

光纤传感技术在物理测量中的应用

关 铁 樑

(西南应用磁学研究所)

一、引 言

光纤作为光纤通信的传输介质已为大家所熟知。近年来,利用光纤又迅速发展起来一种崭新的测量技术——光纤传感技术,它可以测量声振动、磁场、电流、温度、转角、加速度、扭矩、位移等多种物理量。其优点是测量精度高,一般可超过现有方法的一至几个量级。例如,用光纤传感技术测量磁场,室温工作时的灵敏度接近低温状态工作的超导量子干涉仪的水平。这种测量技术可用于高温、高压、腐蚀、应力及电干扰等各种环境。另一特点是具有多用性。测量不同的物理量是基于相同的原理,因而可使用相同的检测部分。另外,光纤的使用允许根据不同的使用场合,适当改变器件外形。

此项技术发展十分迅速而且竞争能力强。短短几年来,出现了六十多种不同类型、用于测量不同物理量的光纤传感器。仅1977至1979年间,光纤声波传感技术的测量灵敏度就提高了100分贝,从而超过了传统的声电技术。目前有些光纤传感器已投入市场。

本文介绍光纤传感技术的基本原理,各种类型光纤传感器的特点及现有水平。也指出进一步发展这种技术尚需解决的问题。

二、基本 原理

当光纤暴露在待测外场(如声波、磁场、温度等)中时,光纤中由外场感生的应变将改变传播光束的振幅和相位。光纤传感技术即通过测

物理

量这种光强或相位的变化,来确定扰动的物理量。因此,光纤传感技术又分为振幅传感及相位传感两种。前者结构简单,便于测量而且可用多模光纤完成。相位传感可提供更高的检测灵敏度并可用来测量更多的物理量。

图1为光纤相位传感技术工作原理图。整个装置为一台马赫-泽德(Mach-Zehnder)光纤干涉仪。其光路安排与传统的马赫-泽德干涉仪相同,但光束不是在空间传播,而由光纤引导。入射激光束经分束器后,分别进入干涉仪的信号臂及参考臂。光束经过信号臂中光纤探

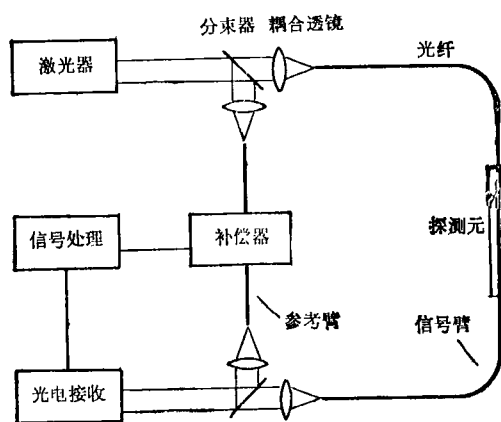


图1 马赫-泽德光纤干涉仪

测元时,受到待测外场的作用,相位受到调制。它与参考臂中光束相遇后,得到的干涉信号由光电探测器接收。为了克服周围环境中温度、气流等低频起伏的影响,在参考臂中有一补偿器,以便采用零拍^[1]或外差^[2]等解调技术从光电信号中检测出待测物理量。为了提高光源至光纤的耦合效率并减少噪音,最近使用“瓶状”耦合器^[3]代替分束器,组成全光纤干涉仪^[4]。检测灵敏度达 10^{-6} 弧度。

信号臂中光纤探测元是光纤对外场的敏感段。其结构设计因被测的物理量而异。对测量同一物理量而言,也应根据检测灵敏度、频率响应和线性等具体要求,选用不同的材料并给出适当的结构设计。

三、各种光纤传感技术

1. 光纤磁传感技术

从原理上讲,光纤传感技术测量磁场可分为两种类型。一是利用磁光效应,另一是利用磁致伸缩效应。前者是将外磁场纵向加在纤维上,以转动线偏振光的偏振方向。经检偏器后,检测光强度的变化,此种方法属振幅传感。由于硅光纤的费尔德常数低,起初只能用于高磁场、大电流(1—1000 安培)的测量。将某些稀土离子掺入光纤可提高费尔德常数,但会使可见区及部分近红外区的光吸收有所增加。在最理想情况下,这种方法检测磁场的灵敏度可达 10^{-4} 高斯/米。

