

基于纳米磁流体材料的传感应用

卜胜利, 纪红柱

上海理工大学理学院, 上海 200093

摘要 磁流体是具有磁性和流动性的新型功能材料, 以其独特的性能在传感器领域具有巨大的应用潜力。本文综述了利用磁流体的多种特殊性质实现体积、流速、角度、温度、电流和磁场等物理量传感的研究进展, 并分析各类磁流体传感器的工作原理。基于几何光学理论, 推导和模拟了两套利用磁流体可调谐折射率的磁场传感系统。

关键词 纳米磁流体; 传感器; 可调折射率

中图分类号 O469

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2015.06.018

Applications of nanoscale magnetic fluids to sensing systems

PU Shengli, JI Hongzhu

College of Science, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China

Abstract The magnetic fluid is a novel kind of functional materials, with both magnetism and fluidity. It has numerous potential applications to sensors due to its unique features. This paper briefly reviews the progress of applications of magnetic fluids to sensors related to the volume, the flow rate, the angle, the temperature, the current and the magnetic field. Their sensing principles are analyzed. Based on the theory of the geometrical optics and the magnetically tunable refractive index of the magnetic fluid, theoretical derivations and numerical simulations of two kinds of magnetic field sensing systems are conducted, to promote sensor researches and applications based on the magnetic fluid.

Keywords nano-structured magnetic fluid; sensors; tunable refractive index

磁流体(磁性液体, magnetic fluid, MF)是一种由强磁性颗粒(直径通常为3~15 nm)在表面活性剂的辅助下分散在适宜的载液中所形成的稳定胶体溶液^[1]。自从20世纪60年代Papell^[2]首次用研磨法制备出稳定的磁流体以来,磁流体为人们提供了新的应用材料和研究方向,利用磁流体实现的各种光学器件近年来得到长足发展,如可调光开关^[3,4]、光栅^[5,6]、光学逻辑器件^[7]、可调光容器^[8]、调制器^[9-11]和传感器^[12-14]等。这些光学器件利用了磁流体的诸多独特性质,包括法拉第效应^[15]、可调谐折射率^[16-18]、光透射特性^[19,20]和可调周期结构^[21,22]等。1980年,Presley等^[23]开发出基于磁流体动力学原理的高可靠磁流体传感器,广泛用于航天器和坦克枪的稳定系统。近年来,随着传感器研究和应用的深入^[24,25],许多学者在新型磁流体传感方面做了大量工作,相关专利成果不断涌现,广

泛用于航空航天和国防军事领域,一定程度上解决了各种特殊、复杂、恶劣条件下的测试问题^[26-29]。

通过分析目前的各类磁流体传感器,本文综述磁流体应用于传感中的研究进展。探讨基于磁流体独特性质的各种潜在传感机理及应用方向,具体提出两套基于磁流体可控折射率特性实现磁场测量传感的方案。

1 基于磁流体流动特性的传感器

磁流体作为一种新型液体磁性功能材料,具有液体材料的流动性。当磁流体因外部因素发生流动,不同部位的磁流体比例发生变化,会导致系统电势产生变化。基于此流动性原理,可设计出检测非磁性物体体积的体积传感器、控制气体流速的流速传感器和测量微小倾角的角度传感器等。

收稿日期:2014-09-24;修回日期:2015-01-08

基金项目:上海市自然科学基金项目(13ZR1427400);上海市特种光纤与光接入网重点实验室开放课题(SKLSFO2014-05);沪江基金项目(B14004)

作者简介:卜胜利,副教授,研究方向为新型光学功能材料和光子器件,电子信箱:shlpu@usst.edu.cn;纪红柱(共同第一作者),硕士研究生,研究方向为

基于磁流体的新型磁场传感方法和磁光调制特性,电子信箱:zhuzi9966@163.com

引用格式:卜胜利,纪红柱.基于纳米磁流体材料的传感应用[J].科技导报,2015,33(6):107-114.

1.1 体积传感器

Iusan 等^[30]研究了一种磁流体体积检测传感器,结构如图1所示,其中磁场线圈和电容器构成一个具有共振频率的电子振荡回路。此传感器采用电容、电感的方式,将磁流体和水($\rho_{\text{水}} < \rho_{\text{MF}}$)一起作为介质材料。当物体($\rho_{\text{物}} > \rho_{\text{MF}}$)放入容器中时,会引起磁流体和水的液面变化,导致电容上升和电感降低,通过检测其频率变化可得到物体的体积。当 $\rho_{\text{物}}$ 与 ρ_{MF} 相差不大时,被检物体体积应小于0.3倍的磁流体初始体积;当 $\rho_{\text{物}} \gg \rho_{\text{MF}}$ 时,被检物体体积可大于0.3倍的磁流体初始体积。由于该传感器是检测频率变化值,故其测量精度高,能检测任意形状非磁性材料的体积。

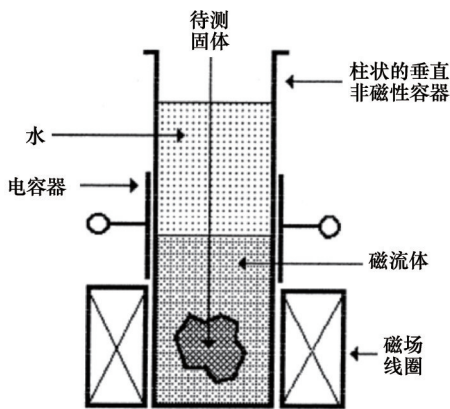


图1 基于磁流体流动特性的体积检测传感器
Fig. 1 Volume measurement sensor based on the fluidity of MF

