

基于 MF 与带状双芯光纤磁场测量研究

侯元萌,葛海波*,张杰

(西安邮电大学 电子工程学院,西安 710061)

摘要:为降低温度对基于磁流体(MF)和长周期光纤光栅(LPFG)磁场测量系统中测量结果造成的误差,提出一种基于MF和带状双芯光纤的磁场测量校正方案。在带状双芯光纤内集成包层热光系数不同的LPFG,利用其温度灵敏度之间的差异实现对磁场测量结果的校正。通过理论分析与系统仿真,论证了MF与LPFG的温度特性,揭示了一定温度变化范围内MF折射率与LPFG谐振波长之间的关系,与未进行温度补偿的系统相比,所提传感方案的磁场强度精度至少提高79.1%。

关键词:长周期光纤光栅;磁流体;有效热光系数;温度补偿

中图分类号:TN914 **文献标识码:**A **文章编号:**1002-5561(2020)03-0027-04

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2020.03.007

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Study of magnetic field measurement based on MF and ribbon twin-core optical fiber

HOU Yuanmeng, GE Haibo*, ZHANG Jie

(School of Electronic Engineering, University of Xi'an Posts and Telecommunications, Xi'an 710061, China)

Abstract: In order to reduce the error caused by temperature in the magnetic field measurement system based on magnetic fluid (MF) and long period fiber grating (LPFG), a magnetic field measurement correction scheme based on MF and banded twin-core optical fiber is proposed. The LPFG with different cladding thermo-optic coefficients is integrated in the ribbon twin-core optical fiber, and the difference between the temperature sensitivity is used to correct the magnetic field measuring results. Through theoretical analysis and system simulation, the temperature characteristics of MF and LPFG are demonstrated, and the relationship between MF refractive index and LPFG resonant wavelength in a certain temperature range is revealed. Compared with the system without temperature compensation, the proposed scheme's intensity to accuracy is increased by at least 79.1%.

Key words: long period fiber grating; magnetic fluid; effective thermo-optic coefficient; temperature compensation

0 引言

近年来,磁场测量技术的研究得到了长足发展。常见的测量方法是基于法拉第效应和磁致伸缩材料,但因自身缺陷已不再适应当前磁场高精度的测量需求。磁流体(MF)具有磁致折射率可调的特性,作为传感元件已广泛地应用于光纤磁场传感器^[1]中。2015年,蔺际

超提出了基于MF包覆减小包层直径的布喇格光纤光栅(FBG)的磁场传感器^[2];2016年,张良提出了基于MF与级联FBG的包层腐蚀细芯光纤模式干涉仪的高灵敏度磁场传感器^[3];2018年,王计刚提出了基于MF材料与长周期光栅和FBG串联复合结构的磁场传感监测系统^[4];2019年,梁星等人提出了利用MF替代FBG的SiO₂包层来制作MF封装薄包层FBG结构的磁场传感器^[5]。以上改进方案都采用MF包覆光纤光栅,由磁场强度变化经MF作用于光纤光栅来实现磁场传感。尽管上述方案对磁场测量灵敏度有一定提高,但均未考虑温度交叉敏感造成的干扰问题。虽然文献[6]研究了温度波动对测量结果的影响,但对如何降低温度对测量结果造成的误差研究还不够深入。

本文将2种不同的包层热光系数的长周期光纤光栅(LPFG)引入系统,利用不同包层热光系数的LPFG

收稿日期:2019-08-26。

基金项目:陕西省教育厅自然科学研究基金项目(2011JM8038)资助。

作者简介:侯元萌(1993-),女,硕士,现就读于西安邮电大学电子工程学院电路与系统专业,主要从事光纤通信与光纤传感的研究。在就读本科期间,曾获“三好学生”,并获二、三等奖学金和“优秀毕业生”称号;在就读硕士研究生期间,曾获三等奖学金和“互联网+”创新创业大赛校二等奖。

