

专题介绍

# 光纤压力传感器

刘跃辉, 张旭苹, 董玉明

(南京大学光通信工程研究中心, 南京, 210093)

**摘 要:** 阐述了光纤压力传感器的发展概况, 从光波调制的角度分别叙述了强度调制、频率调制、相位调制、波长调制、偏振调制型光纤压力传感器以及分布调制型光纤压力传感器, 介绍了它们的原理、结构、优缺点等, 并对目前最常用的强度调制压力传感器和发展迅速的分布调制型光纤压力传感器进行了详细的介绍。

**关键词:** 光纤; 压力; 传感器; 调制

**中图分类号:** TN 253 **文献标识码:** A

**文章编号:** 1005-488X (2005) 02-0124-09

## Review of Fiber-optic Pressure Sensors

LIU Yue-hui, ZHANG Xu-ping, DONG Yu-ming

(Research Center of Optical Communication Engineering, Nanjing University, Nanjing, 210093, China)

**Abstract:** This article generally describes the development of fiber-optic pressure sensors. From the point of view of lightwave modulation, this article introduces fiber-optic intensity-modulated, frequency-modulated, phase-modulated, wavelength-modulated, polarization-modulated pressure sensors and fiber-optic distributed modulated pressure sensors, separately introduces their principle, configuration, advantage, disadvantage, and so on. This article gives a detailed description of fiber-optic intensity-modulated pressure sensors in most common use and rapid developing fiber-optic distributed modulated pressure sensors at present.

**Key words:** fiber; pressure; sensor; modulation

## 引 言

光纤传感技术是伴随着光导纤维及光纤通信技术的发展而迅速发展起来的一种以光为载体, 光纤为媒质, 感知和传输外界信号(被测量)的新型传感技术。当这种外界信号为压力时, 即构成光纤压

力传感器。

光纤压力传感器作为一种新型的传感器, 与传统的压力传感器相比体积小、重量轻, 具有电绝缘性、不受电磁干扰, 可用于易燃易爆的环境中等优点, 另外还可以构成光纤分布式压力传感器, 对桥梁、大坝等进行健康状况的实时监测。

光纤压力传感器的研究在国外始于 20 世纪

收稿日期: 2004-10-18

作者简介: 刘跃辉(1981—), 男, 硕士研究生。主要从事光纤传感、光网络监测方面的研究。

张旭苹(1962—), 女, 工学博士, 教授, 博士生导师。主要从事光电器件集成、光互联与光通信等方面的科研与教学工作。

董玉明(1978—), 男, 博士研究生。主要从事分布式光纤传感技术、光网络监测方面的研究。

70年代初<sup>[1]</sup>,当时研制出一种用于血管压力测量的微型光纤压力传感器,之后许多研究工作都集中于工程应用中。到了20世纪80年代,出现了利用紧贴膜片的叶片或光阀的运动来调制光强的光纤压力传感器和靠膜片挤压光纤使其传输特性发生变化而制成的光纤压力传感器,其传感器的精度一般为 $\pm 3.0\%$ 左右,线性度可达 $\pm 1.5\%$ 。进入20世纪90年代,更多光纤压力传感器进入商品化阶段,精度和灵敏度也不断增加,如采用光纤法布里-珀罗干涉法的光纤压力传感器,它的精度达到 $\pm 1.0\%$ ,线性度达到 $\pm 0.5\%$ <sup>[2]</sup>。

目前整个光纤传感器市场年成交额超过10亿美金,并预计将于2010年拥有超过50亿美金的市场<sup>[3]</sup>,光纤压力传感器也会随之得到很大发展。

## 1 光纤压力传感器的类型

根据光纤在测试系统中的应用,光纤压力传感器可分为功能型光纤压力传感器和非功能型光纤压力传感器两种,功能型光纤压力传感器是在外界压力作用下对光纤自身的某些光学特性(强度,相位等)进行调制,调制区在光纤之内,光纤同时具有“感知”和“传输”两种功能,因此又称为内调制光纤压力传感器或者传感型光纤压力传感器。非功能型光纤压力传感器是借助其他光学敏感元件来完成传感功能,调制区在光纤之外,光纤在系统中只起传输作用,因此称之为外调制光纤压力传感器,或者传光型光纤压力传感器。

在光纤中传输的光波可用如下方程描述

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

其中, $E_0$ 为光波的振幅, $\omega$ 为频率, $\phi$ 为初相角,公式(1)中包含五个参量即强度( $E_0^2$ ),频率( $\omega$ ),波长( $2\pi c/\omega$ ),相位( $\omega t + \phi$ )和偏振态。如果在压力的作用下,光的强度发生改变,则称此光纤压力传感器为强度调制光纤压力传感器,光的频率发生改变称为频率调制光纤压力传感器,依次类推还有波长调制光纤压力传感器,相位调制光纤压力传感器和偏振调制光纤压力传感器,除此之外还有光纤分布调制式压力传感器。

为便于理解光纤压力传感器的物理本质,本文按压力对传输光的调制方法进行分类,并按照这种分类对各种光纤压力传感器进行详细介绍。

### 1.1 强度调制光纤压力传感器

强度调制光纤压力传感器的基本原理是将一强度恒定的光源发出的光注入传感元件,该元件在外力场作用下,使光强发生变化,输出光强的大小与待测压力成一定关系,通过测量光的强度可得到待测压力值。