1.2 流速传感器

Vékás 等^[31]研制了一种磁流体气体流速传感器,结构如图2所示。该传感器利用气泡经过放置在磁流体中的某个线圈时,引起线圈A和B的电感变化不同,通过记数单位时间内线圈电感变化的次数,得到气体流速。由于不同压力差对应不同的气泡频率(即气泡流速),通过控制磁场强度,可调节气泡频率,实现流速控制。因此该传感器不仅能检测微小流速(可实现气泡测量频率达到20 Hz),还可用来控制流速。

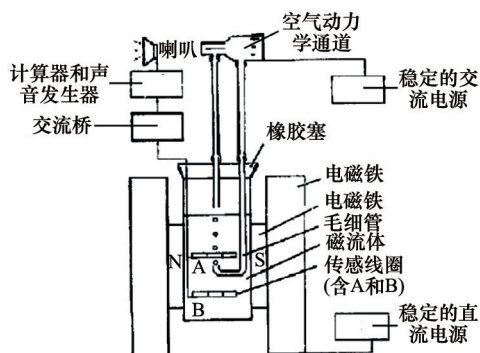


图2 基于磁流体流动特性的流速传感器
Fig. 2 Flow transducer based on the fluidity of MF

1.3 角度传感器

Baltag 等^[28]研制了一种磁流体倾斜传感器,结构如图3所示。在一个非磁性容器中填充部分磁流体,外面缠绕一组激励线圈和两组检测线圈,激励线圈用于产生激励电势,检测线圈串在一起用于提供检测电势差。当水平倾斜度改变时,磁流体发生流动,使得不同截面上的磁流体比例不同,由于检测线圈的感生电势和磁流体的截面积有关,通过检测线圈提供的电势差就可以得到水平倾斜角(线性度优于1.5%)。当磁流体含量为容器容积的1/2时,可获得最大的灵敏度,其分辨率为0.01 mm/m。该传感器能检测水平方向的微小倾斜角度、灵敏度高,但外界振动、磁场对其检测精度影响较大。

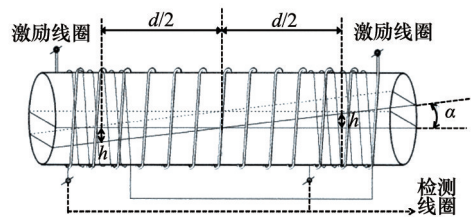


图3 基于磁流体流动特性的倾斜角传感器
Fig. 3 Tilt measurement sensor based on the fluidity of MF

2 基于磁流体导电特性的生物传感器

葡萄糖酶传感器的检测机理是通过检测 H_2O_2 (葡萄糖在葡萄糖酶(GOD)催化作用下的产物)还原电流来测定葡萄糖浓度。陈红飞等^[32]研究了一种基于磁流体和碳纳米管特性的葡萄糖生物传感器,图4给出了不同修饰电极(仅含碳纳米管的壳聚酶电极——MWNTs-CHIT-GOD/GCE,仅含 Fe_3O_4 颗粒的壳聚酶电极—— Fe_3O_4 -CHIT-GOD/GCE,含碳纳米管和 Fe_3O_4 颗粒的壳聚酶电极——MWNTs- Fe_3O_4 -CHIT-GOD/GCE)下的循环伏安图。

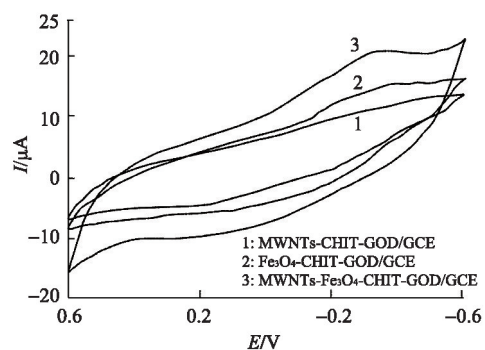


图4 不同电极在葡萄糖溶液中的循环伏安
Fig. 4 Cyclic voltammogram of different electrodes in glucose solution

由图4可知,在磁性纳米 Fe_3O_4 颗粒中掺杂多壁碳纳米管修饰酶传感器,不仅能增加酶的固定量与固定酶的稳定性,

还能有效地传输电子增强酶促反应,使传感器对电流的响应特征更加明显。该传感器线性响应范围为浓度在 $1.0 \times 10^{-5} \sim 2.3 \times 10^{-2}$ mol/L间的葡萄糖溶液,线性相关系数为0.9996,检测限为 5.0×10^{-6} mol/L,电极响应时间为5.3 s。因此,该传感器稳定性好、灵敏度高、响应速度快、具有较强的选择性,可用于实际样品检测。

3 基于磁流体磁光特性的光学传感器

目前,在电力系统中,测量电流的常规技术多是采用以电磁互感原理为基础的电流互感器,但传统的电磁式电流互感器存在着诸多缺陷(动态范围小、磁路易饱和、绝缘较困难、体积笨重、易燃易爆、电磁干扰严重、测量误差较大),已无法继续满足新一代电力系统对电流测量器件的要求^[33]。在不断完善传统的电磁式电流互感器基础上,学者们提出了基于法拉第效应的光磁式电流互感器。虽然光磁式电流互感器的性能优于传统的电磁式电流互感器,但是其对环境干扰的高敏感性造成其信噪比不高,且需要复杂的保偏装置来达到对偏振光信号的检测和处理^[34,35]。磁流体独有的磁光特性可以应用到传感领域中,在电流传感方面,采用磁流体作为传感媒质设计的传感结构,可避免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困难的缺陷。

3.1 基于可调透射特性的传感器

磁流体的光学透射率与其在外加磁场作用下磁性颗粒的团聚结构有关。图5给出了磁流体中磁性颗粒在外加平行和垂直磁场下的团聚结构示意图,其中 H 表示外加作用磁场以及相对应的作用方向。实验证明,磁场力和热运动是两个影响磁链形成与消散的主要因素^[36]。磁场强度越大,越多的磁性颗粒团簇成磁链。而温度升高时,会有越来越多的磁性颗粒重新分散到载液中。