*通信作者:葛海波(E-mail: gehaibo2417@aliyun.com)。



对折射率灵敏度相同而对温度灵敏度不同的特性,来实现对测量结果的校正。

1 系统原理

1.1 原理分析及系统框图

在基于 MF 的 LPFG 磁场传感系统中,温度在 2 个方面会出现测量误差:一是 LPFG 谐振波长;二是 MF 折射率。由于带状双芯光纤同时具备倏逝场光纤、双包层光纤和双芯保偏光纤的光学性能,故可在其内集成不同的 LPFG,并将 MF 作为带状双芯光纤的环境介质。当外加磁场强度改变时,MF 折射率随之发生变化,同时使 LPFG 谐振波长发生偏移。由文献[7]可知,可以不用考虑 2 根光纤纤芯之间的耦合,采用分离变量法分别对 2 根光纤光栅的谐振波长、温度和磁场强度三者之间相互影响机理进行分析。本系统传感器探头采用具有相同纤芯有效热光系数 $\xi_{\text{eff}}^{\text{co}}=6.7\times 10^{-6}$,不同包层有效热光系数 $\xi_{\text{eff}}^{\text{cl},0}=6.5\times 10^{-6}$ 、 $\xi_{\text{eff}}^{\text{cl},1}=7.1\times 10^{-6}$ 的 LPFG_0 与 LPFG_1 组成,系统框图如图 1 所示。其中,虚线部分为可调磁场发生装置具体设计结构。

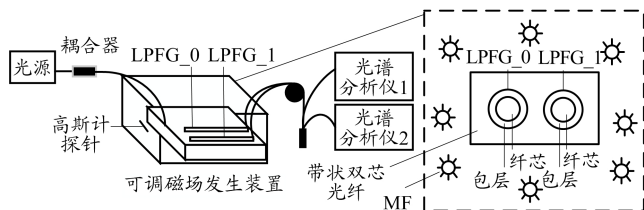


图 1 温度补偿系统框架

首先,借助 MF 的磁控折射效应及 LPFG 对介质折射率敏感特性来进行磁场传感,相比之前基于 MF 和 LPFG 的光纤磁场传感系统,本系统带状双芯光纤采取 $\xi_{\text{eff}}^{\text{cl},0} < \xi_{\text{eff}}^{\text{co}} < \xi_{\text{eff}}^{\text{cl},1}$,若外界温度发生变化则 LPFG_0 和 LPFG_1 的谐振波长偏移方向相反,且 LPFG_0 和 LPFG_1 的谐振波长偏移差只受温度影响,故可通过计算差值对系统进行温度补偿来实现对磁场测量结果的校正。然后,使用带状双芯光纤既保证了 LPFG_0 与 LPFG_1 同时受温度和磁场作用又避免了两者之间相互耦合对谐振波长产生影响,同时带状双芯光纤避免了应力、弯曲对 LPFG 的影响,在减少温度交叉敏感造成误差的同时有效提高了磁场强度测量精度。该方法不仅实现磁场、温度的双参量测量传感,还减少了传统测量系统对光纤光栅的封装过程,更有利于工业化实现。

1.2 MF 的温度特性

MF 是一种在外加磁场作用下才具有磁性的特殊功能材料。R.E.Rosenweig 使用 Langevin 函数来描述在温度和磁场强度共同影响下 MF 折射率 n_{MF} 的变化^[7]:

$$n_{\text{MF}}(H, T) = (n_s - n_0) \left[\coth \left(\alpha \frac{H - H_{c,n}}{T} \right) - \frac{T}{\alpha(H - H_{c,n})} \right] + n_0 \quad (1)$$

式(1)中, $H > H_{c,n}$ 。当磁场强度 H 达到临界磁场强度 $H_{c,n}$ 时, MF 折射率 n_{MF} 才开始发生改变。 n_s 为 MF 折射率的饱和值; n_0 为外界磁场小于 $H_{c,n}$ 时 MF 的折射率, T 为外界温度, α 为拟合系数。由式(1)可知,当 MF 的浓度给定时,其折射率随温度和磁场强度的变化而变化,如图 2 所示。仿真参数为 $n_s=1.456$, $n_0=1.448$, $H_{c,n}$ 分别为 20 Oe、25 Oe、30 Oe 和 35 Oe, T 分别为 10 ℃、20 ℃、30 ℃ 和 40 ℃。

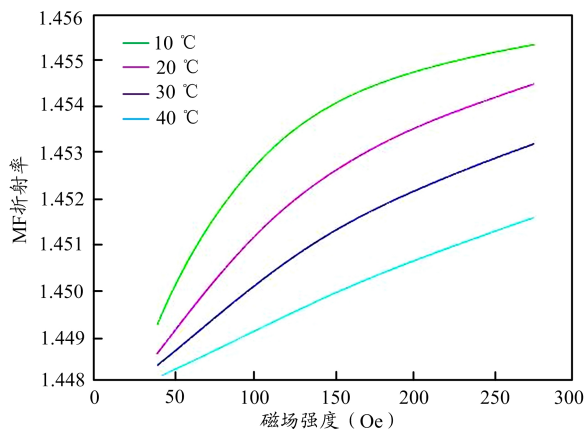


图 2 MF 折射率与温度、磁场强度的关系

由图 2 可知,当磁场强度固定,则 MF 折射率随温度升高而降低;当温度固定时, MF 折射率会随磁场强度升高而增加,且增长曲线非线性。由 Langevin 函数和仿真图可知,只有在磁场强度小于 100 Oe 时, MF 折射率的变化量 Δn_{MF} 与温度变化量 ΔT 呈近似线性关系,其关系为:

$$\Delta n_{\text{MF}} = 1.46 \times 10^{-3} \cdot \Delta T + 3.09 \times 10^{-4} \quad (2)$$