#### 1.1.1 微弯型

目前最常用的微弯式压力传感器原理图如图1所示<sup>[4]</sup>,微弯结构由一对机械周期为 $\Lambda_0$ 的齿形板组成,敏感光纤从齿形板中间穿过,在齿形板的作用力 $F$ 下产生周期性的弯曲。当齿形板受外部扰动时,光纤的微弯程度随之变化,从而导致输出光功率的改变,通过光检测器检测到的光功率变化来间接地测量外部压力的大小。

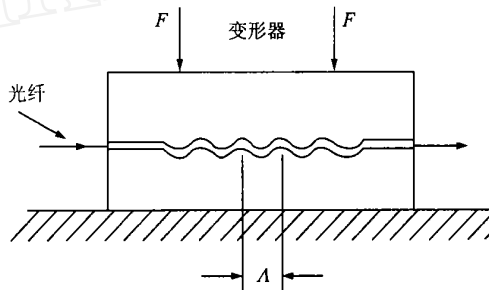


图1 光纤微弯压力传感器

Fig. 1 Fiber-optic micro-bend pressure sensor

根据微弯损耗机理和模式耦合理论<sup>[5]</sup>,若纤芯中的传播常数 $\beta$ 与包层中的传播常数 $\beta_c$ 满足条件:

$$\beta - \beta_c = \pm 2\pi/\Lambda_0 \quad (2)$$

纤芯和包层的耦合达到最强( $\Lambda_0$ 为微弯结构的机械周期)。通过对光载波强度的检测,就能够确定与之成比例的变形器的位移,并确定压力的大小。检测方法分为亮场和暗场两种<sup>[4]</sup>。

这种传感器结构简单,容易装配,造价低,常用于易燃易爆环境中气体和液体的压力的实时检测,缺点是传感器的微弯结构周期要求严格,因此机械设计相当复杂,另外加速度效应也会使其性能恶化。为克服这些缺点,Nicholas Lagakos等设计了一个改进的光纤微弯压力传感器,应用于水声传感<sup>[6]</sup>。

#### 1.1.2 透射型

图2给出了一种透射型光纤压力传感器<sup>[7]</sup>,在发射光纤与接收光纤之间放置一个遮光片,对进入接收光纤的光束产生一定程度的遮挡,外界信号通

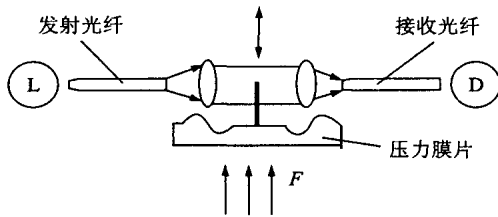


图 2 遮光式光纤压力传感器

Fig 2 Light valve fiber optic pressure sensor

过控制遮光片的位移来制约遮光程度,实现对进入接收光纤的光强进行调制。遮光片移动的距离与光强成正比,通过压力来控制遮光片的移动,从而建立起压力与光强之间的关系,通过光探测器接受到的光强可以得到压力的大小。两光纤端面之间放置有普通透镜或自聚焦透镜。图 3 是所测光强与遮光片移动距离的关系曲线<sup>[8]</sup>,其中  $D$  为两透镜之间平行光束的直径。从图中可以看出,这种传感器的灵敏度高和线性度都很好。

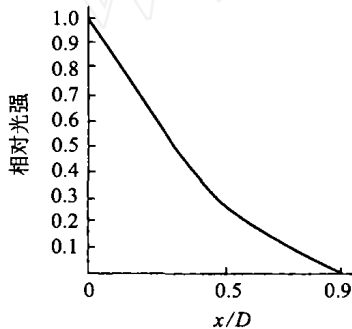


图 3 光强与遮光片移动距离之间的关系

Fig 3 Light intensity versus valve's moving distance

另一种透射型光纤压力传感器如图 4 所示<sup>[9]</sup>。

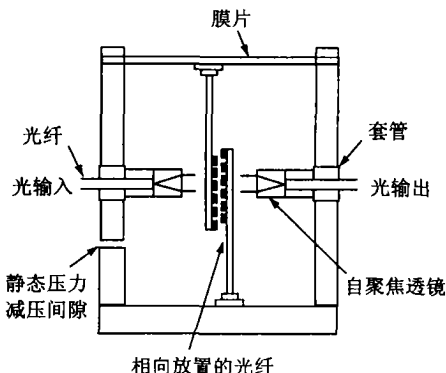


图 4 移动光栅式光纤压力传感器

Fig 4 Shift grating fiber optic pressure sensor

两根光纤的端面之间相隔一个微小的间隙,间隙中放置一对光栅,光栅由等宽度的全透射和全吸收平行线交替形成的栅格构成。当两个光栅发生相对移动时,光的透射强度就随之变化。其中一个光栅固定在传感器的底板上,另一个光栅与弹性膜片相连。输入光经透镜准直后射到一对光栅上,如果两光栅所处的相对位置正好全透过与全吸收重合,这种情况下没有光透过光栅,输出光为零;如果两光栅所处的相对位置是全透过与全透过重合,此时输出光达到最大,输出光经另一透镜聚焦到输出光纤中。

