

文章编号: 0253-2239(2007)06-1049-3

磁性流体薄片高电压电流光学测量的研究

陆樟献¹ 陈善飞¹ 陈建萍²

(¹ 浙江万里学院应用物理研究所, 宁波 315101)
(² 宁波中化国际仓储运输有限公司, 宁波 315010)

摘要: 研究一种用磁性流体薄片对高压电流进行光学测量的电流传感器。设计原理基于磁性流体的光透射率随垂直磁场强度的变化而变化的关系。磁性流体受到垂直外磁场作用, 原先无序的磁性颗粒将凝聚在一起形成条条磁链, 从而引起磁性流体的光透射率的变化。采用磁性流体作为传感媒介设计的传感结构避免了基于法拉第效应的光磁式电流互感器对环境干扰敏感造成信噪比不高和传统的电磁式电流互感器的高压绝缘的缺陷。通过改变磁性流体的浓度和基液, 或者改变传感头的结构, 来达到实际需要的传感灵敏度和响应时间。

关键词: 光学测量; 传感器技术; 磁性流体、电流传感器

中图分类号: TP212.14 文献标识码: A

A Study of the Optical Measurements of High-Voltage Current Using Magnetic Fluid Films

Lu Zhangxian¹ Chen Shanfei¹ Chen Jianping²

(¹ Research Department of Applied Physics, Zhejiang Wanli Institute, Ningbo 315101)
(² Sinochem Intertrans Ningbo Co. Ltd., Ningbo 315010)

Abstract: A type of current transducer to the optical measurements of high-voltage current using ferrofluid films has been studied. The basic operation principle and design of the novel sensor is based upon the field-dependent transmittivity. When a thin film of ferrofluids is subjected to a magnetic field applied which is perpendicular to the plane of film, a portion of magnetic particles is condensed out from the initially monodispersed magnetic fluid and forms magnetic chains, then the optical transmittivity of the ferrofluid changes. The main advantage of this method in comparison with the optical current transformer on Faraday effect and the conventional electromagnetic current transformer avoids problems in the low SNR and the high-voltage isolation. The sensitivity and response time can be tailored during fabrication to suit the application by changing the concentration, liquid carrier or changing the configuration of the transducer cell.

Key words: optical measurement; transducer technique; ferrofluid; current transducer

1 引言

目前电力系统中电流测量传感器主要为传统的电磁式电流式传感器和基于法拉第效应的光磁式电流互感器^[1~5]。前者在应用中存在以下问题: 1) 在电网故障时, 强大的冲击电流会造成互感器的磁路饱和; 2) 高电压等级的电流互感器绝缘技术困难, 体积笨重, 绝缘费用巨大; 3) 以油作为绝缘及传热介质时存在爆炸危险。后者依靠对偏振光信号调制的监测和处理, 系统中的保偏装置易受环境温度干扰。

磁性流体是一种稳定的胶体, 是利用表面活性剂将 10 nm 左右的磁性颗粒均匀分散在基液中制

成的悬浮液^[6,7]。在垂直外磁场作用下, 磁性流体的光透射率将发生变化^[8]。本文基于磁性流体薄片的光透射率与外加垂直磁场强度的关系, 用自制的磁性流体制作磁性流体薄片, 设计了一种双光路的高电压电流测量系统, 降低温度对测量的影响, 避免了对偏振光的依赖, 提高了系统的信噪比。

2 原理

当外加垂直磁场强度为零时, 磁性微粒均匀地弥散在磁性流体中, 呈现液体状态。当外加磁场强度增强时, 原先均匀弥散在磁性流体中的磁性颗粒凝聚在

一块形成磁链。磁链将阻碍光在磁性流体中的传播,只有流体部分可以通光,所以磁性流体薄片液体部分的有效密度和面积比率决定磁性流体的透光能力。在外加垂直磁场下液相的有效密度为 $M_{s,eff}$ ^[8]:

$$M_{s,eff} = M_s \left(1 - \frac{A_{col}}{A} \frac{\rho_{col} M_{col}}{\rho M_s} \right) / \left(1 - \frac{A_{col}}{A} \right), \quad (1)$$

