变磁场时,光电探测器所探测到的传输光强信号变化曲线是由两部分组成:一是直流信号部分,这部分信号是传输光入射至光电探测器所产生的电压信号;二是交变信号部分,这部分信号是铁磁流体被交变磁场调制时引起传输光强的变化所致。因此,光电探测器所探测到的整个信号的形式就是交变信号叠加于直流信号之上。

实验中,发现其交变信号并非是 50 Hz 的近似正弦或是余弦曲线,而是负半波沿横轴上翻,实际波形是二倍工频——100 Hz 的正弦或余弦曲线,见图 4。其交变波形幅值随着工频有效磁场强度的增大而增大,而直流信号值(称其为基线值)也会随着的磁感应强度的增大而增大,当磁场不变时,基线值是不变的。

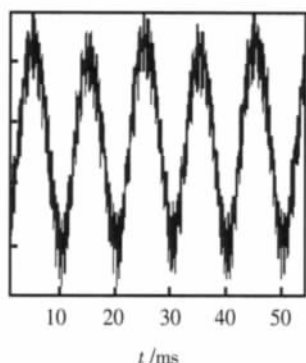


图 4 工频磁场作用下的光强变化图

另外,随着起偏器和检偏器偏振轴之间的夹角变化时,正负两半波会出现不对称,它们的幅值会产生一定差值。笔者将正负半波之间幅值之差的绝对值与它们的基线值之比定义为不对称度,则在施加工频交变电流有效值 1 A (磁感应强度为 4.6 mT)、样品薄膜光程为 6 μm 时,该铁磁流体在工频交变磁场作用下的不对称度与起偏器和检偏器偏振轴之间的夹角的关系见图 5。可以看到,起偏器和检偏器偏振轴之间的夹角为 0°时,该铁磁流体对交流正负半波的响应是最对称的,并且当起偏器和检偏器偏振轴之间夹角变大时,其不对称度也随之变大。

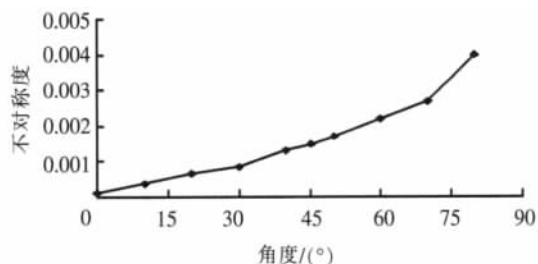


图 5 正负半波不对称度与起偏器和检偏器偏振轴之间的夹角的关系曲线图

铁磁流体以上所显示交流特性与块状玻璃磁光

介质相比有很大差异。

首先,通过块状玻璃磁光介质的偏振光在被工频交变磁场调制时,最后所得到的信号也是工频 50 Hz 的,而非铁磁流体的二倍工频。文[8]所描绘的信号都是 50 Hz 正弦或余弦曲线,且其基线值是不会随着磁场的变化而变化的。

根据法拉第效应单光路检测法及马吕斯定律可知,对于块状透明磁光玻璃而言,平面偏振光 I_0 通过磁场中的介质和检偏器后的光强为

$$I = I_0 \cos^2(\alpha - \theta) \tag{1}$$

式(1)中, α 为起偏器和检偏器透光轴的夹角, θ 为磁致旋光角。

当起偏器和检偏器的偏振轴夹角 α 为 45°, 此时 $dI/d\theta = 1$, 调制系统的信号检测灵敏度最高,失真最小,对交流响应时的正负半波也应是最对称的。

但是,在交变磁场作用下,该铁磁流体所呈现的并不是在起偏器和检偏器的偏振轴夹角 α 为 45° 时最对称,而是 0° 时最对称。由见图 6 可以看到,不同起偏器和检偏器的偏振轴之间的夹角变化时,其平均幅值与基线值之比的相对变化量都在 0.002 左右,并无大的变化。虑及测量误差的影响,铁磁流体的法拉第磁光效应在各角度的灵敏度几乎是不变的。也就是说其灵敏度也并非起偏器和检偏器的偏振轴之间的夹角 α 为 45° 时最高。

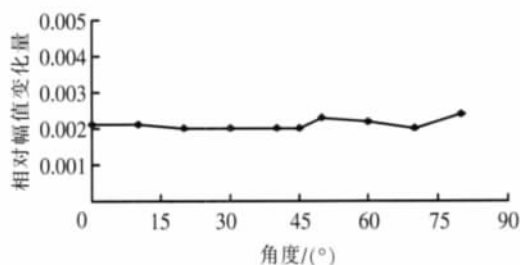


图 6 不同起偏器和检偏器偏振轴之间夹角铁磁流体的响应灵敏度

2.5 响应线性度

设定起偏器和检偏器偏振轴之间夹角为 0°, 此时正负半波最对称, 调节励磁电流以控制电磁铁产生的磁感应强度, 以一定的步长输出磁场, 但不超过对应浓度的水基 Fe_3O_4 磁流体饱和磁化强度, 光程为 6 μm, 得到该水基 Fe_3O_4 磁流体对工频交变磁场的响应情况, 见图 7。在数字处理上, 笔者取交变信号的幅值与其基线值之比的相对幅值的办法来消除因激光光强的不稳定所带来的测量误差。由图 7 可以得到, 虽然铁磁流体对交流的响应存在特殊现象, 但是其响应产生的交流幅值的相对变化的线性度达到 0.99 以上。