利用磁致伸缩效应构成的光纤探测元,普遍用于低磁场测量。图 2 给出了这种光纤探测元的三种典型结构。图 2 (a) 和 (b) 分别表示将光纤绕在棒状磁致伸缩材料上或将单根光纤放在磁致伸缩板条上,然后用环氧树脂粘合。图 2 (c) 是用电镀或真空沉积方法在光纤外形成一定厚度的磁致伸缩包层。在待测磁场作用

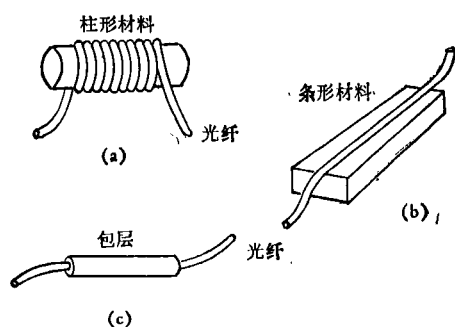


图 2 光纤磁场探测元的结构示意图

下,磁致伸缩材料线度的变化引起光纤内传播光束的相位调制并由光纤干涉仪检测。为了提高探测元灵敏度,在测量微小交变磁场时,一

般要加一恒定偏磁场,其方向与待测交变场平行。

最近两年,寻找高磁致伸缩系数的材料和设计新型高效能光纤探测元的研究工作十分活跃。目前使用较多的材料主要有某些金属及其合金或金属玻璃。Dandridge 和 Tveten^[5] 首先用条状 Ni 磁致伸缩材料及 Ni 包层型光纤磁场探测元进行了实验。检测灵敏度达 10^{-8} 高斯/米光纤。比较成功的金属玻璃是 Allied 化学公司生产的 2605SC 和 2605 CO 型 FeBSi 系列磁致伸缩材料。一般以图 2(b) 形式用于探测元中。表 1 给出使用不同形式的探测元得到的检测灵敏度。待测交变磁场频率为 1000 赫兹。

表 1 几种光纤探测元的最小可测磁场

探测元结构	直流偏磁场 (高斯)	最小可测磁场 高斯/米
电镀 Ni 膜	0	6.0×10^{-7}
真空沉积 Ni 膜	0	1.0×10^{-4}
条状金属玻璃	0	2.3×10^{-8}
柱状金属玻璃	0.94	5×10^{-9}
条状 Ni	2.8	8×10^{-8}

除最小可测磁场外,另一个重要参数是传感器的频率响应。在 100—1000 赫兹范围内,磁致伸缩系数随外加磁场频率的变化不大。光纤磁传感器的频率响应在高频段的限制主要由金属中感生涡流损失引起。低频截止频率受检测方案、激光噪音、对环境中低频起伏的抑制程度等因素的影响。精心设计的光纤磁传感器,可在几十至 10^4 赫兹频率范围内工作^[6]。

尽管目前超导量子干涉仪可测 10^{-11} — 10^{-12} 高斯的超低磁场,但必须在实验室内提供的低温条件下工作,设备庞大,不能做现场测量。因此上述室温工作、高灵敏度、结构紧凑的光纤磁传感技术已列为目前磁强计技术的发展方向。仅以目前每米光纤为 10^{-9} 高斯的灵敏度,增加光纤的探测长度达 100 米以上,使检测灵敏度达 10^{-11} 高斯是完全可以实现的。1983 年 1 月份,已有光纤磁传感器在市场出售^[7]。

2. 光纤声传感技术

在光纤声传感技术中, 光纤干涉仪两臂中光束的相对相位差由光纤在声压下, 长度及折射率受到调制引起. 声波与光纤相互作用, 可依声波频率分为三种情况. 假定光纤探测元是一直径为 d 的光纤围成的一个直径为 D 的圆环. 在低频段, 声波波长 $\lambda > D$, 光纤基本上只受到声波的静压力. 中频段, λ 与 D 可以比较但大于 d , 此时应考虑沿声波传播方向的压力梯度对光纤探测元的影响. 在高频段, 波长 λ 与 d 相当或小于 d . 声波将在光纤横截面上感生各向异性的应变分布, 因此应考虑双折射对传播模的影响.

光纤探测元除上述圆环外, 也可以是光纤绕成的平面线圈、圆柱线圈或一段直光纤. 在普通单模或多模高纯硅光纤中, 声波感生传播光束的相位变化较小. 目前普遍使用具有不同杨氏模量的多层光纤组成探测元. 这种光纤在声场作用下, 可大大增加纤芯的纵向应变, 并可使感生的相位移提高 30 多倍.