1.3 LPFG 的温度特性

LPFG 是透射光栅,其包层有效折射率与环境介质折射率之间存在一定的非线性关系。当外界温度变化时,光纤光栅由于热光效应和热膨胀效应导致周期 Λ 、 $n_{\text{eff}}^{\text{co}}$ 和 $n_{\text{eff}}^{\text{cl}}$ 皆发生变化^[8],使 LPFG 中心波长漂移,故可用于折射率传感;但因其温度灵敏度较高^[9],在进行折射率传感的同时存在温度交叉敏感问题。当外部介质为 MF 时,若温度恒定 MF 的折射率 n_{MF} 仅与磁场强度 H 有关。如果磁场强度从 H 变为 H' ,则相应 MF 的折

射率从 n_{MF} 变为 n'_{MF} , LPFG 谐振波长的漂移量为^[10]:

$$\Delta\lambda = \frac{u_x \lambda^2 \Lambda}{8\pi n_{cl} r_{cl}^3} \left(\frac{1}{\sqrt{n_{cl}^2 - n_{MF}^2}} - \frac{1}{n_{cl} - n_{MF}} \right) \quad (3)$$

其中, u_x 为第一类 $J_0(\chi)$ 的贝塞尔函数的 m 阶根, λ 为谐振波长, Λ 为 LPFG 的周期, r_{cl} 为光栅包层的半径, n_{cl} 为包层折射率。由式(3)可知, LPFG 谐振波长的漂移量与包层半径、包层折射率和外部介质折射率有关, 可根据需求选择折射率在一定范围内且包层厚度不同的 LPFG 来进行折射率传感。假定环境温度不变, 本文对不同包层折射率和不同包层半径的 LPFG_0 与 LPFG_1 之间各自谐振波长漂移量、介质折射率和相对谐振波长的偏差值与外部介质折射率之间的关系进行仿真, 如图 3 所示。仿真参数为 $n_{cl0}=1.431$, $r_{cl0}=62.3 \mu\text{m}$, $\lambda_0=1555 \text{ nm}$; $n_{cl1}=1.433$, $r_{cl1}=62.25 \mu\text{m}$, $\lambda_1=1553 \text{ nm}$ 。

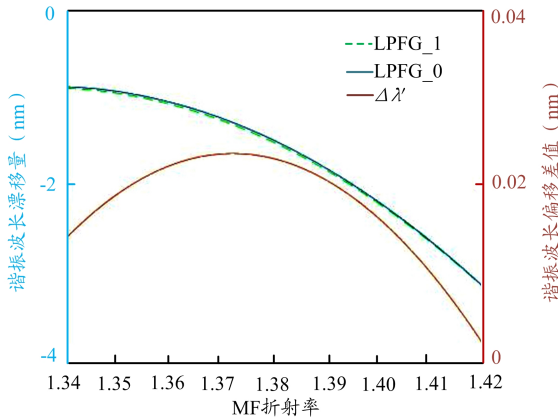


图 3 LPFG 波长偏移量与折射率的关系

图 3 中, LPFG_0 与 LPFG_1 谐振波长漂移量 $\Delta\lambda$ 对应左纵向坐标, 其谐振波长偏移差值 $\Delta\lambda'$ 对应右纵向坐标。当外部介质折射率从 1.34 增加到 1.42 时, 随着折射率增加 LPFG 会向短波方向偏移, 谐振波长偏移差值 $\Delta\lambda'$ 达到最大值约为 0.032 nm。此时, 对应的谐振波长的漂移量分别为 2.413 nm 和 2.411 nm。综合上述仿真, 当介质折射率范围在 1.34~1.42 之间时, 与 LPFG_0 与 LPFG_1 谐振波长的各自漂移量相比, 2 个谐振波长偏移差值可以忽略不计。若温度变化, LPFG 谐振波长的温度灵敏度为^[11]:

$$\frac{d\lambda}{dT} = \lambda_{res}^m \gamma^m \left[\beta + \frac{\xi_{eff}^{co} n_{eff}^{co} - \xi_{eff}^{cl} n_{eff}^{cl,m}}{n_{eff}^{co} - n_{eff}^{cl,m}} \right] \quad (4)$$

