

文章编号 1004-924X(2009)10-2445-05

光纤磁流体 F-P 电磁场传感器

胡 涛¹, 赵 勇², 吕志伟¹, 陈菁菁²

(1. 哈尔滨工业大学 自动化测试与控制系, 黑龙江 哈尔滨 150001;

2. 东北大学 信息科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110004)

摘要: 基于磁流体的可控折射率特性, 以磁流体纳米功能材料为腔内介质, 提出一种结构简单、无移动部件的新型光纤 F-P 电磁场传感器, 实现了电磁场的测量。同时, 给出了基于光纤光栅波长解调技术对光纤 F-P 滤波器输出波长进行解调检测的方法。分析了磁流体的可控折射率特性及其用于测量电磁场的原理, 介绍了传感器系统的结构和原理。对所提出的方法以及影响测量结果的因素进行了初步的实验, 结果表明, 环境温度和磁流体薄膜厚度都会对测量结果有影响。在磁流体薄膜厚度为 $12.7 \mu\text{m}$ 时, 测量特性具有较好的线性度。

关键词: 光纤 F-P 滤波器, 磁流体, 光纤传感器, 电磁场测量

中图分类号: TN253 **文献标识码:** A

Fiber optic electromagnetic sensor based on magnetic fluid

HU Tao¹, ZHAO Yong², LÜ Zhi-wei¹, CHEN Jing-jing²

(1. *Department of Automatic Measurement and Control, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China; 2. College of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110004, China*)

Abstract: On the basis of the controllable refractive index of a magnetic fluid, a novel fiber optic F-P electromagnetic sensor characterized by simple structures and no moveable parts is developed by using the magnetic fluid as the medium in a F-P interference cavity. Then, a signal demodulation method based on fiber Bragg grating wavelength scanning is proposed. The principle of electromagnetic-controlled refractive index of the magnetic fluid is described and the structure of the sensor system is given. Preliminary experiments are carried out, obtained results show that the thickness of magnetic fluid film and environmental temperature all affect the measurement results. When the thickness of magnetic fluid film is $12.7 \mu\text{m}$, there is a fairly good linearity of the measurement characteristic.

Key words: fiber optic F-P filter; magnetic fluid; fiber optic sensor; electromagnetic measurement

1 引言

电力系统中的电流测量长期依靠传统的电磁式电流互感器,而这种测量存在以下问题:在电网故障时,大的冲击及工频电流会造成互感器的磁路饱和;高电压等级的电流互感器绝缘技术困难、体积笨重,绝缘费用也很大;油作为绝缘及传热介质存在爆炸的危险。因此,多年来很多国家都在积极寻求非电磁式的高电压大电流测量方法。目前光磁式电流互感器(Optical Current Transformer,简称 OCT)已经研制成功,有些已进入实用阶段。OCT 可能成为传统电磁式电流互感器的替代产品,然而,目前大部分光学电流互感器都依靠对偏振光信号的检测和处理,因而需要复杂的保偏装置。

磁流体即磁性液体(magnetic liquid),也称磁性流体(magnetic fluid),是一种具有随外加磁场强度变化控制流变特性的特殊的纳米智能材料^[1]。磁流体传感器(Magnetic Fluid Sensor, MFS)是磁流体应用的一个重要方面。罗马尼亚学者 Baltag 等人研制了一种磁流体倾斜传感器^[2],在一个非磁性容器中部分填充磁流体,外面缠绕激励线圈和检测线圈,当容器有水平倾斜改变时,磁流体就发生流动,在不同的截面上的感生电势和磁流体的截面积有关,通过检测线圈输出即可得到水平倾斜角。Papa 等人研制了一种磁流体气体微流量传感器^[3],利用气泡通过放在磁流体中的线圈时线圈会发生电势变化的特性,通过记数单位时间线圈电势变化的次数以及单个气泡的体积来得到流量的变化。Cotae 等人研究磁流体作为电介质材料的电容式传感器^[4],随着磁流体中磁性微粒体积分数的增加,磁流体的电介质常数呈线性增大,随着磁场的增加,在磁场垂直于电场的方向,电介质常数呈线性减少;在磁场平行于电场的方向,电介质常数呈线性增大,利用这些性质来检测外磁场的大小。