多层光纤结构自中心向外一般为: 纤芯、低折射率套层、玻璃基质、软橡胶和硬塑料套层. 在低频段, 光纤中光束相位的压力灵敏度定义为 $\Delta\phi/\phi \cdot \Delta p$. 其中 $\Delta\phi$ 是由于压力变化 Δp 引起光相位 ϕ 产生的位移. 对于给定的压力变化 Δp , 在光纤中引起轴向应变 ϵ_z 和径向应变 ϵ_r , 并有

$$\Delta\phi/\phi = \epsilon_z - \frac{n^2}{2} [(P_{11} + P_{12})\epsilon_r + P_{12}\epsilon_z], \quad (1)$$

其中 P_{11} 和 P_{12} 是纤芯的泡克耳斯系数, n 是纤芯折射率. 上式第一项由光纤长度变化引起, 第二、三项是纤芯折射率受调制的结果. 纤芯应变 ϵ_z 和 ϵ_r 与各层材料的杨氏模量及泊松比等参数有关. 根据弹性理论和光纤各层界面上的边界条件^[8], 可计算出压力灵敏度 $\Delta\phi/\phi \Delta p$ 与光纤最外硬塑料套层厚度的关系 (见图 3). 图中 ϵ_z^p 表示光纤长度调制引起的相位变化, ϵ_r^p 和 ϵ_z^s 表示折射率调制引起的相移.

适当选择光纤外层材料及厚度, 可使探测元声压灵敏度显著提高. 实验结果表明, 目前

物理

达到的光纤压力灵敏度为 -10^{-12} (达因/厘米²) 量级, 而且在 100—1500 赫兹范围内有良好的频率响应.

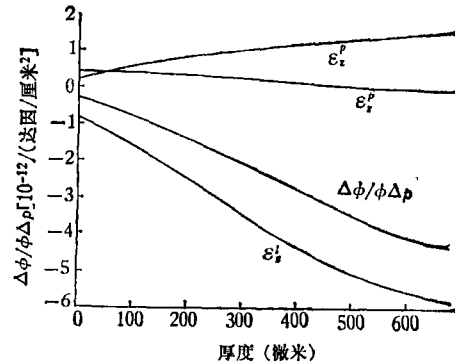


图 3 光纤压力灵敏度与外套层厚度的关系

中频 (10^3 — 10^5 赫兹) 和 高频 (几十兆赫以下) 声波光纤传感技术的研究工作开展得稍晚一些, 目前在理论及实验上已有初步结果^[9,10].

光纤声传感技术中要解决的另一问题是光纤的声退敏. 因为即使是裸光纤, 也会在声波场中感生一定的应变, 使传播光束的相位受到调制, 因而在光纤参考臂中必须设法尽量减少这种压力敏感性, 以增加信号臂及参考臂中光束的相对相位差. 从图 3 可见, ϵ_r^p 和 ϵ_z^s 相对于 ϵ_z^p 有相反的极性, 因而适当选择包层材料, 有可能在某一合适的厚度上使压力灵敏度 $\Delta\phi/\phi \Delta p$ 为零. 图 4 分别表明用金属 Ni, Al 和铝酸钙玻璃等具有高弹性模量的材料作为包层的光纤的压力灵敏度. 从图可见, 铝及铝酸钙玻

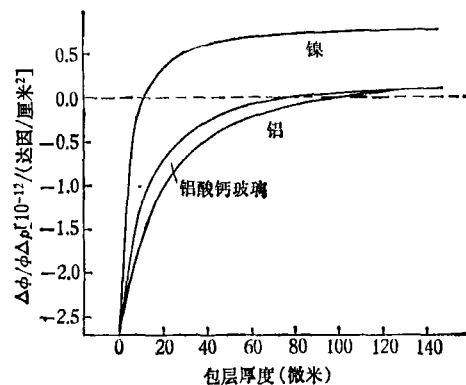


图 4 具有不同包层材料光纤的压力灵敏度曲线

璃包层光纤的灵敏度曲线,在 $\Delta\phi/\phi\Delta\rho = 0$ 的临界厚度附近变化缓慢。这便降低了制备过程中对厚度控制的要求,便于制作。