其中, $\alpha \cdot \Delta T \leq 1$ 。 γ^m 为光纤波导色散因子, β 为热膨胀系数。由式(4)可知, LPFG 谐振波长的温度灵敏度主

要与光纤纤芯基本模式和包层模式的有效热光系数有关。倘若 ξ_{eff}^{co} 和 ξ_{eff}^{cl} 的相对大小发生变化, 则温度灵敏度的大小会相应变化。

图 4 显示了当外界磁场强度 H 为 100 Oe 时不同包层有效热光系数的 LPFG 谐振波长偏移差值与温度之间的变化关系。仿真参数为 $n_{co}=1.463$, $\alpha=0.55 \times 10^{-6}$, $\xi_{eff}^{co}=6.7 \times 10^{-6}$, ξ_{eff}^{cl} 值分别取 6.5×10^{-6} , 6.7×10^{-6} 和 7.1×10^{-6} 。

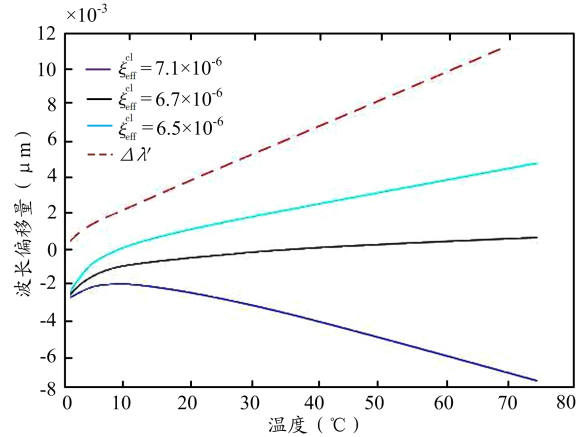


图 4 温度对不同包层热光系数的 LPFG 谐振波长差值的影响

由图 4 可知, 当 $\xi_{eff}^{cl} < \xi_{eff}^{co}$ 时, LPFG 谐振波长差值随温度升高而增加, 反之则减少。综前所述, 与温度波动对 LPFG_0 和 LPFG_1 的谐振波长的影响相比, 磁场强度变化的影响可忽略不计。通过测量 LPFG_0 和 LPFG_1 的谐振波长之间的差值可计算出实时温度变化。图中 $\Delta\lambda_1$ 对应包层热光系数为 6.5×10^{-6} 和 7.1×10^{-6} 的 LPFG_0 与 LPFG_1 谐振波长偏移差值, 此时外界温度 T 与波长偏移量之间满足线性关系:

$$\Delta\lambda_1 = 1.53 \times 10^{-4} T + 7 \times 10^{-3} \quad (5)$$

该系统里 LPFG_0、LPFG_1 的测量数据均可作为依据被用于本系统的温度校正。由于 LPFG_0 与纤芯基模偏移方向相同, 因此本文以 LPFG_0 为例, 对 LPFG_0 温度 T 与谐振波长 λ 进行线性拟合, 如图 5 所示。曲线拟合函数为:

$$\lambda = 0.22T + 1.55 \times 10^3 \quad (6)$$

1.4 温度补偿结果

本系统中来自宽光谱源的光进入带状双芯光纤, 经磁场作用后的透射光通过传输光纤传输到光谱仪, 用光谱仪记录 LPFG_0 和 LPFG_1 的谐振波长的偏移差值。

为接近实际测量需求, 我们设定基准温度为

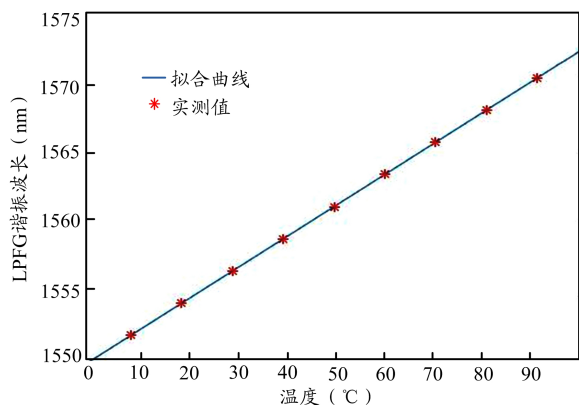


图5 温度与 LPFG 谐振波长关系

18 °C,在实际温度的基础上选取增加量分别为 2 °C、4 °C、6 °C、8 °C 和 10 °C。通过光谱仪可知,LPFG_0 波长分别为 1554.408 nm、1554.849 nm、1555.287 nm、1555.727 nm 和 1556.168 nm。通过式(6)计算可得对应温度增加量分别为 20.036 °C、22.042 °C、24.032 °C、26.035 °C 和 28.036 °C;再根据式(2)和式(5)做相应的补偿,修正之后的磁场测量结果如图 6 所示,可以看出 ΔT 越大,测量误差越大;温度补偿后所测磁场强度比温度补偿前,相对误差减小量分别为 80.2%、79.1%、81.3%、80.6% 和 79.4%。