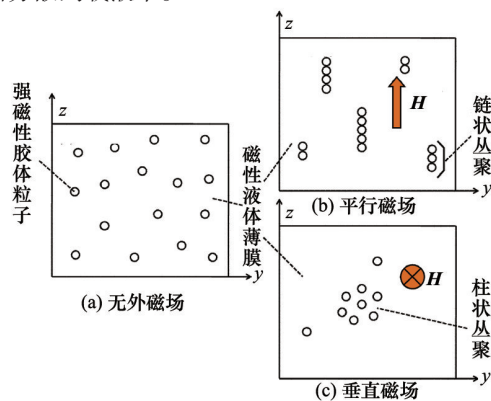


图5 磁性颗粒在外加平行和垂直磁场下的团聚结构示意图
Fig. 5 Schematic diagram of agglomerated structure of magnetic particles under external parallel and perpendicular magnetic fields

当外界环境温度不变时,磁流体的透射率随外加磁场强度变化,陆樟献等^[37]设计了一种用磁流体薄膜对高压电流进

行光学测量的电流传感器,结构如图6所示。该传感器使用双光路系统,所使用的磁流体薄膜为陆樟献等在实验室通过化学沉淀法自行制备所得。一个磁流体薄膜放在具有磁屏蔽特性的密封铝盒中,由于采取了磁屏蔽,其中的磁流体薄膜不会受到外界和相邻磁场的影响,而另一个磁流体薄膜放在待测环境中,使得两块磁流体薄膜的温度相同但所在位置处的磁场强度不同。利用双光路的光强度之比即可测量出螺线圈中的磁场强度,由于螺线圈中的磁场强度取决于线圈上的电流强度,所以其光强之比反映了电流强度。利用这种光路设计,由于两片磁流体薄膜的温度相近或变化相同,可降低系统噪声。同时,双光路系统能有效消除激光功率涨落对测量的影响,从而提高系统的稳定性和灵敏度。通过改变磁流体的成分、浓度和载液及传感单元的结构(线圈匝数),可达到实际应用的响应时间和传感灵敏度范围(即电流响应区间)。

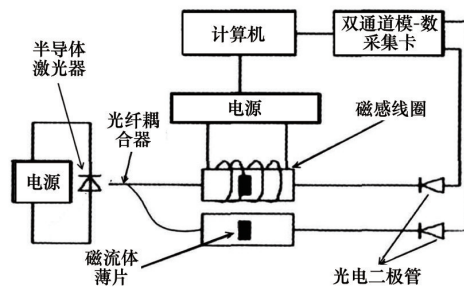


图6 基于磁流体可调透射率的电流传感器
Fig. 6 Current sensor based on the tunable transmittance of MF

若在外加磁场强度不变的情况下,改变磁流体所处的环境温度,使热运动起主导作用,则磁流体的光学透射率就会随所处环境温度的变化而变化。基于这一原理,张冬琛等^[38,39]研究了外加固定磁场作用下磁流体的光学透射率随环境温度的变化,设计了一种温度传感器,如图7所示,其中实验所用磁流体为水基 Fe_3O_4 磁流体。研究发现,在外加固定磁场强度下,磁流体的光学透射率随环境温度的升高而增加(指数关系)。在外部环境温度较高的情况下(大于 $60^\circ C$),此传感器具有很好的灵敏度。

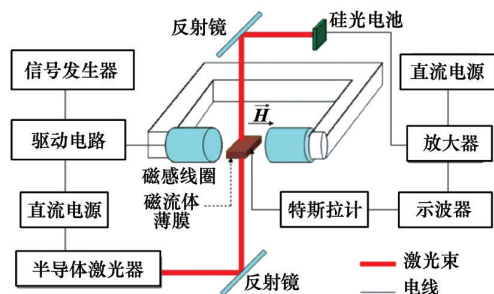


图7 基于磁流体可调透射率的温度传感器
Fig. 7 Temperature sensor based on the tunable transmittance of MF

3.2 基于热透镜效应的传感器

将一束激光聚焦在磁流体薄片上,由于磁流体对光的吸收导致磁流体折射率沿光束径向近似呈高斯分布,形成一个等效的凹透镜。入射激光束则以不同的角度折射出去,产生明亮相间的干涉光环。当施加外磁场时,磁性纳米微粒沿外磁场取向,使得磁流体折射率变化,导致出射光束的偏转,即改变了干涉环的半径(其半径正比于场强的平方),这种现象称为磁流体的热透镜效应。基于此理论,李洪杰等^[40]提出了一种将磁流体的热透镜效应应用于高压电流测量的新方法,并设计了一套测量系统,其结构如图8所示。透过磁流体薄片的光束照射到双光纤阵列(其间距约为半个衍射条纹的宽度)上,通过测量衍射图上两个点的光强,得出两条光功率随外磁场变化的曲线(即 $P-H$ 曲线),最后由两个不同的 P 值对应唯一的 H 值便可确定磁场强度。该方法可实现直流电流幅度达2000 A、准确度优于1%的测量,其最大的特点是避免了偏振光入射时所需的复杂保偏装置,使得该系统简单、经济,又具有光纤传输的优点。