式中 M_s 是指每克磁性流体的饱和磁化强度, M_{col} 是指每克磁链的饱和磁化强度, ρ 表示磁性流体的密度, ρ_{col} 表示磁链的密度, A 是指磁性流体薄片的截面积, A_{col} 是指面积 A 中磁链所占的截面积。

当光束垂直磁性流体表面入射时,外磁场方向平行光束方向,那么光在磁性流体薄片的透射率 T 为^[8]

$$T(H) = \frac{I}{I_0} \left| M_{s,eff}(H) \times \frac{A - A_{col}}{A} \right|_H. \quad (2)$$

3 实 验

3.1 磁性流体的制备

将稀释的 $FeCl_2 \cdot 4H_2O$ 和 $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ 按一定的比例放入烧杯混合,加热到温度为 $70^\circ C$ 左右,再加入温度为 $70^\circ C$ 左右的过量的 NH_4OH 和一定量的表面活性剂,然后连续高速搅拌 30 min。接着让溶液自然冷却,在烧杯外底部放置一强磁体,将烧杯和磁体一起倒置在玻璃器皿上(如图 1),分离出外表裹有表面活性剂的磁性颗粒。

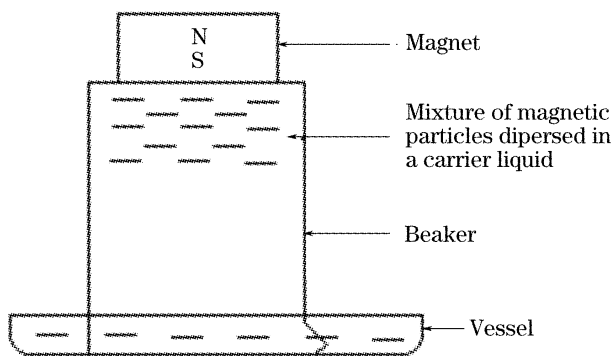


图 1 磁性流体制备示意图

Fig. 1 Schematic diagram of preparation of ferrofluids

将烧杯倒回,取走磁体,往里面倒入基液,在烧杯外底部放置一强磁体,将烧杯和磁体一起倒置在玻璃器皿上,吸油后的磁性微粒在磁场作用下克服重力保持在杯底,静置一段时间后,未被磁性微粒吸附的基液和颗粒就会完全流入玻璃器皿中,再将烧杯倒回,取走磁体。重复多次,可以得到一份掺杂较少的磁性流体。磁性流体的浓度可以通过改变基液量来调节。

3.2 磁性流体薄片的制作

把 $22\text{ mm} \times 24\text{ mm} \times 0.17\text{ mm}$ 盖玻片放进垫有过滤纸的烧杯内,倒入一定量的无水酒精,用超声波清洗,清洗三次,放置在一边晾干;然后在盖玻片的其中一面用胶纸覆盖,再在盖玻片的另一面的正中间位置粘上内直径 2 mm,外直径小于 20 mm 的圆环胶纸;接着把盖玻片放入温度 $7^\circ C$ 的氢氟酸溶液里进行腐蚀 3 min,在盖玻片一面将腐蚀出内直径约 2 mm、深度约 $11\ \mu\text{m}$ 的浅槽;用蒸馏水冲洗,再用无水酒精剥离胶纸,最后用超声波对盖玻片多次清洗;待盖玻片上的无水酒精蒸发后,往浅槽里注入一定量的磁性流体,盖上已清洗好的未腐蚀盖玻片,用 502 胶水在圆环外周围密封,制成磁性流体薄片。

3.3 双光路系统

实验装置如图 2 所示,1557 nm 波长的半导体激光器经 50:50 的光纤耦合器分别进入外面绕有螺旋线圈(匝数为 8000)的磁性流体薄片和外面没有螺旋线圈的磁性流体薄片,然后经光纤进入光电二极管,再由双通道模-数采集卡输到计算机处理。螺旋线圈中的电流由计算机控制,可生成直流和交流,磁性流体薄片上的磁场强度可以通过毕奥-萨伐尔定律计算得到。