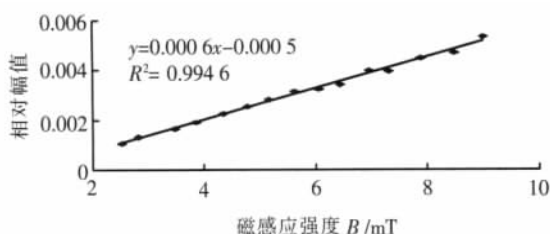


图7 铁磁流体随着磁场变化的响应曲线

3 讨论

铁磁流体以上所显示交直流特性都与块状玻璃磁光介质相比有着很大的差异,有违经典的法拉第磁光效应。从结构而言,铁磁流体与块状玻璃磁光介质明显不同:块状玻璃磁光介质是晶体结构;铁磁流体则是种胶状液体结构。而目前对于铁磁流体产生磁光效应的机理尚处于争论之中,还没有定论。先是文[9]认为是铁磁流体的磁化导致法拉第旋转和传输光强的改变,继而文[10]又形成两种不同的理论:一是定向理论;另一是形成理论。前者认为是磁性颗粒或其聚集体在外加磁场作用下在溶液中表现出各向异性所致;而后者认为是磁性颗粒在外加磁场作用下聚集形成与外加磁场平行的线状链结构从而产生光学各向异性导致的。多数学者倾向于后者,即形成理论。文[11]从理论上明确提出:磁性颗粒沿外加磁场方向成线状链是引起其磁光效应的根本原因。文[12]用显微镜观察了铁磁流体在外磁场作用下的磁链分布,进一步证实了线状链结构理论。相比而言,文[13-15]对铁磁流体法拉第磁光效应做了较为全面系统和深入的研究,认为磁场作用下线状链的存在是铁磁流体产生法拉第旋转的重要因素。他们还指出平行于磁场方向的偏振光在磁场作用下透射铁磁流体时的光强变化不仅与法拉第旋转有关,而且与平行于磁场方向的线状链的形成有关。

笔者经分析也初步认同该水基 Fe_3O_4 磁流体的上述异样的法拉第磁光特性与其在磁场作用下线状链的形成密切相关。是否如此及具体成因,有待进一步研究。

4 结语

研究表明:在直流磁场作用下,铁磁流体存在线性工作区域;而在工频交流磁场作用时,其响应并非工频 50 Hz 信号输出,而是工频的两倍——100 Hz 输出;并初步推断,铁磁流体异样的磁光特性应与其在磁场作用下线状链的形成密切相关。

从以上研究结果看,虽然在铁磁流体存在交流作用下表现出了异样特性,但是总体来说铁磁流体

对交直流都能较好地响应,这为研制新型磁光式电流互感器提供一个良好的契机。接下来要进一步确定应用铁磁流体测电流的精度、灵敏度和频率特性,以及在温度场和应力场等作用下的影响情况。

参考文献:

- [1] 马仙云, 苏进喜, 吴维韩, 等. 磁光式光电电流互感器幅值精度的研究[J]. 清华大学学报(自然科学版), 1997, 37(4): 89-92.
- [2] 廖延彪. 偏振光学[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [3] 潘应天, 刘贤德, 李再光. 磁性液体磁光特性及其应用研究[J]. 红外技术, 1991, 14(5): 41-45.
- [4] HIKIHARA T, HIRANE Y. A Measurement of a Magnetic Field Vector Application of the Magneto-birefringence Effect by Magnetic Fluid [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 1992, 39(5): 392-397.
- [5] CECELJA F, RAKOWSKI R, MARTINEZ L. Ferrofluid-based Magnetic Field Sensor [C]// Instrumentation and Measurement Technology Conference, Proceedings of the IEEE, 2005: 612-616.
- [6] MARTINEZ L, RAKOWSKI R, CECELJA F. Design of a Magneto-optic Residual Current Device Using Aqueous Ferrofluid as the Sensing Material [C]// Instrumentation and Measurement Technology Conference, Proceedings of the 21st IEEE, 2004: 804-807.
- [7] MARTINEZ L, CECELJA F, RAKOWSKI R. A Novel Magneto-optic Ferrofluid Material for Sensor Applications [J]. Sensors and Actuators A, 2005(123-124): 438-443.
- [8] 于文斌. 光学电流互感器的性能分析与试验研究 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2006, 38(3): 353-356.
- [9] DAVIES H W, LLEWELLYN J P. Magneto-optic Effects in Ferrofluids[J]. J. Phys. D., 1980(13): 2 327-2 336.
- [10] SOCOLIUC V, RASA M, SOFONEA V, et al. Agglomerate Formation in Moderately Concentrated Ferrofluids from Static Magneto-optical Measurements [J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 1999, 191(1-2): 241-248.
- [11] TAKETOMI S. Magnetic Fluid's Anomalous Pseudo-cotton Mouton Effects about 107 Times Larger than that of Nitrobenzene[J]. Japan. J. Appl. Phys., 1983, 22(7): 1 137-1 140.
- [12] JONES G A. Aggregation of Water-based Magnetic Liquids Observed with the Polarising Microscope[J]. J. Phys. D: Appl. Phys., 1985(18): 1 281-1 290.
- [13] ROUSAN A A, ELGHANEM H M, YUSUF N A. Faraday Rotation and Chain Formation in Magnetic Fluids [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1989, 25(4): 3 121-3 124.
- [14] YUSUF N A, ROUSAN A A, ELGHANEM H M. Determination of Faraday Rotation in a Ferrofluid [J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 1987(65): 282-284.
- [15] YUSUF N A, ABUALJARAYESH I, ROUSAN A A, et al. On the Concentration Dependence of Faraday Rotation in Magnetic Fluids [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1989, 26(5): 2 852-2 855.