除上述相位调制的光纤声传感技术以外,还可以通过多种方式,使光纤中传播光束的强度受到外加声场的调制,从而实现对声波的检测。基于这种原理的一个典型例子是受抑全反射法。图 5 上部为工作原理图。两光纤端面抛光并与光纤轴成一定角度,使光束在端面的入射角 θ 大于光纤内各传播模的全反射角,两端面以厚度为 t 的空气间隙分开。当 t 为几微米量级时,传播光束可由一根光纤耦合入另一根光纤。外加声振动使光纤产生垂直位移,因而调制了耦合光强。

Spellman 计算了在声波作用下,光纤一端垂直位移与相对耦合强度的关系,并进行了实验^[11],如图 5 下半部所示,这种测量可用多模光纤完成。在 100—10,000 赫兹范围内有良好的频率响应,其优点是检测阈值低,相对于 1 微帕斯卡为 62 分贝 (1 帕斯卡 = 1 牛顿/米²)。

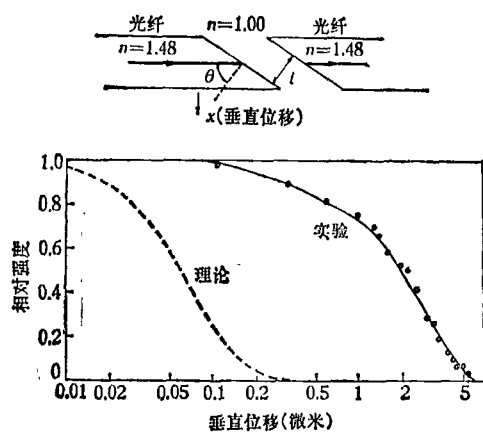


图 5

上图受抑全反射型光纤探测元;
下图为垂直位移 x 和相对耦合强度的关系

光纤声传感技术发展很快,目前已比较完善,有些已作为水声探测器在深海试用。由于最小可测压力低,探测方向性强,在深海勘查及海军应用方面,有明显的竞争力。

3. 光纤温度传感技术

光纤温度传感测量中的探测元可以是一段普通光纤。设光纤温度变化为 ΔT 时,由于光纤长度的变化以及温度感生的折射率的变化,使传播光束相位改变 $\Delta\phi$,当忽略光纤直径的变化时,应有

$$\frac{\Delta\phi}{\Delta TL} = \frac{2\pi}{\lambda_0} \left(\frac{n}{L} \frac{dL}{dT} + \frac{dn}{dT} \right), \quad (2)$$

上式中 L 为光纤的探测长度, λ_0 为光波长。这种方法测温灵敏度预计可达摄氏 10^{-8} 度。

Kyuman^[12] 等人利用半导体中光吸收随温度变化的原理,制成了另一种光纤温度传感器。其测量范围为摄氏 $-10-300$ 度。精度为摄氏 ± 0.1 度。响应时间是 2 秒。

在许多高压电力机械(如发电机、变压器等)以及某些化学反应中,需测出它们的工作温度。但普通金属热电偶无法直接测量。在这些特殊场合下,光纤的抗腐蚀性良好的电绝缘性便成为不可取代的优点。

4. 光纤加速度传感技术

将带有重锤的光纤固定在两支撑臂之间,便可组成光纤加速度探测元^[13]。当探测元以加速度 a 运动时,在承重光纤中感生的应变 $\delta L/L$ 比例于加速度 a :

$$\delta L/L = ma/YA, \quad (3)$$

其中 Y, A, L 分别为光纤的杨氏模量、横截面及作用长度, m 为重锤质量。探测元灵敏度可用单位加速度变化引起的相移表示为

$$\delta\phi/a = 8Lmn/\lambda Yd^2. \quad (4)$$

这种加速度计的实验结果表明,在 $10^{-6}-10$ 米/秒² 加速度范围内,对 300—600 赫兹的加速度变化,干涉仪输出与加速度呈线性关系。检测灵敏度最高达 10^{-7} 米/秒²。光纤加速度计在宇航技术及地震研究中有明显的应用前景。

5. 其他光纤传感技术

除上面四个例子外,还可用来测量转角(光纤陀螺)^[14]、应变^[15]、电流^[16]、辐射剂量^[17]、位移^[18]等等,这里不再一一细述。值得注意的是,一种光纤探针式探测元。它不是将探测元的两端连接在光纤干涉仪信号臂中,以形成光的回路,而是利用在光纤顶端的全反射,以光纤的一