由于采用双光路系统,磁性流体薄片放在同一个密封铝盒中,中间采取了磁屏蔽,也就是通过调节螺旋线圈上的电流来调节一块磁性流体薄片上所加的磁场强度大小,而另一片磁性流体薄片不受外界和相邻磁场的影响,这样达到了两块磁性流体薄片的温度变化相同。在数据处理中利用双光路的光强度之比来达到测量螺旋线圈中的磁场强度大小的目的,又由于螺旋线圈中的强度取决于线圈上所流过的电流强度,所以双光路的光强度之比值变化反映

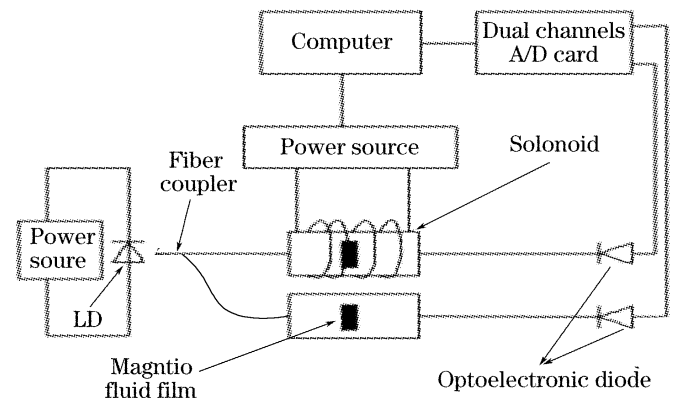


图 2 双光路测量系统示意图

Fig. 2 Schematic diagram of bi-optic-path measurement system

电流强度的变化情况。利用这种光路设计,由于薄片的半径做得很小时,从而几乎可以忽略磁性流体热透镜效应,即使存在热透镜效应,因为两片磁性流体薄片的温度相近或变化相同,也可以达到降低噪声的目的。同时双光路系统能有效消除激光功率涨落对测量的影响,从而提高了系统的稳定性和灵敏度。

4 实验结果的分析 and 讨论

利用计算机控制线圈上通过的电流强度逐渐增大,同时通过数据采集卡记录双光路上的光强(即电压),从而得到光强之比,也就是透射率 T 与电流 I 之间的关系曲线,如图 3 所示。利用毕奥-萨伐尔定律可近似计算出磁性流体薄片上的磁感应强度。

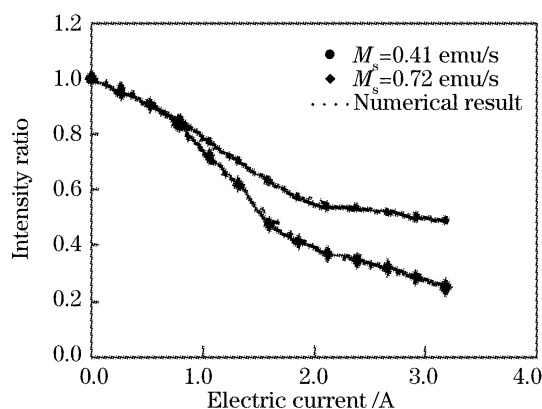


图 3 双光路强度比值与电流强度的关系曲线
Fig. 3 Relationship between the intensity ratio and electric current

从图 3 的曲线可以看出,双光路光强比与电流强度是单值函数关系,所以可以通过插值法测量电流强度大小;实验结果与理论值^[8]非常吻合,故可以利用公式由透射光的光强比值推算出电流强度;不同浓度的磁性流体有着不同的灵敏度,浓度越高,灵敏度越高。

在实验过程中,虽然所加电流远没有达到高压电流(约 1000~2000 A),但是由于线圈匝数比较大,所以较小的电流就能产生很强的磁场强度;如果减少线圈匝数,则必须增大电流强度才能达到同样的磁场强度。比如线圈匝数减少到 10 匝,则所加电流要高达 2400 A 才能达到 8000 匝下的 3 A 电流的效果。所以在实际应用中,只要充分考虑到实际应用范围,可以相应地改变线圈匝数来调整灵敏度范围,从而满足高压电流测量的目的。

