

光纤传感器及其发展趋势

高希才

(四川压电与声光技术研究所)

摘 要

光纤传感器是本世纪七十年代中后期出现的一种新型光学传感器。本文阐述了它的基本概念、工作原理及其分类等,介绍了它在国防建设和国民经济建设各个领域中的主要应用,评述了光纤传感器的现状及其发展趋势。

人通过五官获得外部世界的信息,由神经网络传输到大脑,经过大脑的分析和判断,使人能认识外部世界并把握自己。类似地,自动控制系统则是通过传感器获取信息,经由导线或光纤传送到计算机,再经计算机处理后作出判断,并发出控制下一步动作的指令。因此,通常把传感器视为与人的五官相应的器件。从这个意义上来说,传感器是一种能把被感知对象的状态变为可处理的信号的器件或装置。

早在本世纪六十年代初期,在发达国家里,人们就已总结出传感器要与计算机相应发展的经验,传感技术受到人们的高度重视,发展异常迅速。到了七十年代中后期,随着光纤和光纤通信技术的发展,出现了光纤传感器。目前,它已成为传感器的一个重要的发展方向。

一、光纤传感器的基本概念

1. 光纤传感器的基本原理

光纤传感器主要是由光学敏感元件、光源、光检测器、信号处理系统以及源光纤和信号光纤等部分组成。由光源发出的光,经源光纤耦合进入光学敏感元件(可由光纤或非光纤物质构成)。当描述光波振动矢量的参数(如振幅、位相、偏振和频率等)之一受被测量调制时,输出载有被测量信息的调制光,经信号光纤传到光检测器后发生光电变换,将光信号转换为电信号,再经信号处理后,就可得到所需的被测量

信息。被测量信息可由数字显示、记录或输出,供自动控制用。

根据电磁场理论,当光波的振动频率为 ω 时,在 t 时刻,离坐标原点为 r 处的光波矢量可用下式表示:

$$\phi(r, t) = A_0 \cos \left[\omega \left(t - \frac{r}{c} \right) + \phi_0 \right], \quad (1)$$

式中 A_0 为光波振动矢量, ϕ_0 为光波矢量的振动初相, $\left[\omega \left(t - \frac{r}{c} \right) + \phi_0 \right]$ 为光波矢量在 t 时刻的振动位相,它可以决定 $\phi(r, t)$ 在 t 时刻的状态, c 为光速。

由此可见,只要被测量的变化能引起光的一个参量(如光强、光的偏振、频率或位相等)变化,即可用光纤传感器来实现光学敏感测量。

2. 光纤传感器的分类

光纤传感器的种类很多,可按光纤在传感器中的功能以及光受被测量调制和解调的形式进行分类,如表1所示。

(1) 根据光纤在传感器中的功能,光纤传感器分为功能型、非功能型和拾光型三大类(见图1)。

(a) 功能型光纤传感器: 在这类传感器中,光纤既是导光媒质又是敏感元件。它利用光纤的性能随被测量而变的性质,使在其中传播的光的基本属性(如位相、偏振、强度等)受被测量调制,将被测量的状态变为可处理的光信号。在这类传感器中,光的调制过程是在光纤

