

基于迈克尔逊干涉原理的 光纤传感器简述

注：国家大学生创新实验项目（校内编号：0813123）

摘要：从基于迈克尔逊干涉原理的光纤迈克尔逊干涉仪出发，介绍了光纤迈克尔逊干涉仪系统原理，并分析了干涉仪的工作原理。在此基础上，针对一些对仪器产生影响的问题提出简略的解决方法，同时阐述了此系统的优点以及应用。

关键词：迈克尔逊干涉；传感器；降噪；特点；应用

中图分类号：TN253 文献标识码：A 文章编号：1006-883X(2009)06-0010-04

►► 刘均琦 张扬 张腾 李代林

一、引言

光纤传感技术是 20 世纪 70 年代伴随光纤通信技术的发展而迅速发展起来的，它是以光波为载体、光纤为媒质、感知和传输外界被测量信号的新型传感技术，是许多经济、军事强国争相研究的高新技术，可广泛应用于国民经济的各个领域和国防军事领域，在航天（飞机及航天器各部位压力测量、温度测量、陀螺等）、航海（声纳）、石油开采（液面高度、流量测量、二相流中空隙度的测量）、电力传输（高压输电网的电流测量、电压测量）、核工业（放射剂量测量、原子能发电站泄漏剂量监测）、医疗（血液流速测量、血压及心音测量）、科学研究等众多领域都得到了广泛的应用。

1883 年美国物理学家迈克尔逊和莫雷合作发明迈克尔逊干涉仪使得测量微小位移量和微振动变得简单。而由于光纤具有抗电磁干扰、耐腐蚀、电绝缘性好、防爆、体积小、重量轻、可绕性好等特点，人们将两者的优点结合在一起出现了光纤迈克尔逊干涉仪。光纤传感器的传感灵敏度要比传统传感器高许多倍，具有高灵敏度、耐腐蚀、抗干扰、体积小等优点，可以检测温度、压力、角位移、电压、电流、声音和磁场等多种物理量^[1]。再者，迈克尔逊干涉仪因具有结构简单、条纹对比度好、信噪比高、条纹的计数和被测位移的计算关系简单等优点而受到广泛的研究和应用。

二、光纤迈克尔逊干涉仪系统原理

光纤迈克尔逊干涉仪的基本工作原理如图 1 所示^[2]。He-Ne 激光通过耦合透镜进入单模光纤后被光纤耦合器分成强度相等的两束，分别进入参考臂和传感臂中传播。两干涉臂中传播的光线经各自光纤端面的反射镜 M_1 、 M_2 反射重新返回

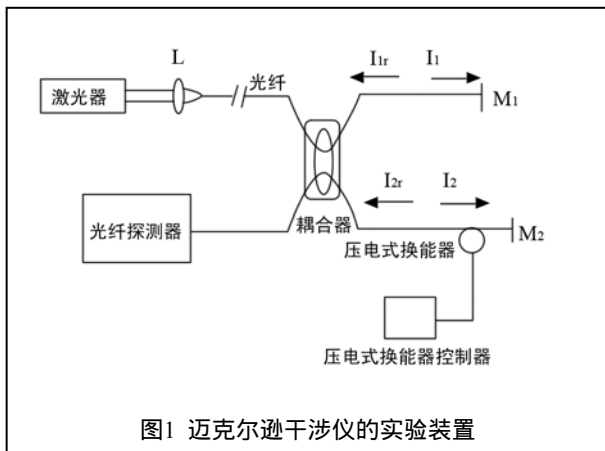


图1 迈克尔逊干涉仪的实验装置

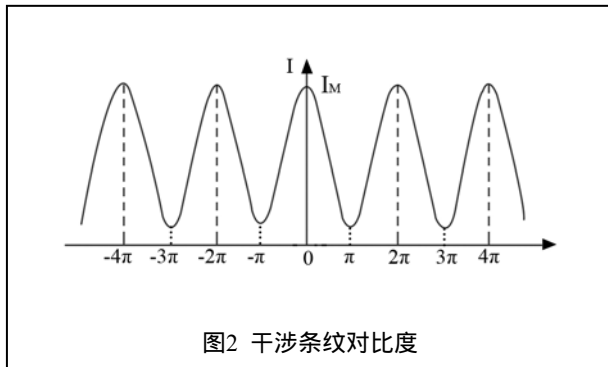


图2 干涉条纹对比度

光纤中,当干涉仪两个臂间的光程差小于光源的相干长度时,两束光在光纤耦合器的另一输出端将发生干涉。输出的干涉信号进入光电探测器D。这样光电探测器D就给出了干涉强度和两束光光程差之间的函数关系,这就是干涉图。图2为光纤迈克尔逊干涉相位差与光强的关系图。