移动光栅式压力传感器的光强与位移之间的关系如图 5 所示<sup>[10]</sup>,设两个光栅间距都为  $5 \mu\text{m}$ 、栅

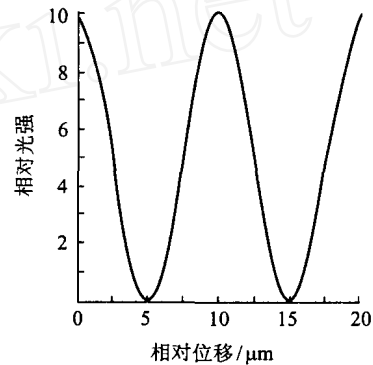


图 5 光强与位移之间的关系

Fig 5 Relative intensity versus relative displacement

格宽度都为  $5 \mu\text{m}$ ,从曲线可以看出,当工作点即偏置工作点调到  $2.5 \mu\text{m}$ 、 $7.5 \mu\text{m}$ 、 $12.5 \mu\text{m}$  等相对位移时,其灵敏度将为最大,在这一段位移范围内线性度最好。由于膜片工作在小挠度情况下,膜片的中心位移与压力成正比,因此在这个范围内,输出光强度近似正比于压力。这种传感器结构简单,工艺要求不严,灵敏度也比遮光式要高,可以检测到  $1 \mu\text{Pa}$  的压力差,而且具有较好的长时间工作的稳定性和可靠性,因此具有很大的实用价值。

### 1.1.3 反射型

目前最常用的反射式光纤压力传感器是利用弹性膜片在压力作用下变形从而调制反射光功率信号,压力的大小与发射光的强度成一定关系。如图 6 所示<sup>[11]</sup>,光源发出的光耦合进入射光纤端面 B 之后,从入射光纤端面 A 出射。出射光经由弹性膜片(或由其带动的反射面)反射后,部分反射光由接收光纤端面 A 接收,接收光的强度与端面 A 至膜

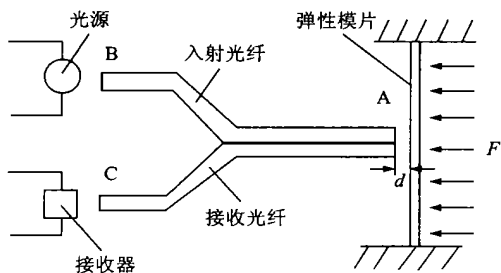


图6 反射式光纤压力传感器

Fig 6 Fiberoptic reflected pressure sensor

片的距离  $d$  有关, 也与膜片与压力  $P$  作用下的变形有关。经由膜片变形所调制的反射光功率信号, 传输至接收光纤的端面 C, 最后耦合至光接收器, 获得与压力  $P$  有关的输出信号。

图7是用光功率计测得接收器接收光功率与光纤端面至膜片端  $d$  之间的曲线<sup>[11]</sup>。从图中可看到, 曲线峰值左侧区域可近似看作线性区, 且灵敏度高, 膜片式光纤压力传感器就工作在这个区域。

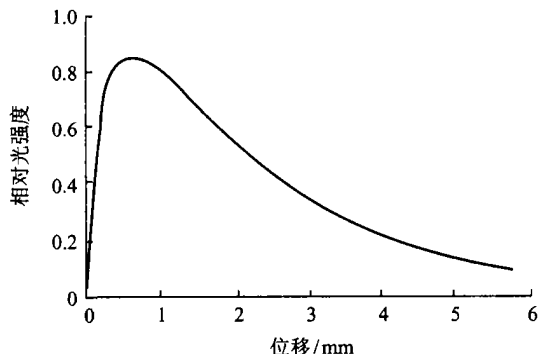


图7 光强与位移之间的关系

Fig 7 Light intensity versus moving distance

在强度调制光纤压力传感器中, 反射式强度调制具有结构简单、成本低、精度高、易调试等优点, 其非接触式的特点可以用于一些特殊场合。

#### 1.1.4 消逝波耦合型

根据受抑全反射原理<sup>[8]</sup>, 当两根光纤的纤芯相互靠近到一定距离时, 消逝光波可以从一根光纤耦合进入到另一根光纤中去。一种消逝波耦合型光纤传感器原理如图8所示, 两光纤端面对光纤轴的角度相同, 斜断面抛光, 以便形成全内反射。两光纤很接近时, 绝大部分光功率可相互耦合。如果一根光纤固定, 另一根光纤受力作用产生垂直位移  $x$ , 改变间隙  $x_g$ , 那么光纤间的光耦合量发生变化,

于是输出光纤的接收光受到强度调制。这种传感器的结构如图9所示<sup>[12]</sup>, 传输光强与光纤间隙的关系曲线如图10所示<sup>[13]</sup>。