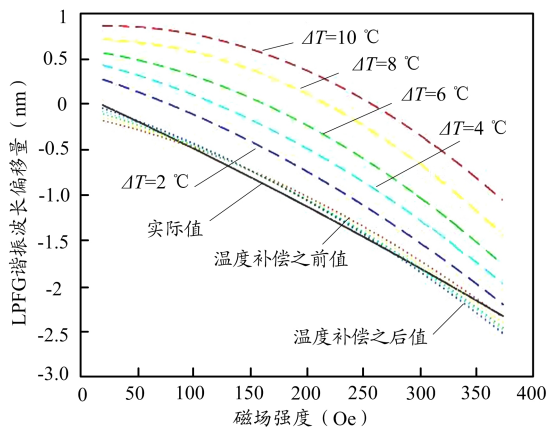


图6 LPFG 波长偏移与磁场强度的关系

2 结束语

本文针对基于 MF 和 LPFG 的磁场传感方案中对温度考虑不足的问题,设计了一种能够达到磁场校正,且实现温度、磁场强度双参量测量的系统方案,分析并论证了温度对 MF 折射率以及温度对 LPFG 谐振波长造成的影响。由于外界磁场强度变化对 2 个 LPFG 谐振波长偏移差值造成的影响可忽略不计,谐振波长偏差量只与温度变化有关,故采用测量 LPFG_0 和 LPFG_1 的谐振波长之间的偏移差值来校正磁场测量结果。仿真数据表明:改进后的传感系统不仅有效地提高了磁场测量精度,还解决了测量系统的温度交叉敏感问题,且经过温度补偿后所测得的磁场强度比温度补偿前相对误差至少降低了 79.1%。

参考文献:

- [1] NÉLIA A, DOMINGUES MARIA FÁTIMA, CARLOS M, et al. Optical Fiber Magnetic Field Sensors Based on Magnetic Fluid: A Review. [J]. Sensors (Basel, Switzerland), 2018, 18(12): 1–27.
- [2] 蔺际超. 基于磁流体包覆复合光纤光栅的磁场传感器研究[D]. 天津: 天津理工大学, 2015.
- [3] 张良. 基于磁流体的光纤磁场传感研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2016.
- [4] 王计刚. 基于磁流体材料的光纤磁场传感技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2018.
- [5] 梁星, 杨武海, 刘鑫, 等. 磁流体包覆薄包层光纤光栅磁场传感研究[J]. 压电与声光, 2019, 41(1): 34–39.
- [6] 李尧丞, 王海潼, 赵欣. 基于磁流体的 LPFG 磁场传感器的温度特性[J]. 光通信技术, 2015, 39(2): 40–42.
- [7] 刘冲, 苑立波. 带状双芯光纤及其双折射特性分析[J]. 黑龙江大学学报(自然科学版), 2011, 2(4): 90–93.
- [8] 吴迪, 赵勇, 吕日清, 等. 磁流体的折射率可调谐特性分析[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2014, 35(7): 931–934.
- [9] 安佳, 王永杰, 李芳, 等. 采用聚酰胺酸层的高灵敏度长周期光纤光栅温度传感器(英文)[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(8): 346–352.
- [10] HONG C Y, HORNG H E, YANG S Y. Tunable refractive index of magnetic fluids and its applications [J]. Physica Status Solidi (c), 2004, 1(7): 1604–1609.
- [11] 唐园园, 葛海波, 刘睿, 等. 基于 MF 的 LPFG 磁场传感器的温度补偿研究[J]. 光通信技术, 2017, 41(8): 13–16.

敬告作者

为广泛构架起作者和读者之间的桥梁,本刊加入了中国知网、万方数据知识服务平台、维普网和中国光学期刊网等数据期刊网,即每期刊物出版后,我们将把同样的数据送至上述数据库或网站,使信息能以最快的速度国际化、网络化。其中稿费已包含于本刊一次性所附作者的稿费中。

为尊重作者的著作权,如果有作者不同意将出版后的文章进入上述数据库或网站,来稿时敬请注明,否则将视为同意,谢谢合作。

《光通信技术》编辑部