图1中, I_1 、 I_2 为光纤出射端面反射的光强, I_{1r} 、 I_{2r} 为试件界面反射进入光纤的光强。图1中所示的4束反射光到达光探测器产生干涉,其输出光强 I_{out} 可表示为^[3]:

$$I_{out} = (I_1 + I_2 + I_{1r} + I_{2r}) + (I_{12} + I_{11r} + I_{12r} + I_{21r} + I_{22r} + I_{1r2r}) \quad (1)$$

式中, I_1 、 I_2 —光纤出射端面反射的光强;

I_{1r} 、 I_{2r} —试件界面反射进入光纤的光强;

I_{12} 、 I_{11r} 、 I_{12r} 、 I_{21r} 、 I_{22r} 、 I_{1r2r} —两束入射光和两束反射光干涉的光强。

用 φ_1 和 φ_2 分别表示干涉仪两臂的光纤端面反射光 I_1 和 I_2 到达探测器的位相,而分别用 φ_{1r} 和 φ_{2r} 表示试件表面反射体和有声绝缘体的反射体的反射并进入光纤中的光 I_{1r} 和 I_{2r} 到达探测器的位相。

在式(1)中,相干项可表示为:

$$I_{ij} = 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\varphi_i - \varphi_j), i \neq j \quad (2)$$

式中, φ_1 、 φ_2 —干涉仪两臂的光纤端面反射光 I_1 和 I_2 到达探测器的位相,是与光纤耦合器的耦合系数和注入到光电探测器的光功率相关的常量。

假定耦合器无损且完全对称的情况下,可认为 $I_1 = I_2$,调节光纤耦合器两臂的长度,使两臂的位相差 $\varphi_1 - \varphi_2$ 等于 π ,于是 $I_{12} = 2I_1 \cos\pi = -2I_1$ 。当 $\varphi_1 - \varphi_2 = \pi$ 时,可以证明 $I_{11r} = -I_{21r}$, $I_{12r} = -I_{22r}$,于是探测光强可写为:

$$I_{out} = (I_{1r} + I_{2r}) + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\varphi_{1r} - \varphi_{2r}) \quad (3)$$

$$\Delta\varphi = \varphi_{1r} - \varphi_{2r} = 2k_0 n l_s - 2k_0 n l_r \quad (4)$$

式中, $\Delta\varphi$ —相位差;

φ_{1r} 、 φ_{2r} —表示试件表面反射体和有声绝缘体的反射体的反射并进入光纤中的光 I_{1r} 和 I_{2r} 到达探测器的位相,与光纤耦合器的耦合系数和注入到光电探测器的光功率相关的常量;

l_s —信号臂光纤的长度;

l_r —参考臂光纤的长度;

n —折射率;

对于干涉检测,通常只关心交流项,即在这个问题中要检测的是 I_{1r2r} 。

三、光纤迈克尔逊干涉仪信号的处理

仪器在生产 and 操作的过程中,总是存在一定的噪声影响系统的准确性。其中系统固有的噪声包括光源噪声(Optical Source Noise)^[4]、热噪声(Thermal Noise)^[5-7]、基础光噪声(Fundamental Optical Noise)(我们系统中无光纤放大器,故基础光噪声仅为散弹噪声,Shot Noise)^[6,7]、电噪声(Electronics Noise),在进行精密测量时必须设法减小对检测信号的影响。

1、减小两干涉臂的光强误差^[8]

产生两干涉臂间光强差的主要来源有:光纤耦合器分束比不是严格意义上的1:1所带来的误差。因为理想情况下,要获得最大干涉图振幅,光纤耦合器对所研究的整个频率范围而言其平坦耦合比必须为1:1^[9],而在实际中要获得如此平坦的耦合比是很困难的;传感臂光纤拉伸效应的能量损失,可以考虑在两干涉臂都加上相位调制器来拉伸光纤。

2、减小温度的影响

利用迈克尔逊干涉仪的对称性结构,传感光路定在待测结构中,参考光路由套管保护起来,两光路共用一个双面反射,移动这个反射镜可以同时调节两光路中的光程。若采用低相干光源入射,移动反射镜使两光束光程差为0。施加应力作用后,移动反射镜使两光路重新达到等光程,从移动的距离中即可获得施加应力的大小。外界温度发生变化时,由于两光路靠得很近,可认为两束光的相位随着温度发生相同的变化,从而实现了温度自动补偿。

3、减小光源的影响^[10]

在传统的迈克尔逊干涉仪系统中有一定量的回程光传回到激光腔中导致光源工作不稳定,使得He—Ne激光器在工作过程中,输出功率会随着时间作周期性或者随机性的波动。尽管激光器功率的变化对相位的影响不显著,但它会引起输出条纹信噪比的变化。可以在光源与光纤之间加一光隔离器,



以消除光纤线路中的回程光对整个系统产生的影响。

4、减小偏振态的影响^[11]

