

1983年,英国曼彻斯特举行的欧洲传感器展览会上展出了用于压力、温度、速度测量的传感器,全光纤干涉仪以及适用于危险地区、电磁噪声恶劣的环境过程控制用的高分辨率长冲位移传感器。德国的西门子公司早在1980年便制成了高压光纤电流互感器的实验机样品。日本在20世纪80年代便制定了“光应用计划控制系统”的规划,该计划投资70亿美元旨在将光纤传感器应用于大型工厂,以解决强电磁干扰和易燃、易爆等恶劣环境中信息传输和生产过程的过程控制问题。20世纪90年代,由东芝、日本电器等15家公司和研究机构研究开发出12种具有一流水平的民用光纤传感器。

据第15届国际光纤传感器会议统计:在光纤传感器市场份额中,“应力”占23%，“温度”占17.2%，“气压声学”占15.2%，“电流电压”占12.2%，“化学/气体”占11.3%。就传感器类型来说,“光纤光栅”占44.2%，“分光计”占11.1%，“散射/反射”占10%，“法拉第旋光效应”占6.9%，“荧光/黑体”占6.6%，“光纤陀螺仪”占4.4%。

## 2. 光纤传感器的原理

光纤是利用光的全反射原理来引导光波的。当光波在光纤中传输时,表征光波的特征参量(如振幅、相位、偏振态、波长等)会由于被测参量(如温度、压力、加速度、电场、磁场等)对光纤的作用而发生变化,从而引起光波的强度、干涉效应、偏振面发生变化,使光波成为被调制的信号光,再经过光探测器和解调器从而获得被测参量的参数。

在光纤中传输的光波可用如下方程描述:

$$E = E_0 \cos(\omega t + \Psi), \quad (1)$$

式中,  $E_0$  为光波的振幅、 $\omega$  为圆频率、 $\Psi$  为初相角。

(1) 式包含五个参数,即强度  $E_0$ 、频率  $\omega$ 、波长  $\lambda_0 = 2\pi c/\omega$  ( $c$  为光速)、相位  $(\omega t + \Psi)$  和偏振态,在被测量的敏感头内与光发生相互作用,如果作用的结果是改变了光的相位,那么就叫做相位调制型光纤传感器,其他诸如强度调制型光纤传感器、频率调制型光纤传感器、偏振调制型光纤传感器、波长(颜色)调制光纤传感器依次类推。其中的相位调制光纤传感器因其灵敏度高,便于实现全光纤传感等优点而在近年来得到了深入的研究,下面以相位调制光纤传感器为例说明光学传感器的基本工作原理。

相位调制光纤传感器通常是通过干涉的方式进

行测量的。其基本原理是利用被测对象对敏感元件的作用,使敏感元件的折射率或传播常数发生变化,从而导致光的相位发生变化,使两束单色光所产生的干涉条纹发生变化,通过检测干涉条纹的变化量来确定光相位的变化量,从而得到被测对象的信息。通常有利用光弹效应(当外力或振动作用于弹性体产生应变时,弹性体的折射率发生变化,呈现双折射性质的现象称为光弹效应,又称应力双折射效应)的声、压力或振动传感器;利用磁致伸缩效应的电流、磁场传感器;利用电致伸缩效应的电场、电压传感器以及利用光纤赛格纳克(Sagnac)效应(发生于一种可以旋转的环形干涉仪,干涉条纹移动数与干涉仪旋转角速度和环路所围面积之积成正比)的旋转角速度传感器(光纤陀螺仪)等。相位调制型光纤传感器通常采用马赫-泽德(Mach-Zehnder)干涉仪结构,如图1所示:

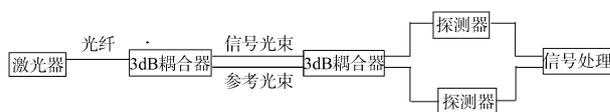


图1 马赫-泽德干涉仪结构图

如图1所示,激光器发出的光经过3dB耦合器分为两束,分别经过参考臂(经过的是参考光束,不受外界参量的影响)和测量臂(经过的是信号光束,受到外部参量的调制),测量臂中传播的光波相位会因外界参量(压力、温度等)的变化而发生变化(被调制)。参考光束和信号光束进入另一个3dB耦合器中,并且经过两个光探测器接入到信号处理电路。在其信号处理过程中,会把相位变化转化为振幅变化。在光波的测量中,参与测量的是两束相干光。若这两束光的振幅分别为  $A_1$  和  $A_2$ , 其中一束光因为某种因素(压力、温度等)的影响而被调制了,则会与另一束光发生干涉。干涉后的光强可表示为:

$$A^2 = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos(\Delta\Psi), \quad (2)$$

式中,  $\Delta\Psi$  为相位调制导致的两相干光束之间的相位差。通过检测干涉光强的变化,以确定两相干光束间相位的变化,从而得到外部参量的数值。

从测量对象上讲,光纤温度传感器是由于温度的变化引起了光纤折射率(对光纤光栅传感器而言是光栅常数)的变化,从而导致干涉条纹的变化,通过干涉条纹的变化分析出相应温度的改变量。光