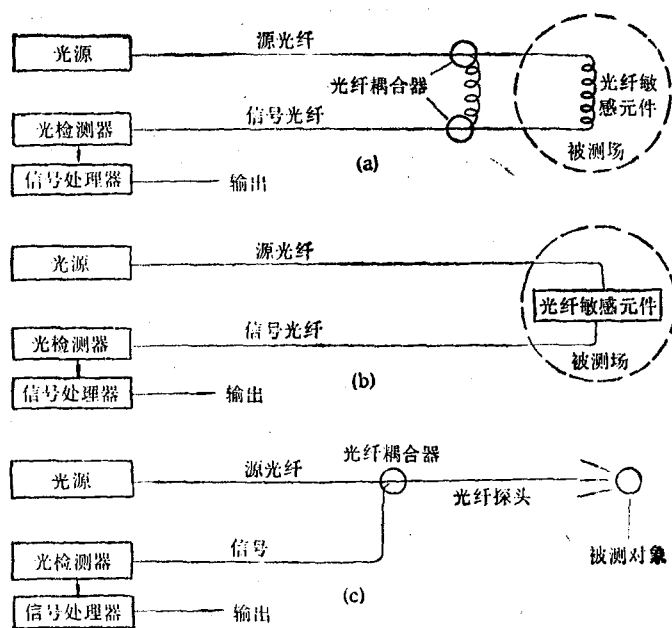


图1 光纤传感器按光纤的功能分类
(a) 功能型; (b) 非功能型; (c) 拾光型

内完成。它的特点是结构紧凑,灵敏度高。但必须采用特殊光纤和先进的检测技术,因此成本较高,主要用于军事或某些特殊场合。其典型例子如光纤陀螺、光纤水听器。

(b) 非功能型光纤传感器: 光纤仅起导光作用,光在由非光纤物质构成的光学敏感元件中受被测量调制,因此光的调制是在光纤外完成。此类传感器无需特殊光纤及其他特殊技术,比较容易实现,故成本低。但灵敏度也较低,适用于对灵敏度要求不太高的工业系统。

(c) 拾光型光纤传感器: 光纤作为传光媒质和传感器的探头,接收被测对象辐射、反射或散射的光,光在光纤外受被测量调制。其典型例子如光纤激光多普勒速度计和辐射式光纤温度传感器等。

(2) 根据光受被测量调制的形式不同,光纤传感器可分为强度调制型、偏振调制型、频率调制型和位相调制型四种(见表1)。

(a) 强度调制型光纤传感器: 这是一种利用被测量的变化引起敏感元件的折射率、吸收系数、反射系数等发生变化,使光强度随被测量而变的传感器。在这类传感器中,有的是利用

光纤的微弯损耗,有的是利用各种物质的光吸收特性的变化,有的是利用弹性膜或液晶的反射光强度的变化,还有的是利用物质因受各种粒子射线或化学、物理因素的激励而产生的发光的现象以及物质的荧光辐射或光路遮断等光学现象,以构成压力、振动、温度、位移、气体等各种强度调制型光纤传感器。它的优点是结构简单,容易实现,成本低;缺点是受光源强度的起伏以及连接器和耦合器的损耗变化等的影响较大。

(b) 偏振调制光纤传感器: 这是一种利用光的偏振态的变化来传递被测对象的信息的传感器。其中包括: 利用法拉第效应的光纤电流、磁场传感器; 利用泡克尔斯效应的光纤电场、电压传感器; 利用物质的光弹效应的光纤压力、声和振动加速度传感器; 以及利用光纤的双折射性的光纤温度、压力和振动传感器。这类光纤传感器不会受光源强度及衰减变化的影响,故灵敏度较高。

(c) 频率调制光纤传感器: 这是一种利用被测对象所引起的光频率的变化来监测控制被测对象的传感器。其中有利用运动物体的反射

表 1 光纤传感器的原理及分类*

传感器	采用的光学现象	被 测 量	所用光纤	分类	
干涉型	位相调制	干涉(磁致伸缩)	电流、磁场	SM, PM	(a)
		干涉(电致伸缩)	电场、电压	SM, PM	(a)
		Sagnac 效应	角速度	SM, PM	(a)
		干涉(光弹效应)	振动、加速度、压力、位移	SM, PM	(a)
		干涉(热胀冷缩)	温度	SM, PM	(a)
非干涉型	强度调制	遮光板遮断光路	温度、振动、压力、加速度、位移	MM	(b)
		半导体光透射率的变化	温度	MM	(b)
		荧光辐射、黑体辐射	温度	MM	(c)
		光纤微弯损耗	振动、压力、加速度、位移	MM	(a)
		弹性膜或液晶的反射	振动、压力、位移	MM	(b)
		气体分子的吸收	气体浓度	MM	(b)
		光纤漏泄模	液位、液体浓度	MM	(c)
干涉型	偏振调制	法拉第效应	电流、磁场	SM	(a), (b)
		泡克尔斯效应	电场、电压	MM	(b)
		双折射变化	温度	SM	(b)
		光弹效应	振动、压力、加速度、位移	MM	(b)
干涉型	频率调制	多普勒效应	速度、流量、振动、加速度	MM	(c)
		喇曼散射	气体成分、浓度	MM	(b)
		光致发光	温度	MM	(b)