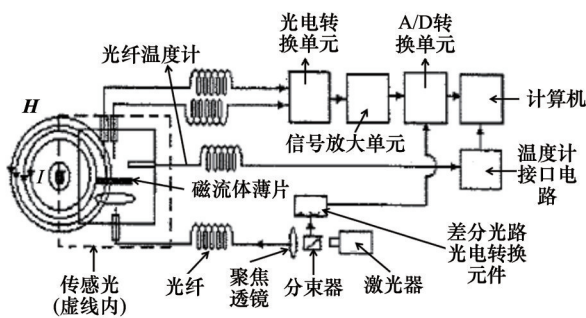


图8 基于磁流体热透镜效应的高压电流传感器

Fig. 8 High-voltage current transformer based on the thermal lens effect of MF

3.3 基于可调折射率特性的传感器

在外磁场下,磁流体可看成是由液相和固相组成的二相系统。当外磁场强度或方向改变时,磁流体的介电常数 ϵ_{MF} 发生变化,导致磁流体折射率 n_{MF} 变化,利用此性质可实现磁场强度或方向的测量。胡涛等^[41]提出了一种利用磁流体作为光纤F-P腔(仅允许某一波长的光通过)腔内介质的光纤F-P电磁场传感器,其结构如图9所示。通过调制被测电磁场改变腔内磁流体的折射率,可改变F-P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,可实现电磁场的测量。该传感器在磁流体浓度较大和薄膜厚度较低的情况下,可得到较好的线性传感,具有结构简单、体积小、无移动部件等优点。

由于磁流体的透射率较小,若要得到较大的透射光强,应使得薄片的厚度很薄,这会造成传感元件制作上的困难。基于光纤端面的菲涅耳反射原理,利用浸没在磁流体中光纤端面的反射率随外加磁场强度而变化的特性,陆樟献等^[42]设

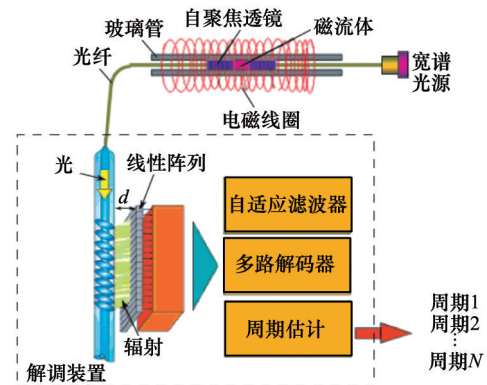


图9 基于磁流体可调折射率的光纤F-P电磁场传感器

Fig. 9 Fiber optic F-P electromagnetic sensor based on the tunable refractive index of MF

计了一种基于光纤端面反射的磁场和电流传感器,结构如图10所示,通过测量光纤端面的反射率可以得到磁场强度和电流值。所用磁流体薄膜为陆樟献等的实验室通过化学沉淀法自行制备所得。当磁场强度 $H < 1.4$ mT,反射率几乎没有变化,当 $H > 1.4$ mT时,反射率开始变化,随外加磁场的增大,反射率趋于饱和。该传感系统还降低了对光的偏振性及外部环境温度的依赖性,通过3 dB光纤耦合器把入射激光经光电二极管输入到计算机降低了光源波动引起的测量误差,还可以通过调节磁流体的浓度调整传感元件的灵敏度,同时结构简单,安装方便。

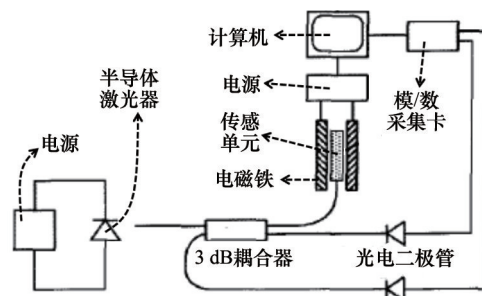


图10 基于磁流体中光纤端面反射的磁场和电流传感器

Fig. 10 Magnetic field and current sensor based on reflection on fiber-optic end face in MF

4 基于几何光学系统的磁流体磁场传感器

4.1 V形槽结构的磁场传感器

Ji等^[12]设计了一套基于几何光学理论的V形槽型磁流体传感系统,结构如图11所示,其中实验所用磁流体为日本磁性流体技术株式会社提供的油基 Fe_3O_4 磁流体。该系统利用填充磁流体的V形槽作为传感单元,与其他传感单元相比,此结构相对简单,传感灵敏度可通过调节V形槽的夹角实现,不需要线偏振光,可工作于任意入射角情况下而不影响

其传感灵敏度。同时,由于传感媒质为胶状液体,因此在此传感系统中不存在材料内部本征线性双折射,这使得此传感系统优于其他电磁式电流互感器和光学电流互感器。

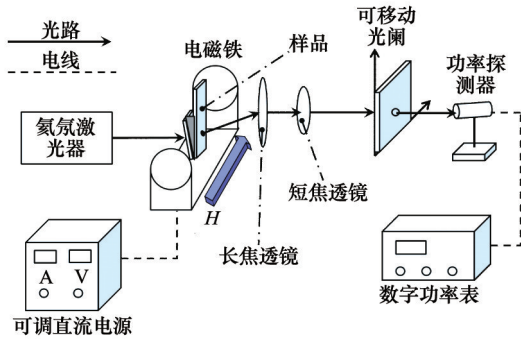


图 11 基于磁流体的V形槽磁场传感器

Fig. 11 Magnetic field sensor based on V-shaped groove filled with magnetic fluids

图 12 给出了此传感系统的传感原理示意图,其中 n_0 、 n_1 和 n_{MF} 分别为外部媒质、载玻片和磁流体的折射率, d_0 为载玻片的厚度, $2\theta_0$ 为 V 形槽的夹角, θ 为外部媒质与载玻片界面的入射角, θ' 和 θ_0' 分别为载玻片与磁流体界面和载玻片与外部媒质界面的折射角, h_0 和 h_1 分别为入射光和出射光在载玻片上的高度(记为 A 和 B_1 、 B_2), L 为 V 形槽顶点距探测平面沿 z 方向距离, L_1 和 L_2 分别为 B 点到探测平面和 V 形槽顶点到 B 点沿 z 方向距离, Y_1 和 Y_2 分别为不同磁场下的出射光在探测平面上的高度。当外磁场强度变化时,由于磁流体折射率的变化,导致出射光传播方向的变化,理论显示出射光方向和 n_{MF} 的关系为 $Y = 2\theta_0 L n_{MF} + h_0 - 3\theta_0 L$ [12], 通过测量出射光束的位置便可得出其所对应的磁场强度,实现磁场传感。由于实验所用的传感媒质浓度较低,使得该传感器所得到的出射光高度变化范围仅为 3 mm。