当外加磁场的大小超过某个临界值时,磁流体中磁性颗粒还会发生团簇,进而磁流体的折射率会发生变化,且变化的大小与外加磁场的大小有关,据此可以利用磁流体来制作可调谐光子器件。

本文基于磁流体的可控折射率特性,结合光

纤 Fabry-Perot(F-P)谐振腔结构和光纤光栅波长检测技术,提出了一种电磁场测量方法。

2 测量原理

若对磁流体薄膜(Magnetic Fluid Film, MFF)(厚度 $\sim 10 \mu\text{m}$)施加垂直膜面的外磁场,随着磁场 H 增强,弱絮凝结构增多,这可以看成磁流体出现“相”分离,即液相与“磁球链”表现的磁柱相分离。因此,磁流体体系的等效介电常数发生变化,从而导致折射率变化。

磁流体中相分离后,磁柱高度与 MFF 厚度一样^[5],故 MFF 可看作“二维二相”体系。根据早已建立的“二维二相”体系等效介电常数计算方法^[6],有:

$$\epsilon_{\text{MF}} = \frac{-\epsilon_{\text{col}}(1-f) - \epsilon_{\text{liq}}(f-1) + \sqrt{[\epsilon_{\text{col}}(1-f) + \epsilon_{\text{liq}}(f-1)]^2 + 4(1+f)^2 \epsilon_{\text{col}} \epsilon_{\text{liq}}}}{2(1+f)} \quad (1)$$

其中: ϵ_{col} 为磁柱的介电常数,与外磁场无关; ϵ_{liq} 为液相的介电常数,与磁流体原始浓度 M_s 有关,即 $\epsilon_{\text{liq}} = (0.1573M_s + 1.3283)^2$ 。

定义 $f = (A_{\text{col}}/A)/(1 - A_{\text{col}}/A)$,其中 A_{col} 为在 MFF 一定表面积 A 中磁柱所占的面积。

由关系式 $n_{\text{MF}} = \sqrt{\epsilon_{\text{MF}}}$ 即可求出在不同的外加磁场 H 的作用下,磁流体的折射率的变化,如图 1 所示^[7]。

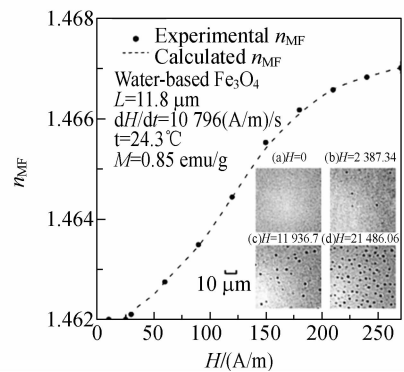


图 1 磁流体折射率与外磁场强度关系曲线

Fig. 1 Relationship of refractive index of magnetic fluid and magnetic intensity

可调谐光纤 F-P 滤波器是一种对不同的光波长有不同的损耗的器件,在某一波长(λ)具有低

损耗,为一带通滤波器,且通带是可以调谐的。其实际上是一种多光束干涉腔结构,原理如图 2 所示。

其透射特性可表示为:

$$I_t = \frac{T^2}{1+R^2-2R\cos\delta} I_i = \frac{T^2}{(1-R)^2+4R\sin^2(\delta/2)} I_i, \quad (2)$$

其中: I_i 为入射光场的光强; I_t 为出射光场的光强; R, T 为镜面的反射率和透射率(在理想状况下, $R+T=1$), δ 为相邻两束光的相位差:

$$\delta = \frac{4\pi}{\lambda} nL \cos \theta, \quad (3)$$

其中 θ 为入射角, n 为腔中介质折射率, L 为腔长。调谐光波长 λ 使得 δ 满足 $\delta = m \cdot 2\pi$ (m 为正整数) 时有极大透过峰, 从而使 F-P 腔具有波长选择透过特性, 起到滤波的效果。