纤应力传感器是由于当光纤受到一点很微小的外力作用时,就会产生微弯曲,而其传光能力发生一定的变化,导致干涉条纹的变化,进而分析出相应应力的大小。因为声音是一种机械波,它对光纤的作用也是使光纤受力并产生弯曲,通过弯曲就能够得到声音的强弱,所以产生了光纤声传感器。光纤荧光式 pH 值传感器是将荧光胺作为荧光剂固定在支持物上,构成固定荧光指示剂,然后将它们固定在光纤的敏感头部。在激光光源的激发下,荧光胺会发出特定波长的荧光。荧光的强度与溶液 pH 值成函数关系,通过测定荧光强度就能得到待测液 pH 值。其他各种类型的光纤传感器的测量原理与上述几例基本一致,不再赘述。

### 3. 分类

光纤的分类 ①按制作材料分:高纯度石英玻璃光纤、塑料光纤、多组分玻璃光纤;②按传输模式分:单模光纤、多模光纤;③按光纤折射率的径向分布分:阶跃光纤、梯度光纤;④按用途分:通信光纤、非通信光纤(低双折射率光纤、高双折高射率光纤、涂层光纤、液芯光纤、激光光纤、红外光纤等)。

光纤传感器的分类 ①按光纤与光的作用机理分:传光型(非功能型)光纤传感器、传感型(功能型)光纤传感器、拾光型光纤传感器。非功能型光纤传感器的光纤仅起导光作用,只“传”不“感”,对外界信息的“感觉”功能依靠其他功能元件完成。此类光纤传感器比较容易实现,成本低,但灵敏度也较低,用于对灵敏度要求不太高的场合。功能型光纤传感器利用对外界信息具有敏感能力和检测能力的光纤(或特殊光纤)作传感元件,将“传”和“感”合为一体:光纤不仅起传光作用,而且还利用光纤在外界因素的作用下,光学特性的变化来实现“传”和“感”的功能。拾光型光纤传感器用光纤作为探头,接收由被测对象辐射的光或被其反射、散射的光,其典型例子如光纤激光多普勒速度计、辐射式光纤温度传感器等。②按被调制的光波量的不同分:强度调制光纤传感器、相位调制光纤传感器、频率调制光纤传感器、偏振调制光纤传感器、波长(颜色)调制光纤传感器。

强度调制型光纤传感器利用被测对象的变化引起敏感元件的折射率、吸收或反射等参数的变化而导致光强度变化来实现敏感测量。这种传感器结构

简单、容易实现、成本低,但受光源强度波动和连接器损耗变化等影响较大。

相位调制传感器的基本原理是利用被测对象对敏感元件的作用,使敏感元件的折射率或传播常数发生变化,而导致光的相位变化,使两束单色光所产生的干涉条纹发生变化,通过检测干涉条纹的变化量来确定光的相位变化量,从而得到被测对象的信息。这类传感器的灵敏度很高,但由于须用特殊光纤及高精度检测系统,因此成本高。

频率调制光纤传感器是一种利用单色光射到被测物体上,反射回来的光的频率发生变化来进行监测的传感器。如利用运动物体反射光和散射光的多普勒效应的光纤速度、流速、振动、压力、加速度传感器。

偏振调制光纤传感器是一种利用光偏振态变化来传递被测对象信息的传感器。如利用光在磁场中媒质内传播的法拉第效应做成的电流、磁场传感器;利用物质的光弹效应构成的压力、振动或声传感器;以及利用光纤的双折射性构成温度、压力、振动等传感器。这类传感器可以避免光源强度变化的影响,因此灵敏度高。

波长调制主要应用在光纤光栅传感器中,光栅的 Bragg 波长 $\lambda_B=2n\Lambda$ 。式中, $n$ 为芯模有效折射率, $\Lambda$ 为光栅周期。当光纤光栅所处环境的温度、应力、应变或其他物理量发生变化时,光栅周期或纤芯折射率将发生变化,从而使反射光的波长发生变化,通过测量物理量变化前后反射光波长的变化,就可以获得待测物理量的变化情况。

### 4. 光纤传感器的应用

由于光纤传感器具有灵敏度高、响应速度快、防火、防爆、耐腐蚀、体积小、重量轻、寿命长、低损耗、无源性、结构简单、高性价比、复用性好、抗电磁干扰、频带范围宽、动态范围大、传输容量大、测量对象广泛、几何形状可塑、对被测对象影响小、具有分布式测量能力、便于与计算机相连、与光纤传输系统组成遥测网络等优点而被广泛地应用于各行各业,如石油、化工、电力、土木工程、交通、医学、航海航空、地质勘探、通讯、自动控制、计量测试等。