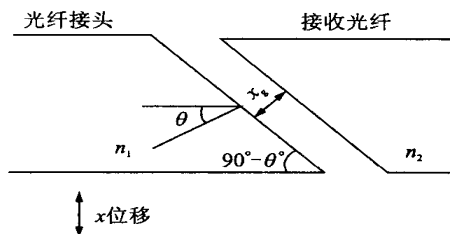


图8 消逝波耦合型光纤传感器原理图

Fig 8 Principle diagram of evanescent wave coupling fiber-optic pressure sensor

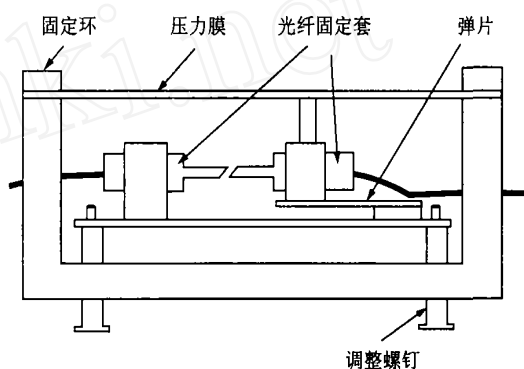


图9 传感器结构图

Fig 9 Configuration of evanescent wave coupling fiber-optic pressure sensor

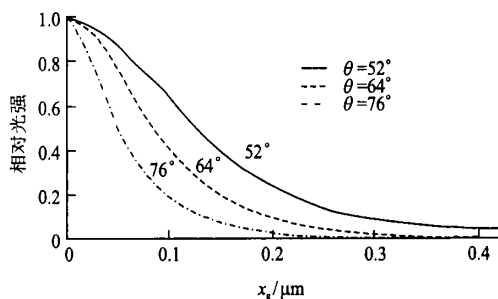


图10 相对光强与光纤间隙之间的关系

Fig 10 Relative light intensity versus interval between two fibers

这种光纤传感器的灵敏度很高, 当两根光纤靠的很近时, 即使间隙变化很小 (即被测压力改变量很小), 相对输出光强仍有很大的变化。但是这种传感器对光纤端面平整度要求较高, 当光纤端面距离增加时, 耦合效率将成指数减小, 因此动态范围比较小, 不适合压力变化较大的场合。

## 1.2 频率调制光纤压力传感器

频率调制光纤压力传感器一般由硅谐振式压敏元件、光纤和检测系统等几部分组成。其工作原理是,硅谐振器在调制光的激励下以固有频率振动,当压力影响了硅谐振器的频率后,通过检测频率的变化就可以得到压力的大小<sup>[14]</sup>。

图 11 是一个硅谐振式频率调制光纤压力传感器的原理图<sup>[15]</sup>,激励光采用红外光源,检测光采用可见光,激励光和检测光分别通过耦合器的两个臂照向微谐振器中点,反射光经耦合器的另一臂返回光电接收器。激励光经光纤激励硅谐振器,使之形成 Fabry-Perot 谐振腔,在压力的作用下,谐振腔谐振频率发生变化,从而改变腔的反射系数,与频率相关的调制信号经光纤返回,根据压力与频率的关系,可以得到压力的大小。

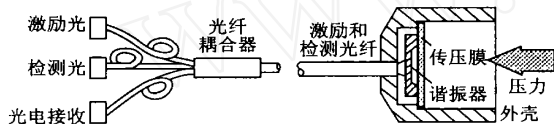


图 11 频率调制光纤压力传感器

Fig 11 Fiber-optic frequency modulated pressure sensor

这种传感器的测量精度高,抗干扰能力强,采用频率输出,属于数字式传感器,省掉了模数转换环节,具有广泛的应用前景。

## 1.3 相位调制光纤压力传感器

相位调制光纤压力传感器的基本传感原理是:光纤内传播的光波相位在压力的作用下发生变化,通过干涉测量技术把相位变化转换为光强变化,从而检测出待测的压力值。

相位调制型光纤压力传感器具有很高的检测灵敏度,动态测量范围大,且探头形式灵活多样。按其结构相位调制干涉式光纤压力传感器有 Michelson、Mach-Zehnder 和 Fabry-Perot 传感器三种类型。

### 1.3.1 Mach-Zehnder 干涉式光纤压力传感器

Mach-Zehnder 光纤压力传感器是最常用的干涉式光纤压力传感器。如图 12 所示<sup>[8]</sup>,激光发出的光束经分光后经过传感光纤和参考光纤,传感光纤接受外部压力,从而引起长度和折射率的变化,在

接受端两束光产生干涉,形成干涉条纹。

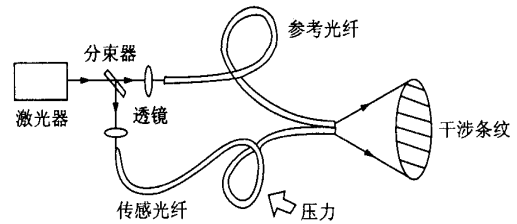


图 12 Mach-Zehnder 型干涉压力传感器原理图

Fig 12 Principle diagram of Mach-Zehnder interference fiber-optic pressure sensor

输出端产生的光强可简单表示为<sup>[16]</sup>:

$$I = I_0 + I_0 K \cos \frac{2\pi \Delta l}{\lambda} = I_0 + I_0 K \cos \frac{2\pi s p}{\lambda} \quad (3)$$

式中  $I_0$  为平均光强,  $K$  为干涉条纹对比度,  $s$  为压力传感光纤的转换系数,与传感光纤的长度、折射率和横截面积变化有关,  $\Delta l$  为光程差,  $p$  为压力。

从(3)式中可知,

当  $\Delta l = \pm n\lambda$  ( $n = 0, 1, 2, \dots$ ) 时,干涉光强最大,为亮条纹。

当  $\Delta l = \pm (2n + 1)\lambda/2$  ( $n = 0, 1, 2, \dots$ ) 时,干涉光强最小,为暗条纹。

因此  $\Delta l$  每变化一个波长,即压力  $p$  每变化  $\Delta p = \lambda/s$ ,干涉条纹暗亮相间就变化一次。可见,被测压力可用干涉条纹变化次数来衡量,若变化次数为  $N$ ,则压力变化

$$\Delta p = N \cdot \lambda/s = Nq \quad (4)$$

其中,  $q = \lambda/s$  为光纤压力传感器的量化单位。

### 1.3.2 Michelson 干涉压力传感器

Michelson 干涉原理图如图 13 所示<sup>[10]</sup>,激光器发出的光经 3 dB 耦合器后,注入参考光纤(下)和敏感光纤(上),光传输到光纤端面发生反射后又回到光纤中,在经过 3 dB 耦合器到达光检测器,反射光的相位变化合成后转变为光强的变化,因而检测器可以检测到相位变化。如果对敏感光纤进行压