磁性流体虽然存在着一定的弛豫效应,不过根据 Liu Xiaodong^[9]和 S. Y. Yang^[10]等的实验结果得知:不同基液的磁性流体有着不同的响应时间,长达两三

百秒,小至几十微秒。所以我们可以根据实际需要,通过选择合适的磁性流体颗粒成分、浓度、基液来选择合适的响应时间,从而达到实际应用的要求。

5 结 论

实验结果表明:基于磁性流体的光透射率与外加磁场强度之间的关系设计的电流光学测量系统,无须使用保偏装置,避免了保偏光纤或保偏装置对环境敏感的问题;并且可以针对不同用户的要求,通过选用不同浓度和基液的磁性流体,以及改变传感头的结构来设计出不同灵敏度的传感系统。磁性流体的磁光效应存在着弛豫效应,影响了磁性流体在交流电和变化磁场的测量中的使用,故要将该系统用于实际的应用,还需更深入的研究。

参 考 文 献

- Dong Xiaopeng, Chu B C B, Chiang Kin Seng. Twisted fibre electric current sensor with compensation for arbitrary bias phase shift[J]. *Acta Optica Sinia*, 1999, **19**(7): 981~987 (in Chinese)
董小鹏, Chu B C B, Chiang Kin Seng. 可补偿偏置漂移的扭转光纤电流传感器[J]. *光学学报*, 1999, **19**(7): 981~987
- Katsukawa H, Ishikawa H, Okajima H. Development of an optical current transducer with a bulk type Faraday sensor for metering[J]. *IEEE Trans. Power Delivery*, 1996, **11**(2): 702~707
- Zhang Xueliang, Zhou Xiao, Hu Yongming et al.. All polarization-maintaining fiber earth magnetic field sensor[J]. *Chin. J. Lasers*, 2005, **32**(11): 1515~1518 (in Chinese)
张学亮,周晓军,胡永明等. 全保偏光纤地磁传感器[J]. *中国激光*, 2005, **32**(11): 1515~1518
- Jiao Binliang, Wang Zhaohui, Zheng Shengxuan. A configuration of optical fiber current transducer for elimination of vibration effect[J]. *Chin. J. Lasers*, 2004, **31**(4): 469~472 (in Chinese)
焦斌亮,王朝晖,郑绳植. 用于消除振动影响的光纤电流传感器结构[J]. *中国激光*, 2005, **31**(4): 469~472
- Liu Bin, Zhang Junzheng, Zhang Qiuchan. Designing of an optic fiber interferometer high-voltage current sensor[J]. *Acta Optica Sinia*, 2002, **22**(3): 351~354 (in Chinese)
刘彬,张君正,张秋婵等. 一种光纤干涉式高压电流传感器的设计[J]. *光学学报*, 2002, **22**(3): 351~354
- K. Raj, R. Moskowitz. Commercial applications of ferrofluids [J]. *J. Magn. Magn. Mater.*, 1990, **85**(1~3): 233~245
- Wang Zhengliang, Chen Shanfei. Photoc birefringence effect of magnetic fluid in magnetic field[J]. *Optical Technique*, 2003, **29**(1): 119~124 (in Chinese)
王正良,陈善飞. 磁性液体在磁场中产生光的双折射效应机理[J]. *光学技术*, 2003, **29**(1): 119~124
- S. Y. Yang, Y. P. Chiu, B. Y. Jeang. Origin of field-dependent optical transmission of magnetic fluid films[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2001, **79**(15): 2372~2374
- Liu Xiaodong, Li Jian, Lin Yueqiang et al.. Field-induced relaxation behavior of transmitted light through ferrofluids[J]. *J. Southwest China Normal University (Natural Science Edition)*, 2004, **29**(5): 758~761
- S. Y. Yang, Y. T. Hsiao, Y. W. Huang et al.. Retarded response of optical transmittance through a magnetic fluid film under film under switching-on/off external magnetic fields[J]. *J. Magn. Magn. Mater.*, 2004, **281**: 48~52