在石油化工系统中,由于井下环境具有高温、高压、化学腐蚀以及电磁干扰强等特点,使得常规传感器难以在井下很好地发挥作用。然而光纤本身

不带电,体积小,质轻,易弯曲,抗电磁干扰、抗辐射性能好,特别适合于易燃易爆、空间受严格限制及强电磁干扰等恶劣环境下使用,因此光纤传感器在油井参数测量中发挥着不可替代的作用,它将成为可应用于石油勘探与开发领域的一项具有广阔市场前景的新技术。例如在流量的测量中,将布喇格光纤光栅固定在弹性金属模片上组成敏感探头,就可用来传感流量信息:管道中的流体造成金属模片的形变,使光纤光栅发生形变,从而改变光纤光栅周期常数,使反射光的中心波长产生微移,检测波长移位的变化就可得到流量的大小。另外,还可用光纤传感器采集石化企业的储罐区涉及的参数如液位、压力、温度、可燃气体浓度等,然后对采集的信号进行处理,并将信号送到值班室的计算机中,实现实时监测功能,从而实现储罐区生产进行在线安全分析和安全控制。

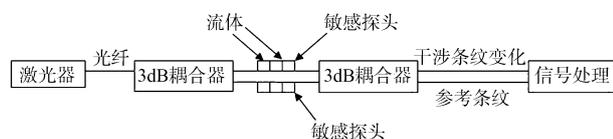


图2 光纤流量传感器测量原理

在电力系统中,需要测定温度、电流等参数,如对高压变压器和大型电机的定子、转子内的温度检测等。由于电类传感器易受强电磁场的干扰,故无法在这些场合中使用。光纤光栅传感器因不受电磁场干扰和可实现长距离低损耗传输,从而成为电力工业应用的理想选择。目前,我国已开始展开这方面的研究工作。另外,电线的载重量、变压器绕线的温度、大电流、局部放电(PDs)等都可利用光纤光栅传感器进行测量。

在民用工程结构中,适用于民用结构的传感器应具备稳定、较高的灵敏度与适应范围、线性响应、单端口、对结构无影响等特点。门德斯(Mendez)等人在1989年首先提出了在混凝土中采用光纤传感器,随后在美国与欧洲都有研究人员报道了在实验室及现场使用光纤传感器进行混凝土结构监测的情况。就安装方式而言,所使用的光纤传感器主要有埋入式与表面附着式两类。光纤传感器可以贴在结构的表面或预先埋入结构中,对结构同时进行冲击检测、形状控制和振动阻尼检测,或由多个光纤传感器串接成一个传感网络,对结构进行准分布式检测,用以实现桥梁、矿井、隧道、大坝、建筑

物等的应力、应变、裂纹、振动、腐蚀等状况的监测。

另外,在地球动力学中,光纤传感器可检测岩石变形、垂直震波,作为地形检波器和光学地震仪;在航天器及船舶中,光纤传感器可检测不同部位的变形力矩、剪切压力、甲板所受的冲击力等,可作为船舶的损伤评估及早期报警,而且由于光纤传感器最为灵巧且波长复用能力极强,尤其适用于需要大量传感器的情况,如对飞行器的应变、温度、振动、起落驾驶状态、超声波场和加速度检测情况;在医学中,由于光纤光栅传感器是目前为止能够做到的最小的传感器,所以用其测量人体组织内部的温度、压力、声波场的精确局部信息对组织的侵害最小,还可用来测心脏的效率;在化学传感中,目前已经用长周期光栅测出了诸如蔗糖、乙醇、己醇、十六烷、CaCl<sub>2</sub>、NaCl等许多化学物质的浓度,原则上,任何具有吸收峰谱并且其折射率在1.3和1.45之间的化学物质都可用长周期光栅进行探测;在光纤通信中,利用长周期光栅可使掺铒光纤放大器(EDLA)的增益谱平坦化;在核工业中,光纤传感器可用于监测反应堆和废料站的情况。而且光纤传感器还可用于机器人手臂传感、安全识别系统等。

## 5. 结束语

光纤传感器以其极为优良的种种性质,迅速地渗透到各个领域,可实现位移、振动、转动、压力、弯曲、速度、加速度、电流、磁场、电压、温度、湿度、声场、流量、浓度、pH值等70多个物理量的测量,无论在测量精度还是简便程度上都大大优越于传统传感器,正逐步取代着传统传感器的位置。如法布里-珀罗(Fabry-Perot)干涉仪型光纤传感器,不但具有一般光纤传感器的长处,而且具有结构简单、测量精度高、动态范围大、线性度好、灵敏度极高等优点,如液位测量精度 $< \pm 2\text{mm}$ 、温度测量精度为 $0.9^\circ\text{C}$ 、应变测量精度可达 $0.009\text{nm}$ 。

目前,光纤传感器技术正朝着微型化、智能化、低功耗、无线传输、便携式方向发展,并预计将于2010年成为拥有超过50亿美元市场的行业。然而由于解调技术还不够成熟,批量生产光纤传感器的厂家还很少,并且我国在技术上和生产能力上同发达国家相比还有较大差距,因此我国的光纤传感器行业任重而道远,但前途光明,潜力巨大。

(中国石油大学物理科学与技术学院 257061)