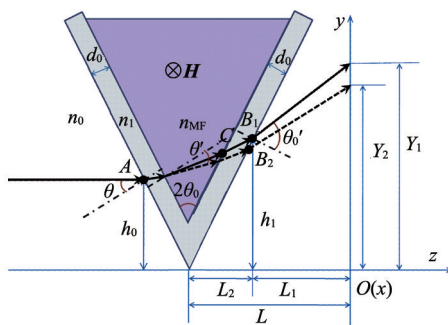


图 12 V形槽传感系统的传感原理示意

Fig. 12 Schematic diagram of sensing theory based on V-shaped groove sensing system

4.2 毛细管结构的磁场传感器

由于毛细管的结构如同柱透镜,单色平行光经共轴柱面

光学系统(由毛细管和管内磁流体构成的4个柱面组成)后在毛细管的另一侧汇聚成一系列平行于毛细管轴线并沿入射光传播方向扩展的焦线,通过移动探测器可探测焦线位置。若改变毛细管的填充媒质,由于折射率变化,会导致焦线的位置发生变化。如果填充媒质为磁敏感性的磁流体,由于磁流体的折射率随外磁场强度变化,在毛细管另一侧所汇聚的焦线位置便会随外磁场强度而变化,通过测定焦线位置便可确定磁场强度,该传感系统的原理如图 13^[43]所示,其中实验所用磁流体为日本磁性流体技术株式会社提供的油基 Fe_3O_4 磁流体。在图 13 中, h 为入射激光束的半径, n_0 、 n_1 和 n_{MF} 分别为外部媒质、毛细管材料和磁流体的折射率, r 和 R 分别为毛细管的内半径和外半径, O 为毛细管横截面的圆心, f_1' 和 f_2' 分别为不同磁场下的焦线位置。

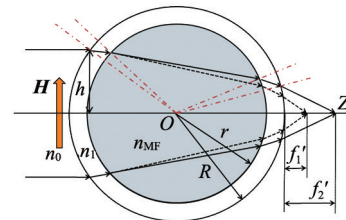


图 13 毛细管结构磁场传感单元剖面

Fig. 13 Cross-section view of the magnetic field sensing system based on capillary tube

利用光线追踪法,可得出焦线位置 f 与各初始参数的关系:

$$f = \frac{n_1^4 R^4 r^4 n_{MF}^2}{2M} - R \quad (1)$$

式中, M 为与毛细管磁场传感单元结构相关的参数,具体表示为

$$M = \left[\sqrt{R^2 - h^2} (n_1^2 R^2 - 2n_0^2 h^2) - n_0 \sqrt{n_1^2 R^2 - n_0^2 h^2} (R^2 - 2h^2) \right] \cdot \left[(n_1^2 r^2 - 2n_0^2 h^2) (n_{MF}^2 r^2 - 2n_0^2 h^2) + 4n_0^2 h^2 \sqrt{n_1^2 r^2 - n_0^2 h^2} \sqrt{n_{MF}^2 r^2 - n_0^2 h^2} \right] + n_0 \left[(R^2 - 2h^2) (n_1^2 R^2 - 2n_0^2 h^2) + 4n_0 h^2 \sqrt{R^2 - h^2} \sqrt{n_1^2 R^2 - n_0^2 h^2} \right] \cdot \left[\sqrt{n_1^2 r^2 - n_0^2 h^2} (n_{MF}^2 r^2 - 2n_0^2 h^2) - \sqrt{n_{MF}^2 r^2 - n_0^2 h^2} (n_1^2 r^2 - 2n_0^2 h^2) \right]$$

若入射光满足近轴条件,即激光束半径 h 小于毛细管外半径 R , 则可得到 2 组简化公式。当激光束半径 h 远小于毛细管外半径 R 时,公式(1)可简化为

$$f_2 = \frac{n_1^2 r^4 n_{MF}^2}{2M_2} - R \quad (2)$$

式中,

$M_2 =$

$$\frac{(n_1 - n_0)}{R n_1} \left[(n_1^2 r^2 - 2n_0^2 h^2) (n_{MF}^2 r^2 - 2n_0^2 h^2) + 4n_0^2 h^2 \sqrt{n_1^2 r^2 - n_0^2 h^2} \sqrt{n_{MF}^2 r^2 - n_0^2 h^2} \right] + n_0 \left[(n_{MF}^2 r^2 - 2n_0^2 h^2) \sqrt{n_1^2 r^2 - n_0^2 h^2} - (n_1^2 r^2 - 2n_0^2 h^2) \sqrt{n_{MF}^2 r^2 - n_0^2 h^2} \right]$$

当入射激光束半径 h 小于毛细管内半径 r 时,式(2)可简

化为

$$f_3 = \frac{Rn_1m_{MF}}{2M_3} - R \quad (3)$$

式中, $M_3 = n_{MF}r(n_1 - n_0) + Rn_0(n_{MF} - n_1)$ 。

图 14 给出不同毛细管材料折射率 n_1 和毛细管外半径 R 情况下, 焦线位置 f 与磁流体折射率 n_{MF} 的关系^[43]。可见, 此传

感系统的灵敏度(即 $f-n_{MF}$ 曲线斜率)随 n_1 和 R 变化。图 14(a) 显示, 当毛细管材料的折射率 n_1 较大时, 曲线的线性度变差但灵敏度增加, 因此可使用 n_1 较小的毛细管作为传感单元载体以获得较高的线性度, 相反则使用 n_1 较大的毛细管以满足较高的灵敏度要求。图 14(b) 显示, 在较大的 R 下可得到较高的灵敏度。