* MM 表示多模光纤, SM 表示单模光纤, PM 表示偏振保持光纤, (a), (b), (c) 分别表示图 1 所示的三类光纤传感器。

或散射光的多普勒效应的光纤速度、流量、振动加速度传感器; 利用自发喇曼散射的气体传感器; 以及利用光致发光的温度传感器等。

(d) 位相调制型光纤传感器: 其基本原理是利用被测量对光学敏感元件的作用, 使敏感元件的折射率、传播常数或光程发生变化, 从而使光的位相随被测量而变, 然后用干涉仪进行解调, 即可得到被测对象的信息。这类传感器包括: 利用光弹效应的光纤声、压力、振动加速度传感器; 利用磁致伸缩的光纤电流、磁场传感器; 利用电致伸缩效应的光纤电场、电压传感器; 以及利用 Sagnac 效应(在一个旋转着的光学环路中, 沿相反方向传播的两相干光束的位相差与转速成比例, 这种现象称为 Sagnac 效应)的光纤陀螺等。这类传感器具有极高的灵敏度, 但要采用特殊光纤和高精度的信号检测系统, 故成本较高。

(3) 根据光的解调方法不同, 又可将光纤传感器分为干涉型和非干涉型两大类。干涉型光纤传感器, 是指用干涉仪进行光的解调的光纤传感器。通常只有位相调制光才用干涉仪来

解调, 因此在上述各种光纤传感器中, 只有位相调制光纤传感器属于干涉型, 其余均为非干涉型(见表 1)。在原理上, 干涉型光纤传感器具有高灵敏度和高精度的优点。但实际上, 为了获得高灵敏度和高精度, 必须采用特殊光纤(如高双折射偏振保持光纤、单偏振光纤、功能光纤等)和优质光纤元件, 这不仅成本高, 而且也难以实现。所以, 目前除了军用或某些特殊用途的光纤传感器采用干涉型结构外, 其他都是采用非干涉型结构。后者是人们研究得最多、使用也最多的光纤传感器。

3. 传感器用光纤

光纤是用透明度高的电介质材料制成的非常细的低损耗导光纤维。在光纤传感技术中, 常用的是通信用单模、多模光纤。在某些情况下, 必须用偏振保持光纤或其他功能光纤。

多模光纤因其能传播许多模式的光而得名, 其芯径通常为 $50 \mu\text{m}$, 数值孔径为 0.2, 具有耦合效率高和容易连接的优点, 所以在非干涉型光纤传感器中都采用多模光纤。有时为了获得更高的耦合效率, 需要采用芯径大于 $50 \mu\text{m}$ 、

数值孔径大于 0.2 的光纤。

单模光纤是只能传播一种模式的光的光纤,其芯径小于 $10\ \mu\text{m}$ 。因为两光波叠加产生干涉的条件是它们必须是相干光,而只有单模光纤才能传播相干光,因此干涉型光纤传感器必须使用单模光纤。

能使在其中传播的光的偏振态保持不变的光纤称为偏振保持光纤。目前常用的标称圆对称单模光纤实质上是双模的,其中有两个退化的正交偏振模 HE_{11}^x 和 HE_{11}^y 。这是因这种单模光纤的纤芯横截面并非完全圆对称,而是具有不大的双折射,并且单模光纤的这种双折射容易受环境因素(如温度、压力等)的影响。因此,光纤输出偏振态是随机的和不可预测的,结果使干涉型光纤传感器的灵敏度和精度降低。所以此类传感器最好采用偏振保持光纤。

功能光纤是把某种元素或化合物掺入到光纤中或涂覆在裸光纤外,从而使其对某个物理量或化学量具有高感度的光纤。通常用它来研制功能型光纤传感器。

4. 光纤传感器的优点

和以电为基础的传统传感器相比较,光纤传感器具有如下优点:

(1) 高灵敏度:例如目前用的光纤 Mach-Zehnder 干涉仪能检测到 $0.1\ \mu\text{rad}$ 的相位差,若光源的波长为 $1\ \mu\text{m}$,则这相当于 10^{-14}m 的光程差。因此,采用干涉型光纤传感器,可以检测非常小的物理量。

(2) 抗电磁干扰:一般电磁辐射频率要比光波频率($\sim 10^{14}\text{Hz}$)低得多,所以在光纤中传播的光不受一般电磁噪音的影响。此外,光纤中的渐衰场只限于在包层中离纤芯数微米处,而通常光纤包层都在几 $10\ \mu\text{m}$ 以上,因此在多芯光缆中,纤芯间具有良好的抗电磁串音性能。

(3) 电绝缘性和化学稳定性:光纤本身就是一种化学性能稳定的高绝缘物质,而且敏感元件可做成电绝缘和电无源元件。因此,光纤传感器不仅化学稳定性好,而且电绝缘性能也高,特别适用于电力工业和化学工业,以及需要高压隔离和易燃易爆等恶劣环境。

(4) 生理安全性:光纤传感器的敏感元件是电无源的,故在生物体内测量时,不存在漏电和电击的危险。因此,近年来医用光纤传感器的研制相当活跃。

此外,由于光纤柔软可挠,损耗小,大带宽和具有高的数据传输率,因此,光纤传感器还具有几何形状灵活多样,易于实现远距离监控和多功能传感等优点。

光纤传感器能解决许多以电为基础的传统传感器无法解决的问题。例如高压传输线、电机转子和变压器内的温度分布的测量,以及血管内的血流速度和血压的直接测量等。

二、光纤传感器的发展现状和未来

1. 光纤传感器的发展现状

在过去的十年时间里,许多光纤传感器已进入实用化和商品化阶段,更多的光纤传感器正在进入实用化和实验室研制阶段。一些重要的光纤传感器的发展水平如表 2 所示。在今后的十年内,光纤传感器将有更大的发展,其年增

表 2 一些典型光纤传感器的发展水平

光纤传感器	光调制方式	已达到的性能水平	实用化程度
电场	偏振调制	$300-3000\ \text{V/cm} \pm 1.5\%$	商品化
电压	偏振调制	$30-3000\ \text{V} \pm 1.5\%$	商品化
电流	偏振调制	$30-3000\ \text{A} \pm 1.5\%$	商品化
磁场	偏振调制	$1 \times 10^{-2}-3 \times 10^{-1}\ \text{T} \pm 5\%$	商品化
磁场	相位调制	$0.1-1 \times 10^3\ \text{nT} \pm 1\%$	现场测试
温度	强度调制	$0-150^\circ\text{C} \pm 0.5\%$	商品化
温度	相位调制	$0-100^\circ\text{C} \pm 0.001^\circ\text{C}$	实验室
压力	强度调制	$0-35\ \text{MPa} \pm 0.5\%$	实验室
角位移	强度调制	$0-40^\circ \pm 0.04^\circ$	现场测试
线位移	强度调制	$0-15\ \text{cm} \pm 0.003\ \text{cm}$	现场测试
加速度	强度调制	$0.01-32\ \text{g} \pm 1\%$	现场测试
加速度	相位调制	$1 \times 10^{-6}-10\ \text{g} \pm 1\%$	现场测试
速度	频率调制	$1 \times 10^6-1 \times 10^8\ \text{m/s}$	实用化
速度	相位调制	$0.5-20\ \text{m/s}$	实验室
血流速度	频率调制	$0.04-1\ \text{m/s}$	动物试验
液位	强度调制	开关式:任意 $\pm 0.05\ \text{mm}$ 连续式:数米 $\pm 1\ \text{mm}$	实用化
石油污染	强度调制	$15->1000\ \text{ppm} \pm 5\%$	
水听器	相位调制	$3-170\ \text{dBre}\ 1\ \mu\text{Pa}$	现场测试
陀螺	相位调制	$10-100\ \text{deg/hr}$ $1 \times 10^{-3}\ \text{deg/hr}$	商品化 实验室

(下转第47页)