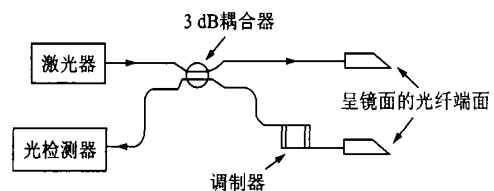


图 13 Michelson 干涉压力传感器原理图

Fig 13 Principle diagram of Michelson interference fiber-optic pressure sensor

力调制, 则光强的变化就反映了压力的变化。

Michelson 传感应用于水听器中<sup>[17]</sup>, 所测结果如图 14 所示, 接收光强与待测压力呈线性关系, 并且灵敏度很高。这种传感器的明显优点是体积小, 并且制造成本较低。

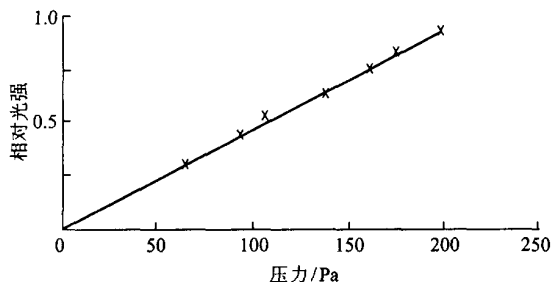


图 14 相对光强与压力之间的关系

Fig 14 Relative light intensity versus pressure

### 1.3.3 Fabry-Perot 干涉压力传感器

Fabry-Perot 干涉式压力传感器如图 15 所示

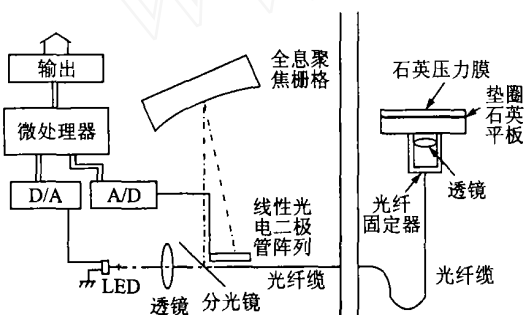


图 15 Fabry-Perot 干涉压力传感器

Fig 15 Fabry-Perot interference fiber-optic pressure sensor

示<sup>[18]</sup>, 被测压力作用在压力膜上, 使压力膜与透镜表面的距离发生变化, 探头中的石英平板表面与石英压力膜表面均涂有镜面。两个镜面构成 Fabry-Perot 干涉仪的反射腔的端面, 在压力作用下, 压力膜发生了移动导致反射腔长度改变, 长度的变化又导致了反射光谱中干涉条纹波长移动。反射光经透镜聚焦在同一光纤上传输至光检测器, 反射光传输中由分光镜改变方向到达聚焦光栅(在这里作单元件光谱仪), 光谱由光电二极管阵列检测。测量的强度与波长关系曲线如图 16 所示。当反射腔长度发生变化时, 根据反射腔长度是增加还是减小, 光强最小值要向高或低波长方向移动。干涉条纹的样式与被测压力相对应, 从而可以得到待测压力值。

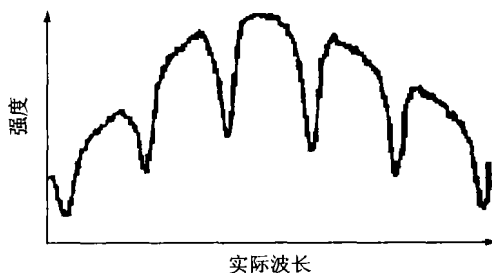


图 16 强度与波长曲线

Fig 16 Curve of intensity and wavelength

这种检测方案具有显著优点, 转换探头由石英材料做成, 具有较好的温度稳定性; 传感器结构紧凑; 对光强的变化不敏感等。

### 1.4 波长调制光纤压力传感器

波长调制型传感器最常见的是光纤光栅传感器, 其传感原理是: 光纤光栅的布拉格中心波长在外界参量的作用下会发生变化, 将光输入光纤光栅后, 根据接收到的反射光谱的布拉格中心波长变化, 即可以得到外界参量值, 如果多个不同中心波长的光纤光栅排成阵列, 便可组成多点分布式阵列传感器。目前光纤光栅传感已受到国际高度重视, 其典型应用是 3S (Smart Material, Smart Structure, Smart Skin) 灵敏智能传感系统<sup>[19]</sup>。

光栅传感器的优点是精度高、大量程测量分辨率高、抗干扰能力强、测量结果具有很好重复性, 因此常用于温度、压力和液体高度等的测量。

由光纤光栅压力传感器的原理<sup>[20]</sup>可知, 光纤光栅的光栅方程是:

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda \quad (5)$$

式中,  $n_{\text{eff}}$  为等效折射率,  $\Lambda$  为光栅周期,  $\lambda_B$  为布拉格中心波长。

当外界物理量(温度、压力)变化时, 光栅的折射率  $n$  和光栅周期  $\Lambda$  发生变化, 布拉格光栅方程:

$$\Delta\lambda_B = 2\Lambda\Delta n_{\text{eff}} = 2n_{\text{eff}}\Delta\Lambda \quad (6)$$

外界轴向应力而引起的布拉格波长  $\lambda_B$  的相对变化

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = -\frac{(n_{\text{eff}})^2}{2}\Delta\frac{1}{n_{\text{eff}}} + \epsilon = (1 - p_{\text{ei}})\epsilon \quad (7)$$

对于石英光纤, 由外界压力引起的布拉格波长相对变化为

$$\Delta\lambda_B/\lambda_B = 0.78\epsilon \quad (8)$$

式中,  $\lambda_b$  为布拉格中心波长,  $\Delta\lambda_b$  为压力引起的布拉格波长变化,  $\epsilon$  为压力引起的光纤轴向应变。

国内外关于光纤光栅压力传感器报道不少<sup>[21, 22]</sup>, 其原理图如图 17 所示, 光纤布拉格光栅贴在形变体上, 当压力加在被测物体上时, 形变体受到外界压力产生形变, 光纤光栅的有效折射率  $n_{eff}$  和光纤周期  $\Lambda$  都将发生变化, 光源发出的宽带光经发生形变的光纤光栅反射, 布拉格波长产生移位  $\Delta\lambda_b$ , 通过光谱仪测量反射光的光谱, 根据公式 (8) 可得到压力的大小。

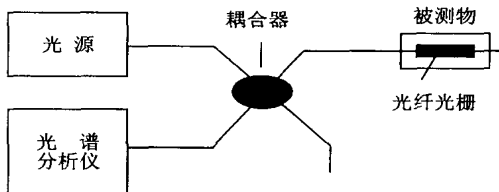


图 17 光纤光栅压力传感器的原理图

Fig 17 Principle diagram of fiber-optic grating pressure sensor

图 18 是一个光栅光纤传感器的一个例子<sup>[23]</sup>, 其所测得的布拉格波长与压力成线性关系, 而且灵敏度很高。

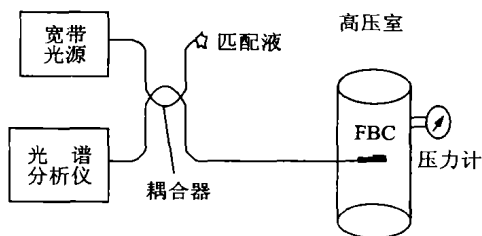


图 18 光纤光栅压力传感器

Fig 18 Fiber-optic grating pressure sensor

光栅式光纤传感器是具有实用价值的一种传感器, 但是在实际工程应用中, 对波长移位检测需用较复杂的技术和较昂贵的仪器或光纤器件, 需要大功率的宽带光源或可调谐光源, 由于高精度的成本很高, 一定程度上影响了它的应用。

### 1.5 偏振调制光纤压力传感器

此类传感器主要是利用光纤的光弹效应进行偏振态调制。光弹效应是一种由应力应变引起双折射的物理效应, 光纤受到轴向应力作用时产生纵向

光弹效应, 受到径向应力时产生横向光弹效应。由应力引起的感应双折射正比于所施加的应力, 即

$$\Delta n = \rho \sigma \quad (9)$$

式中  $\rho$  为物质常数,  $\sigma$  为施加的应力。

光纤的双折射使光的偏振态发生相应的变化, 通过光接收器得到由压力引起的双折射的大小, 从而可以得到压力的大小。传感器结构如图 19 所示<sup>[8]</sup>。

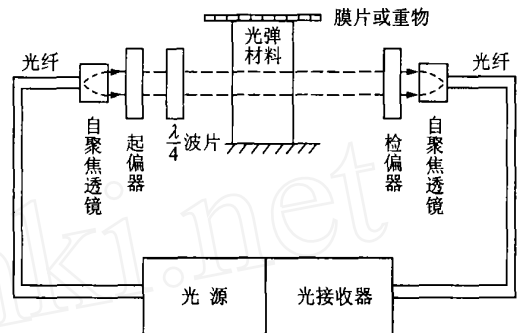


图 19 基于光弹效应的光纤压力传感器

Fig 19 Fiber-optic pressure sensor based on photo-elastic effect

据报导, 用光路长度为 0.6 cm 的硼硅酸玻璃作光弹材料, 波长  $\lambda = 0.82 \mu\text{m}$  的 LED 作光源时, 最小可检测压力的理论值为  $91.4 \text{ Pa}$  ( $I = 380 \times 10^{-3} \text{ W}$ )。

与相位调制光纤压力传感器相比, 偏振调制光纤压力传感器的灵敏度较低, 但是结构简单, 且调整也相对方便。

### 1.6 分布式光纤压力传感器

分布式光纤技术是利用光纤的相关物理特性在被测场的空间和时间进行实时监测的技术。分布式光纤压力传感器利用分布式技术, 在对桥梁、建筑、水利工程与崩塌滑坡岩土灾害地区安全监测中都有很广泛的应用, 目前常用的分布式光纤压力传感器可分为两种: 一种是以光纤的背向散射光或前向散射光损耗时域检测技术为基础的光时域分布式, 另一种是以光波长检测为基础的波域分布式。时域分布式的典型代表是基于光时域反射仪 (OTDR) 的分布式压力传感器和基于布里渊光时域反射仪 (BOTDR) 的分布式压力传感器, 波域分布式的典型代表是基于光纤光栅的分布式压力传感器, 确切地说, 这是一种准分布式压力传感器。