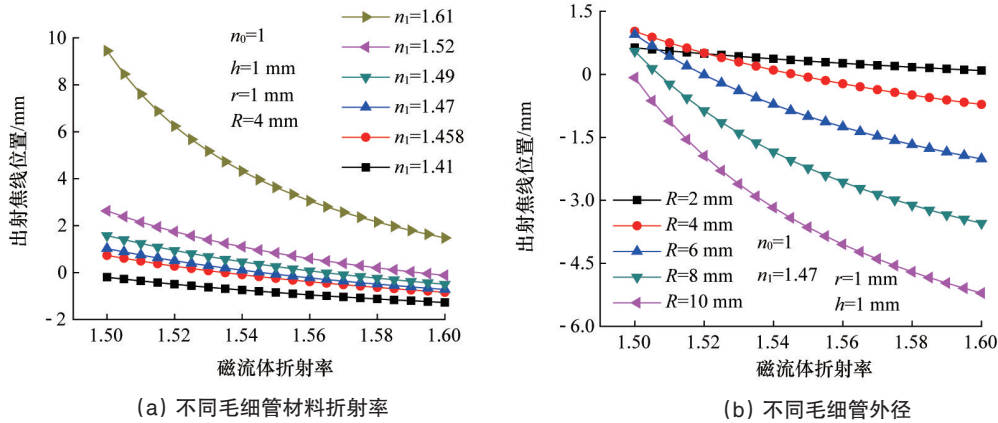
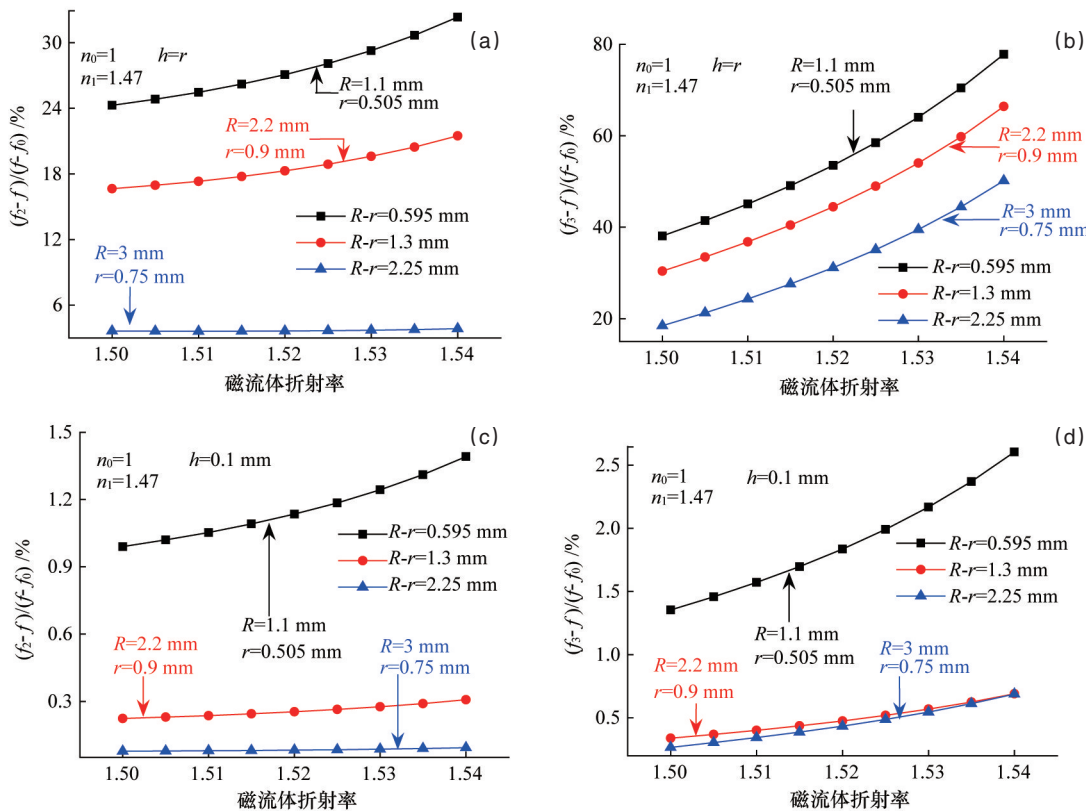


图 14 出射焦线位置与磁流体折射率的关系

Fig. 14 Position of the focal line as a function of refractive index of MF with several different parameters

为定量分析简化公式的准确性, f_0 与 f 分别记为零磁场和某一磁场时的焦线位置, f_2 与 f_3 分别为在与 f 同磁场强度下所得到的两组简化公式的焦线位置, 则 $(f_2 - f)/(f - f_0)$ 和

$(f_3 - f)/(f - f_0)$ 分别定义为两组简化情况下的相对误差, 其数值模拟结果如图 15^[43] 所示。其中, 图 15(a) 和 15(b) 为激光束半径 h 与毛细管内径 r 可比拟的情况, 图 15(c) 和 (d) 为激光



(a) 和 (b) 为激光束半径 h 与内径 r 可比拟, (c) 和 (d) 为激光束半径 h 小于内径 r

图 15 两组简化处理情况的相对误差比较

Fig. 15 Relative errors under two simplified conditions

束半径 h 小于毛细管内径 r 的情况。由图 15(a)和(c)可见,当 $h < R$ 时,式(2)的相对误差较小(小于 32%),尤其当 $h < r < R$ 时(小于 1.4%)。而且对于壁较厚的毛细管,式(2)的相对误差更小(对于图 15(a)和(c),分别约为 3.7%和 0.08%),这是由于当毛细管壁较薄时,近轴条件($h < R$)不能充分满足,所以此时的相对误差不理想。从图 15(b)和(d)可见,式(3)的相对误差仅当 $h < r$ 时是可接受的(对于 $h = r < R$ 和 $h < r < R$,平均相对误差分别大约为 45%和 0.95%)。通过对比图 15(b)和(d)与图 15(a)和(c),式(3)的相对误差远大于式(2)的相对误差。因此在要求精度不高的场合,可以使用简化式(3)简化处理,但要求激光束半径 h 小于内半径 r 。在要求精度较高的场合,则应该使用简化式(2)甚至精确式(1)。与式(1)和式(2)相比,式(3)的优势在于其简单性,这使得数据处理和磁场探测简单化。