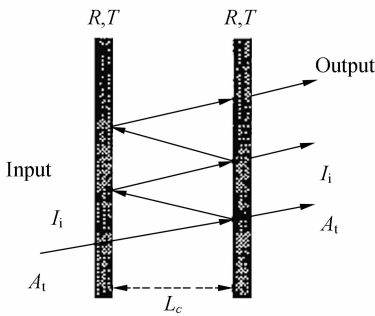


图 2 光纤 F-P 滤波器原理

Fig. 2 Principle of fiber optic F-P filter

从式(3)可见,调谐 F-P 光滤波器的滤过波长,一般有两种方法,即改变 F-P 腔长或者改变腔内介质的折射率。改变腔长又可有机械移镜和利用压电材料(PZT)两种基本办法。而要想通过改变腔内介质折射率实现滤波器的调谐,一般需要使用到特殊的材料,如液晶或者某些半导体。在 F-P 谐振腔内充入这种特殊材料,然后通过调谐加在特殊材料上的电压改变其折射率,从而改变谐振频率,即实现对滤波性能的调谐。

本文提出利用磁流体作为光纤 F-P 腔的腔内介质,通过调制被测电磁场来改变腔内磁流体的折射率,从而改变滤波器的输出波长,再利用光纤光栅波长调谐装置对 F-P 腔滤波器的输出波长进行调谐检测,从而实现电磁场的测量。

系统的原理结构图如图 3 所示。宽谱光源

(BBS)发出的光传至光纤 F-P 滤波器,在滤波器的谐振腔内装有磁流体(magnetic fluid);自聚焦透镜构成的 F-P 腔和腔内磁流体都被固定在玻璃管内,滤波器输出的波长信号经过光纤耦合器(couple)传至光纤光栅,光纤光栅粘结在槽形悬臂梁(channel-type cantilever)的自由端,压电陶瓷微位移驱动装置(PZT)可使槽形悬臂梁自由端产生微小的位移变化,这个微小的位移变化将导致光纤光栅反射波长的改变。光纤光栅的波长解

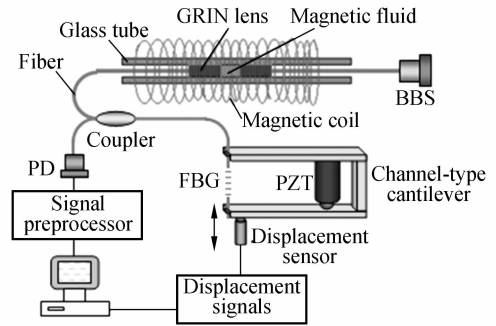


图 3 测量系统的原理框图

Fig. 3 Structure of measurement system

调过程是对光纤 F-P 传感器探头的输出信号进行实时扫描,光纤 F-P 传感器输出信号经过来至 PZT 的周期驱动信号使得槽形悬臂梁产生周期性的位移变化,即光纤光栅产生周期的应变,对传感器输出信号进行周期性扫描,当解调系统使得光纤光栅的反射波长与传感器输出的信号波长一致时(即达到匹配时),光电探测器(PD)处将有最大的输出电压,此时通过位移传感器记录槽形悬臂梁自由端位移的大小;当被测电磁场变化时,光纤 F-P 传感器的输出波长会产生变化,此时要想光纤光栅的反射波长与其相匹配,PZT 的驱动电压就要改变到一定的数值,以使槽形悬臂梁的自由端有相应的位移变化,拉伸光纤光栅使之产生应变,进而改变光纤光栅的反射波长,使之与变化的传感器输出波长再次匹配。若以一定的间隔改变被测电磁场的大小,同时记录使得光纤光栅反射波长与传感器输出波长达到匹配时的槽形悬臂梁位移的大小,就可以建立起被测电磁场和悬臂梁自由端位移的关系。这里需要说明的是,解调系统没有直接利用 PZT 的驱动电压的大小和被测电磁场的关系,而是通过位移传感器测得悬臂

梁的位移,是因为 PZT 的特性存在一定的磁致回滞现象,而直接测量悬臂梁自由端的位移可以直接反映光纤光栅所受应变,即反射波长的大小,从而一定程度上减小了测量误差。