### 1.6.1 基于光纤光栅的准分布式压力传感器

如图 20 所示<sup>[7]</sup>, 在一根传感光纤上制作许多个布拉格光栅, 每个光栅的工作波长相互分开, 经 3 dB 耦合器取出反射光后, 用波长探测解调系统测出每个光栅的波长偏移, 从而检测出应力的大小和空间分布。将这种分布式光栅压力传感器埋在大桥、大坝等的混凝土中, 即可对其应力分布进行检测。

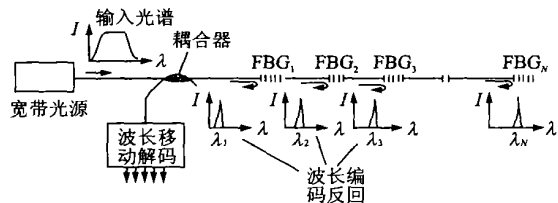


图 20 基于光纤光栅的分布式压力传感器

Fig 20 Distributed fiber-optic pressure sensor based on fiber grating

### 1.6.2 基于 OTDR 的分布式压力传感器

OTDR 是利用背向光散射原理, 即在光纤一端入射一个光窄脉冲, 在光纤中产生瑞利散射, 其背向散射光返回入射端, 经 OTDR 接收后得到散射曲线。如果光纤中某一部分受到外部扰动时, 就会产生损耗, 会在散射曲线上反映出来。基于 OTDR 的分布式压力传感器结构采用多模光纤绕在一钢丝绳上, 如图 21 所示。当钢丝绳受轴向应力作

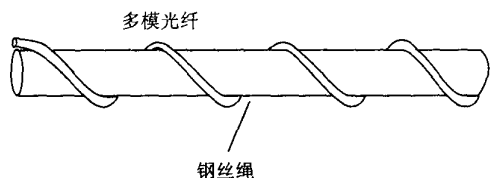


图 21 基于 OTDR 的分布式压力传感器结构

Fig 21 Configuration of distributed fiber-optic pressure sensor based on OTDR

用而被拉伸时, 光纤也一起跟着被拉紧, 并贴敷在绳索上, 从而光纤产生侧向变形。另外随着钢绳的纵向拉长, 其直径将不断减小, 同时它对光纤产生的微弯曲率脉冲峰值、宽度将分别增大和减小, 这样就造成光纤的光功率损耗, 建立损耗与应变的关系, 从而测量出应变量的大小<sup>[24]</sup>。如图 22 所示, 可以看出, 缠绕式光纤应变传感器光功率衰减随应变增加在一定范围内也线性增加。

图 23 是通过 OTDR 所测量的背向散射光功

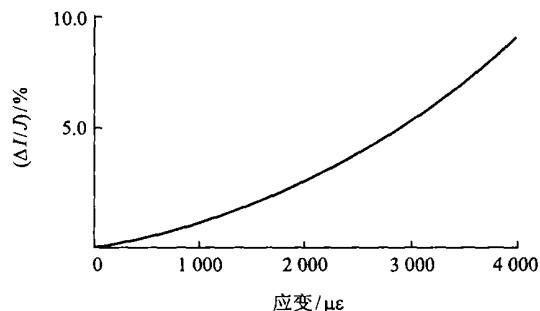


图 22 光强与应变之间的关系

Fig 22 Light intensity versus strain

率曲线图。光纤由 8 段光纤串联而成。a 是无试件无应变时的情况, 曲线 b 是试件中段 1 有载荷时的情况。通过 OTDR 测量试件在无应变和有应变时各点损耗的量值, 并计算两者之差, 其结果就表明了当试件存在应变时每根传感器的光功率损耗, 由此可判定应变位置和程度。

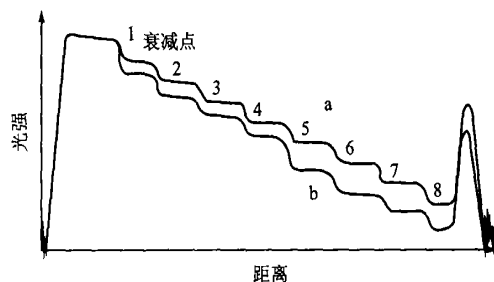


图 23 OTDR 测试光纤应变的曲线图

Fig 23 Strain graphic of fiber measured by OTDR

### 1.6.3 基于 BOTDR 的分布式压力传感器

BOTDR (布里渊光时域反射仪) 的测量技术是目前世界上近年来发展的一项用于光通信和各类建筑物应变监测的尖端技术。从 BOTDR 的测量原理<sup>[25]</sup>可知, 脉冲光以一定频率自光纤的一端入射, 与光纤中的声子发生后产生布里渊散射, 背向散射光按原路返回至脉冲光入射端, 经处理后得到布里渊散射光功率分布。改变脉冲光频率, 即得到每个测量点的布里渊散射的频谱图, 其峰值功率所对应的频率即布里渊频移  $\nu_B$ , 光纤受到轴向拉伸时, 布里渊频移就会发生改变, 通过测量频移的变化量, 根据频移与光纤应变之间的关系就可以得到光纤的应变量。布里渊频移与光纤的应变量之间关系为

$$\nu_B(\epsilon) = \nu_B(0) + \frac{d\nu_B(\epsilon)}{d\epsilon} \quad (10)$$



其中  $\nu_B(\epsilon)$  为应变量为  $\epsilon$  时的布里渊频移,  $\nu_B(0)$  为应变量为 0 时的布里渊频移。图 24 为  $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$  时测得的关系曲线。