稳定性和可重复性是磁流体传感技术实用化的关键因素。磁流体中的磁性颗粒在外磁场作用下会发生团聚,而当外磁场去掉以后,其中的团聚体应该能够分散成稳定的单颗粒胶体体系,进而保证实用化传感器的传感性能。目前磁流体的制备技术已非常成熟,高稳定的磁流体已较容易获得。除此以外,由于磁流体是一种胶体物质,在实际传感器制作中,需将磁流体敏感材料密封在一定形状的装置和容器中,以避免磁流体材料在工作中流失、受外界污染、溶剂挥发等问题的发生,进而导致传感器的性能下降或者失效。

5 结论

综述了基于磁流体流动特性、导电特性和磁光特性的多种传感器的研究进展,推导和模拟了两套利用几何光学方法和磁流体可调折射率特性的磁场传感器,通过测量出射光方向(对于 V 形槽结构)和焦线位置(对于毛细管结构)便可确定对应的磁场强度,达到测量磁场的目的。在实际应用中,通过改变 V 形槽的夹角和毛细管的相关参数(材料折射率 n_1 和壁厚 $R-r$)或采用不同的简化处理方法(对于毛细管)可得到较为理想的传感效果。磁流体在传感器领域的应用为磁流体的实际应用提供了一个崭新的研究空间。

参考文献(References)

- [1] Rosensweig R E. Ferrohydrodynamics[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1985.
- [2] Papell S S. Low viscosity magnetic fluid obtained by the colloidal suspension of magnetic particles[P]. US: 3215572, 1965-11-02.
- [3] Xia S H, Wang J, Lu Z X, et al. Birefringence and magneto-optical properties in oleic acid coated Fe_3O_4 nanoparticles: Application for optical switch[J]. International Journal of Nanoscience, 2011, 10(3): 515-520.
- [4] Park S Y, Handa H, Sandhu A. High speed magneto-optical valve: Rapid control of the optical transmittance of aqueous solutions by magnetically induced self-assembly of superparamagnetic particle chains[J]. Journal of Applied Physics, 2009, 105(7): 07B526.
- [5] Candiani A, Margulis W, Sterner C, et al. Phase-shifted Bragg microstructured optical fiber gratings utilizing infiltrated ferrofluids[J]. Optics Letters, 2011, 36(13): 2548-2550.
- [6] Pu S L, Chen X F, Chen L J, et al. Tunable magnetic fluid grating by applying a magnetic field[J]. Applied Physics Letters, 2005, 87(2): 021901.
- [7] Chieh J J, Hong C Y, Yang S Y, et al. Study on magnetic fluid optical fiber devices for optical logic operations by characteristics of superparamagnetic nanoparticles and magnetic fluids[J]. Journal of Nanoparticle Research, 2010, 12(1): 293-300.
- [8] Patel R, Mehta R V. Ferrodipersion: A promising candidate for an optical capacitor[J]. Applied Optics, 2011, 50(31): G17-G22.
- [9] Horng H E, Chieh J J, Chao Y H, et al. Designing optical-fiber modulators by using magnetic fluids[J]. Optics Letters, 2005, 30(5): 543-545.
- [10] Cuennet J G, Vasdekis A E, Sio L De, et al. Optofluidic modulator based on peristaltic nematogen microflows[J]. Nature Photonics, 2011, 5(4): 234-238.
- [11] Pu S L, Chen X F, Di Z Y, et al. Relaxation property of the magnetic-fluid-based fiber-optic evanescent field modulator[J]. Journal of Applied Physics, 2007, 101(5): 053532.
- [12] Ji H Z, Pu S L, Wang X, et al. Magnetic field sensing based on V-shaped groove filled with magnetic fluids[J]. Applied Optics, 2012, 51(8): 1010-1020.
- [13] Thakur H V, Nalawade S M, Gupta S, et al. Photonic crystal fiber injected with Fe_3O_4 nanofluid for magnetic field detection[J]. Applied Physics Letters, 2011, 99(16): 161101.
- [14] Childs P, Candiani A, Pissadakis S. Optical fiber cladding ring magnetic field sensor[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2011, 23(13): 929-931.
- [15] Pagliero D, Li Y, Fisher S, et al. Approach to high-frequency, cavity-enhanced Faraday rotation in fluids[J]. Applied Optics, 2011, 50(5): 648-654.
- [16] Zhao Y, Zhang Y Y, Lü R Q, et al. Novel optical devices based on the tunable refractive index of magnetic fluid and their characteristics[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2011, 323(23): 2987-2996.
- [17] Hong C Y, Chieh J J, Yang S Y, et al. Simultaneous identification of the low-field-induced tiny variation of complex refractive index for anisotropic and opaque magnetic-fluid thin film by a stable heterodyne Mach-Zehnder interferometer[J]. Applied Optics, 2009, 48(29): 5604-5611.
- [18] Pu S L, Chen X F, Chen Y P, et al. Measurement of the refractive index of a magnetic fluid by the retroreflection on the fiber-optic end face[J]. Applied Physics Letters, 2005, 86(17): 171904.
- [19] Malynych S, Moroz I. Time dependent magnetically induced variations in optical transmission of magnetite nanoparticle aqueous suspension[J]. Central European Journal of Physics, 2012, 10(1): 159-165.
- [20] Chung M F, Fu C M. Optical transmittance and dynamic properties of ferrofluids (Fe_3O_4) under DC-biased magnetic fields[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2011, 47(10): 3170-3172.
- [21] Fan C Z, Liang E J, Huang J P. Optical properties in the soft photonic crystals based on ferrofluids[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2011, 44(32): 325003.
- [22] Pu S L, Liu M. Tunable photonic crystals based on MnFe_2O_4 magnetic fluids by magnetic fields[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2009, 481(1-2): 851-854.
- [23] Presley, Rex W. Rate sensor[P]. US: 4192189, 1980-03-11.
- [24] 徐艳平, 顾铮先, 陈家壁. 长周期光纤光栅薄膜传感器研究[J]. 上海理