理想情况下的单模光纤模式是线偏振的，它的两个基模 $HE_{11}^{(x)}$ 和 $HE_{11}^{(y)}$ 是相互垂直的线偏振模。它们的传播常数相等，故彼此兼并 ($n_x = n_y$)，在传播过程中，保持彼此相位相同，保持线偏振态不变。实际上，一方面由于光纤本身的不完善性，例如存在横截椭圆度以及残余内应力等引起折射率分布畸变；另一方面由于外场微扰的作用，造成芯径椭圆度或纤芯折射率变化。上述这些变化因素会引起单模光纤偏振态的变化，而且单模光纤在构成光纤干涉仪的两干涉臂时，不可避免会使光纤出现局部扭曲和弯曲应变，从而引入无规则的双折射。此外，弯曲或扭曲导致的线性双折射也使单模光纤的两个正交偏振模之间发生无规则耦合。因此，可以考虑在光纤干涉仪的一臂中加入一个高频调制的法拉第旋转器。法拉第旋转器导致臂中光波的偏振态旋转，经过处理我们可以近似保持线偏振态不变。

5、提高光的利用率^[12]

从光纤Michelson干涉仪的原理可知，经光纤定向耦合器分束和合束后的光只有50% 最后到达光电探测器，另外的50% 被反射回光源方向，没有被利用。可以考虑用两个光纤定向耦合器（即构成了光纤Mach—Zehnder干涉仪）来提高光的利用率，从而进一步提高条纹的对比度。

另外，在实验过程中经常受到多种因素的干扰，如热干扰和电干扰（主要来源于光源和电器件）、环境干扰（主要来源于杂散光、空气的扰动及外界的震动）等等。为了防止电干扰，可以考虑将电器件与光学部分隔离组装。为了消除环境干扰，可以考虑将干涉仪全密封，同时对系统的工作点进行有效控制。

四、光纤迈克尔逊干涉传感器的优点^[13]

与普通机械、电子类传感器相比，光纤迈克尔逊干涉传感器具有以下优点^[14]：

1、抗电磁干扰、电绝缘、耐腐蚀、使用安全。由于光纤传感器是利用光波传输信息，而光纤是电绝缘、耐腐蚀的传输媒质，并且安全可靠，这使得它可以方便有效地被用于各种大型机电、石油化工、矿井等强电磁干扰和易燃易爆等恶劣环境中。

2、灵敏度高。光纤传感器的灵敏度优于一般的传感器，如测量水声、加速度、辐射、磁场、应变和温度等物理量的光纤传感器，测量各种气体浓度的光纤化学传感器和测量各种生物量的光纤生物传感器等。

3、重量轻、体积小、可挠曲。光纤除具有重量轻、体积小等特点外，还有可挠曲的优点，因此可以利用光纤制成不同外型、不同尺寸的各种传感器。

4、测量对象广泛。可测量温度、压强、应变、应力、流量、流速、电流、电压、液位、液体浓度、成分等。

5、传输损耗小。可实现远距离遥控监测。

6、传输容量大。便于复用和成网，可实现多点分布式测量。

7、成本低。有些种类的光纤传感器的成本大大低于现有同类传感器。而有些OFS 由于其特殊性能，它和现有仪器结合，将使其大大增值。

五、光纤迈克尔逊干涉传感器的应用^[15,16]

1、应用于教学

传统的迈克尔逊干涉仪在演示双光束的干涉时，能够较清晰地看出干涉条纹，但动态演示干涉过程效果不理想。而光纤迈克尔逊干涉仪系统能从电信号和光信号两方面演示双光束的干涉，特别是与PC机相连后，能够动态地演示双光束干涉的整个过程。

2、测量微位移

在图1中，把信号臂一侧的反射端面贴在待测量对象（比如置于空气中）上，测定信号臂光纤端面与反射端面距离，当反射端面随着待测物体发生微位移时，干涉光的光强随之变化，以此来达到测量微位移的目的。

3、测量折射率

在图1中，把信号臂一侧的反射端面固定，待测物体置于信号臂光纤端面与反射端面之间后，式（4）变形为：

$$\Delta\varphi = 2k_0 n_x l_x + 2k_0 (l_0 - l_x) + 2k_0 l_x n_x - 2k_0 n_l l_r \quad (5)$$

式中， l_0 —信号臂光纤端面与反射端面距离；

l_x —待测物体长；

n_x —折射率；

待测物体长 l_x 可以测量出来，在式（5）中待测物体折射率 n_x 改变了干涉光的光强，由光强的变化测量物体的折射率 n_x 。

4、测量微应变、应力

把信号臂紧贴在待测量对象表面，当应变波作用在信号臂上时，使光纤发生微小形变进而改变信号臂光纤的折射率，光纤的折射率的变化使相位差发生变化，进而使干涉光的光强变化，以此来达到测量微应变、应力的目的。