3 初步的实验结果

为了对本文提出的光纤 F-P 滤波器结构和电磁场测量方法进行验证,进行了初步的实验。实验选用宽谱光源(BBS)为 ASE 光源,其输出波长范围为 1 525~1 565 nm,输出总功率为 23 mW;电磁线圈(magnetic coil)的匝数为 100,内径为 10 mm,长 60 mm;光纤 F-P 腔由两个带有尾纤的自聚焦透镜(GRIN lens)构成,自聚焦透镜端面镀膜,以提高反射率;腔长为 12.7 μm ,图 4 为光纤 F-P 滤波器实物照片。

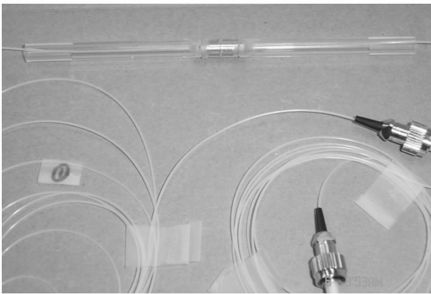
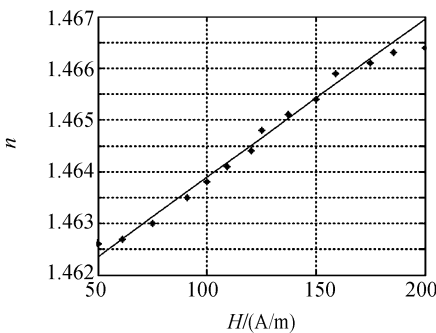


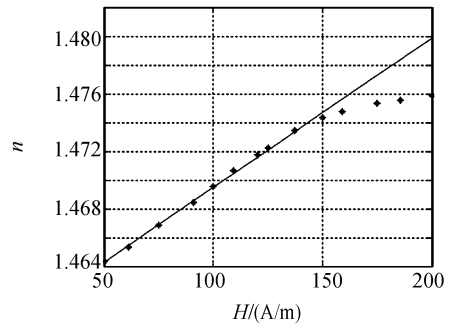
图 4 光纤 F-P 滤波器实物照片

Fig. 4 Picture of fiber optic F-P Filter

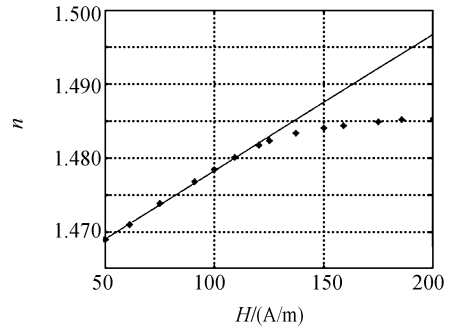
研究发现,磁流体薄膜厚度(滤波器谐振腔腔长)对测量的特性有一定的影响,如图 5 示,当磁流体薄膜厚度分别为 11.8、82 和 200 μm 时,可以看到被测电磁场的变化与磁流体有效折射率



(a) $L=11.5 \mu\text{m}$



(b) $L=82 \mu\text{m}$



(c) $L=200 \mu\text{m}$

图 5 薄膜厚度对滤波器特性的影响

Fig. 5 Influence of film thickness on filter characteristics

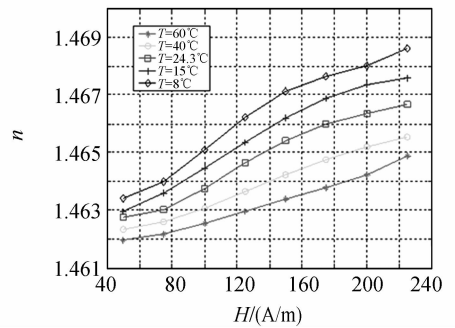


图 6 环境温度对滤波器特性的影响

Fig. 6 Influence of temperature on filter characteristics

之间的关系线性度逐渐变差。同时,在确定的磁流体薄膜厚度条件下(厚度为 12.7 μm),环境温度也会对滤波器的特性带来一定的影响,如图 6 所示,不同的环境温度,在相同的被测电磁场条件下,磁流体的有效折射率不同,但其对被测磁场的变化趋势基本相同。图 7 为在确定的磁流体薄膜厚度条件下(厚度为 12.7 μm)被测电磁场与光纤 F-P 滤波器输出波长之间的关系。