- 工大学学报, 2005, 27(3): 215-218.
- Xu Yanping, Gu Zhengxian, Chen Jiabi. Study of long-period fiber grating thin film sensors[J]. Journal of University of Shanghai for Science and Technology, 2005, 27(3): 215-218.
- [25] 徐艳平, 顾铮先, 陈家璧. 镀金属四包层长周期光纤光栅特征方程的建立与求解[J]. 上海理工大学学报, 2006, 28(1): 9-13.
- Xu Yanping, Gu Zhengxian, Chen Jiabi. Establishment and solution of characteristic equation of metal-coated quadruple clad long-period fiber grating[J]. Journal of University of Shanghai for Science and Technology, 2006, 28(1): 9-13.
- [26] Suprun, Anton E, Simonenko, et al. Location tracking device[P]. US: 7292223, 2007-11-06.
- [27] TDK Corp. Angle sensor[P]. JP: 2005-114674A, 2005-04-28.
- [28] Baltag O, Costandache D, Salceanu A. Tilt measurement sensor[J]. Sensors and Actuators, 2000, 81(1-3): 336-339.
- [29] Bhatt R P. Magnetic-fluid-based smart centrifugal switch[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2002, 252: 347-349.
- [30] Stanci A, Iusan V, Buioca C D. Magnetofluidic sensor for volume measurement[J]. Sensors and Actuators A, 2000, 84(3): 246-249.
- [31] Popa N C, Potencz I, Anton I, et al. 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.
- [32] 陈红飞, 黄晓东, 毛雪雯, 等. 磁性纳米 Fe_3O_4 颗粒掺杂多壁碳纳米管修饰的葡萄糖生物传感器[J]. 安徽工程科技学院学报, 2009, 24(2): 11-13.
- Chen Honfei, Huang Xiaodong, Mao Xuewen, et al. Glucose biosensor based on magnetic nanoparticle Fe_3O_4 mixed multi-walled carbon nanotubes modified glass carbon electrode[J]. Journal of Anhui University of technology and Science, 2009, 24(2): 11-13.
- [33] Cease T W, Johnston P. A magneto-optic current transducer[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1990, 5(2): 548-555.
- [34] Verbiest T, Wouters J. Magnetic field sensing based on Faraday rotation in inorganic/polymer hybrid materials[J]. Proceeding of SPIE, 2009, 7467: 74670B.
- [35] Perciante C D, Ferrari J A. Faraday current sensor with temperature monitoring[J]. Applied Optics, 2005, 44(32): 6910-6912.
- [36] Patel R. Mechanism of chain formation in nanofluid based MR fluids[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2011, 323(10): 1360-1363.
- [37] 陆樟献, 陈善飞, 陈建萍. 磁性流体薄片高电压电流光学测量的研究[J]. 光学学报, 2007, 27(6): 1049-1051.
- Lu Zhangxian, Chen Shanfei, Chen Jianping. A study of the optical measurements of high-voltage current using magnetic fluid films[J]. Acta Optica Sinica, 2007, 27(6): 1049-1051.
- [38] Zhang D C, Di Z Y, Zou Y, et al. Temperature sensor using ferrofluid thin film[J]. Microfluidics and Nanofluidics, 2009, 7(1): 141-144.
- [39] Zhang D C, Di Z Y, Zou Y, et al. Temperature dependence of the optical transmission of a magnetic fluid with an applied magnetic field[J]. Journal of the Korean Physical Society, 2009, 55(3): 1259-1262.
- [40] Li H J, Chen X W, Yuan S H. Double-fiber electric current measurements applying thermal-lens-coupled magneto-optical effect in ferrofluid[J]. Proceeding of SPIE, 1998, 3555: 28-31.
- [41] Hu T, Zhao Y, Li X, et al. Novel optical fiber current sensor based on magnetic fluid[J]. Chinese Optics Letters, 2010, 8(4): 392-394.
- [42] 陆樟献, 陈善飞, 王正良. 基于磁性液体中光纤端面反射的磁场和电流传感[J]. 光学学报, 2009, 29(6): 1482-1486.
- Lu Zhangxian, Chen Shanfei, Wang Zhengliang. Magnetic field and current sensing by reflection on fiber-optic end face in ferrofluids[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(6): 1482-1486.
- [43] Ji H Z, Pu S L, Wang X, et al. Magnetic field sensing based on capillary filled with magnetic fluids[J]. Applied Optics, 2012, 51(27): 6528-6538.

(编辑 田恬)

·学术动态·



中国科学技术协会

2015年度中国科协学术交流项目开始申报

1. 新观点新学说学术沙龙: 10项, 经费: 12万元/项
2. 中国科技论坛: 10期, 经费: 15万元/期
3. 青年科学家论坛: 10项, 经费: 10万元/项
4. 海峡两岸青年科学家学术活动月: 10项, 经费: 20万元/项
5. 综合交叉学术交流: 40项, 经费: 15万元/项
6. 前沿高端学术交流: 80项, 经费: 10万元/项
7. 课题研究: 5项, 经费: 10万元/项

请登录中国科协学会学术项目管理系统 <http://xhxsxm.cast.org.cn> 填写《中国科学技术协会项目申报书》, 申报截止日期为2015年4月10日。

详见中国科协网 <http://www.cast.org.cn/n35081/n35488/16280284.html>。