5、测量磁场的强弱

把信号臂涂上一层磁敏材料置于待测量磁场中，当磁场

作用在磁敏材料上时,使光纤发生收缩进而改变信号臂光纤的折射率和长度,这样相位差发生变化,进而使干涉光的光强变化,以此来测量磁场的强弱。

6、测量压力

图1中,把压力膜片表面镀上一层反射膜作为信号臂光纤的反射端面,测定压力膜片信号臂光纤端面的距离。当待测压力作用在膜片上时,压力通过改变相位来改变反射率,进而改变干涉光的光强,来达到测量压力的目的。

六、结束语

综合各方面的因素,光纤传感器完全有理由成为检测领域的重要工具。光纤传感器具有轻巧性、耐用性和长期稳定性,而且可被用来检测温度、应变、加速度、振动和化学变化等众多参量,有着多任务、多元素测试的发展趋势。20世纪西欧各国争相把传感器技术列为本国国防科技发展的重点技术,到了21世纪,各方面对传感器的需要也越来越强烈,但是我国目前生产的传感器,无论在品种、数量和质量上都远远满足不了市场的需求,在这些方面还有待进一步的研究和完善。

参考文献

- [1]李朝辉,戴景民.光纤传感技术在燃气流量计研制中的应用[J].计量技术,2006,(4):13-14.
- [2]余瑞兰,刘勇,王安.光纤Michelson干涉仪干涉条纹对比度的研究[J].大气与环境光学学报,2007,2(3):231-235.
- [3]YUAN L B,ZHOU L M,JIN W, Long-gauge length embedded fiber optic ultrasonic sensor for large-scale concrete structures [J]. Optics & Laser Technology,2004,36:11-17.
- [4]Kirkendall C K,Dandridge A.Overview of high performance fiber optic sensing[J].Journal of Physics,2004.393(1):197-216.
- [5]Bucholtz F,Colliander J E,Dandridge A. Thermal noise spectrum of a fiber-optic magnetostrictive transducer [J]. Optics Letters,1991.16(6):432-434.
- [6]Wanser,K H. Fundamental phase noise limit in optical fibres due to temperature fluctuations[J]. Electronics Letters,1992,28(1):53-54.
- [7]Krakenes K,Blotekjaer K. Blotekjaer. Comparison of fiber-optic sagnac and Mach-zehnder interferometers with respect to thermal processes in the fiber[J]. Journal of Lightwave Technology,1995,13(4):682-686.
- [8]赵凯华,钟锡华.光学[M].北京:北京大学出版社,1984:167.
- [9]Stelzle M, et al. An all-fiber-optic Fourier transform spectrometer[J]. Meas. Sci. Technol.,1996,(7):1619-1630.
- [10]Li Zhigang. Data sampling of Fourier transform spectrometer interfereogram using laser interference fringe[J]. Journal of Optoelectronics Laser,2000,11(5):503-506.

- [11]Ming Hal, et al. Photoelectron Technology[M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press,1998:235-239(in Chinese).
- [12]余瑞兰,刘勇,王安.光纤Michelson干涉仪干涉条纹对比度的研究[J].大气与环境光学学报,2007,2(3):231-235
- [13]原安娟,柴常.基于迈克尔逊干涉原理的光纤传感器研究[J].山西大同大学学报(自然科学版),2008,(2):29-31
- [14]刘瑞复,史锦珊.光纤传感器及其应用[M].北京:机械工业出版社,1987.64-66.
- [15]刘德明,向清,黄德修.光纤光学[M].北京:国防工业出版社,1995
- [16]Yuan L B,Zhou L M, Jin W. Fiber optical differential Interferometer[J].IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement,2000,49(4):79-82.

An overview of optical fiber sensor based on the Michelson interference principle

LIU Jun-qi,ZHANG Yang,ZHANG Teng,LI Dai-lin

(China University of Petroleum,Dongying 257061,China)

Abstract: From the view of fiber-optic Michelson interferometer based on the Michelson interference principle, the theory of fiber-optic Michelson interferometer system is introduced, and the working principle of the interferometer is analyzed. On the basis of the above, a briefly solution is taken for some equipment issues. At the same time the merits and applications of this system are elaborated too.

Keywords: Michelson interferometer; sensor; noise reduction; features; application

作者简介:

刘均琦,中国石油大学学生,研究方向:光信息及光电子
 通讯地址:山东省东营市北二路271号中国石油大学(华东)
 物理科学与技术学院光信息科学与技术2006级1班
 电话:0546-8394323 手机:13854619939
 邮编:257061 Email:angllau@vip.qq.com
 张扬:中国石油大学学生,研究方向:材料物理
 张腾:中国石油大学学生,研究方向:材料物理
 李代林:中国石油大学讲师,主要从事光学测井与光学检测工作

读者服务卡编号002