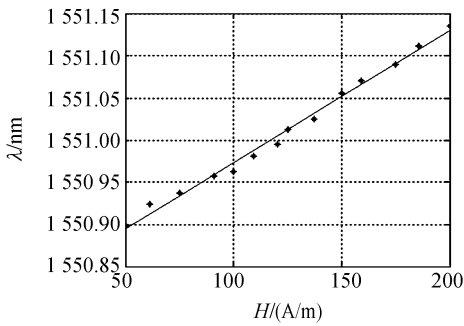


图 7 磁场大小与光纤 F-P 滤波器输出波长的关系
Fig. 7 Relationship of magnetic intensity and wavelength of fiber optic F-P filter

参考文献:

- [1] 徐晨, 刘桂雄, 张沛强, 等. 磁流体惯性传感的磁流耦合机理及流固结构[J]. 光学精密工程, 2008, 16(5):965-971.
XU CH, LIU G X, ZHANG P G, *et al.*. Magnetic fluid coupling mechanism of magnetic fluid inertial sensor and its magnetic-fluid solid structure [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(3):965-971. (in Chinese)
- [2] BALTAG O, COSTANDACHE D. Tilt measurement sensor[J]. *Sensors and Actuators: A*, 2000, 81(1):336-339.
- [3] POPA N C, POTENCZ I. Magnetic liquid sensor for very low gas flow rate with magnetic flow adjusting possibility[J]. *Sensors and Actuators: A*, 1997, 59(1-3):307-310.
- [4] COTAE C, BALTAG O. The study of a magnetic

4 结 论

本文提出一种新的电磁场测量方法,将磁流体材料作为光纤 F-P 滤波器的腔内介质,利用磁流体所具有的特殊电磁场控制折射率特性,实现了对电磁场的测量。同时给出了用光纤光栅波长解调技术对光纤 F-P 滤波器输出波长进行解调检测的方法。光纤 F-P 电磁场传感器本身具有结构简单、体积小、无移动部件等优点。进行了初步的实验,结果表明了方法的可行性。

fluid-based sensor [J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 1999, 201(7):394-397.

- [5] YANG S Y, YANG I J, HORNG H E, *et al.*. Observation and modeling of ordered structures of magnetic fluid films under perpendicular magnetic fields [J]. *Magnitnaya Gidrodinamika*, 2000, 36(1):19-32.
- [6] D A G, BRUGGEMAN, WASSENAAR. Berechnung verschiedener physikalischer Konstanten von Heterogenen Substanzen. I. Dielektrizitätskonstanten und Leitfähigkeiten der Mischkörper aus isotropen Substanzen[J]. *Annalen der Physik*, 1935, 416(7):636-664.
- [7] YANG S Y, CHIU Y P, JEANG B Y, *et al.*. Origin of field-dependent optical transmission of magnetic fluid films [J]. *Applied Physics Letters*, 2001, 79(15):2372-2379.

作者简介:



胡 涛(1976—),男,河南许昌人,讲师,工学博士,主要从事光纤传感技术、视觉检测技术等方面的研究。E-mail: hutaohit@gmail.com

赵 勇(1973—),男,辽宁沈阳人,教授,工学博士,主要从事光纤传感技术、光电检测技术等方面的研究。E-mail: zhaoyong@ise.neu.edu.cn

吕志伟(1961—),男,黑龙江哈尔滨人,教授,博士生导师,工学博士,主要从事非线性光学及应用,新型光电子技术及器件等方面的研究。E-mail: zhiweilu@yeah.net

陈菁菁(1985—),女,辽宁沈阳人,硕士研究生,主要从事光纤传感技术的研究。E-mail: winkyjingjing@yahoo.com.cn