端探测。因而可以测量光纤直径量级窄小空间的外场分布。

四、展 望

光纤传感技术的研究工作是从1977年开始的。短短几年来已基本解决了理论计算、结构设计、实验测量中的关键问题,开始向实用阶段发展。

光纤传感技术赖以发展的基础是:(1)光学干涉计量;(2)光纤在多种外场中感生应变并可在适当形式的探测元中得到增强;(3)包括外形在内的光纤本身的电绝缘、易弯曲等特性。所有这些使得光纤传感技术具有灵敏度高、应用范围广、可在特殊场合使用等优点,再加上造价低廉,因而有极大的实用潜力。有人专门论述了它的前景并进行了市场预测^[19]。

尽管如此,光纤传感技术仍处于发展阶段。今后一方面要继续提高测量灵敏度并设计新型探测元,以测量更多物理量;另一方面是完善其性能,降低各环节引起的噪音,最终制成实用器件。从光纤传感技术所需设备、元件、工艺、检测及信号处理手段各方面看,在我国发展这一有用的新技术是非常必要而且现实的。

首先必须有效地抑制光纤干涉仪的输出噪音。这种噪音主要来源于光源及外界环境。目前常见的6328埃 He-Ne 激光器有足够的相干长度,并可达到较好的输出振幅及频率稳定性,但体积较大。另外,为了便于激光器和光纤之间的耦合以及工作波长与光纤的低损耗区相匹配,使用工作波长1.3微米左右的半导体激光器更为合适。为了使光纤干涉仪具有 10^{-6} 弧度的灵敏度,要求激光器振幅稳定性优于一120分贝。

激光器工作波长的随机变化还会引起光纤干涉仪中的相位噪音。因此必须设法使反馈回激光器的相对光强低于 $10^{-3}\%$ 量级,以减少激

光器在不同纵模之间的振荡。为此应考虑使用光纤通信用的光隔离器^[20]。

可以采用两种途径抑制光纤干涉仪输出中周围环境引起的噪音。一是完善光纤干涉仪中的解调技术;二是改进光纤探测元的设计。除文中提到的声退敏外,还应考虑探测元本身对其它非待测场的屏蔽或退敏。

另外,在振幅光纤传感技术中,要求可靠的机械稳定性;由于单根光纤相对低的强度,必须保证有效的封装;为减少各光学元件之间的耦合损失,进一步使器件小型、可靠,应采用光学集成技术等等。

参 考 文 献

- [1] D. A. Jackson et al., *Appl. Opt.*, **19** (1980), 2926.
- [2] J. H. Cole et al., *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-18** (1982), 694.
- [3] S. K. Sheem et al., *Opt. Lett.*, **4** (1979), 29.
- [4] D. A. Jackson et al., *Opt. Lett.*, **5** (1980), 139.
- [5] A. Dandridge et al., *Electron. Lett.*, **16** (1980), 408.
- [6] T. G. Giallorenzi et al., *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-18** (1982), 626.
- [7] 日経エレクトロニクス, No. 311, (1983), 87.
- [8] N. Lagakos et al., *Appl. Opt.*, **20** (1981), 2716.
- [9] J. Jarzynski et al., *J. Acoust. Soc. Am.*, **69** (1981), 1799.
- [10] R. P. Depaula et al., *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-18** (1982), 680.
- [11] W. B. Spellman et al., *Appl. Opt.*, **19** (1980), 113.
- [12] K. Kyuma et al., *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-18** (1982), 676.
- [13] A. B. Tveten et al., *Electron. Lett.*, **16** (1980), 854.
- [14] R. A. Bergh et al., *Opt. Lett.*, **6** (1981), 198.
- [15] M. Martinelli, *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-18** (1982), 666.
- [16] A. Dandridge et al., *Electron. Lett.*, **17** (1981), 523.
- [17] D. B. Eveans et al., *IEEE Tran. Nucl. Sci.*, **NS-25** (1978), 1619.
- [18] N. Lagakos et al., *Appl. Opt.*, **20** (1981), 167.
- [19] L. Vanmeter, *Int. Fiber Opt. Commun. J.*, **2** (1981), 19.
- [20] 关铁樵, 激光, **8-7**(1981), 11.