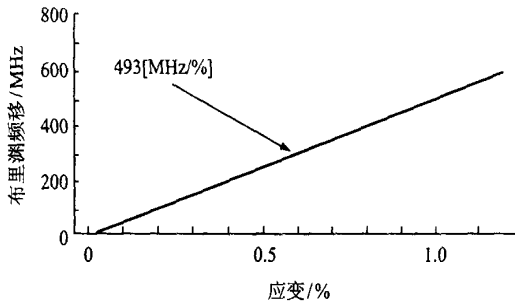


图 24 布里渊频移与应变之间的关系

Fig. 24 Brillouin frequency shift versus strain

从图中可以看出, 布里渊频移与应变之间具有很好的线性关系, 将光纤埋在建筑物的混凝土中, 根据 BOTDR 所测得的布里渊频移, 即可以对建筑物的健康状况进行实时监测。

## 2 总 结

本文介绍了强度调制、频率调制、相位调制、波长调制、偏振调制和分布式调制光纤压力传感器的结构和原理并叙述了其优缺点和应用情况。光纤压力传感器种类繁多, 具有许多的优良性能, 特别适用于一些恶劣的工作环境, 弥补了传统压力传感器的不足。在现阶段, 光纤光栅是研究的热点, 其在光纤压力传感器中的应用也得到很大发展。其它光纤压力传感器技术, 如反射式强度调制式等, 也逐渐成熟。另外分布式光纤压力传感器因其具有分布和实时的特点, 在桥梁、建筑物、崩塌滑坡岩等的安全监测中得到广泛的应用。

随着不断的努力和积极的研究, 光纤压力传感器的性能(可靠性、灵敏度、线性范围、精度等)将不断改善, 性价比不断提高, 应用范围也将不断扩大。

## 参 考 文 献

- [1] 宋 磊, 刘海滨, 任 新. 反射式光强调制型光纤压力传感器[J]. 仪表技术与传感器, 1994(3): 11~ 12
- [2] Byoung-ho Lee. Review of the present status of optical fiber sensors[J]. Optical Fiber Technology, 2003, 9(2): 57~ 79
- [3] 廖延彪, 黎 敏. 光纤传感器的今日与发展[J]. 传感器世界, 2004, 10(2): 6~ 12
- [4] 张兴周, 李绪友, 包建新. 微弯型光纤传感器[J]. 传感器技

术, 1998, 17(5): 58~ 60

- [5] 毛良明, 孟爱东, 张德银, 等. 基于光纤微弯原理的应变式传感器技术研究[J]. 传感器世界, 1999, 5(3): 20~ 23
- [6] Nicholas Lagakos, Trott W J. Microbend fiber-optic sensor as extended hydrophone[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1982, 18(10): 1 633~ 1 638
- [7] 王惠文, 江先进, 赵长明, 等. 光纤传感技术与应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2001: 27~ 87
- [8] 孙圣和, 王廷云, 徐 续. 光纤测量与传感技术[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2000: 103~ 104, 139~ 143
- [9] Thomas G G, Joseph A B. Optical fiber sensor technology[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1982, 18(4): 626 ~ 665
- [10] 唐贤远, 刘歧山. 传感器原理及应用[M]. 成都: 电子科技大学出版社, 2000: 283~ 284, 289
- [11] 王 俊. 新型反射式光纤位移传感系统的研制[J]. 激光与光电子学进展, 2003, 40(4): 54~ 55
- [12] Spilman W R, McMahon D H. Frustrated-total interval reflection multimode fiber hydrophone[J]. Applied Optics, 1980, 19(1): 113~ 117
- [13] 王学伟, 王 琳. 第三讲 强度调制式传感器[J]. 电测与仪表, 1996, 33(5): 40~ 45
- [14] 白韶红. 光纤压力传感器的发展[J]. 工业仪表与自动化装置, 1990(2): 16~ 21
- [15] 高金山, 王家桢, 童诗白. 微谐振型光纤传感器研究[J]. 测试技术学报, 1998, 12(2): 8~ 12
- [16] 梁长垠. 相位调制型光纤压力传感器与智能检测系统[J]. 传感器技术, 2001, 20(9): 47~ 48, 51
- [17] MC Dcamor G F, Brooker J T. Fiber optic hydrophone[J]. SPIE, 1989, 1 169: 266~ 268
- [18] 王学伟, 王 琳. 第八讲 光纤压力传感器[J]. 电测与仪表, 1996, 33(10): 42~ 48
- [19] 赵启大. 光纤光栅阵列传感器件及检测技术[J]. 天津科技, 2004, 31(1): 33
- [20] 靳 伟, 廖廷彪, 张志鹏, 等. 导波光传感器: 原理与技术[M]. 北京: 科学出版社, 1998: 321~ 324
- [21] Xu M G, Reekie L. Optication in-fiber grating high pressure sensor[J]. Electronic Letters, 1993, 29(4): 398~ 399
- [22] Clowes J. Low drift fiber optic pressure sensor for oil field downhole[J]. Electronic Letters, 1999, 35(11): 926~ 927
- [23] 刘云启, 郭转运, 张 颖, 等. 单个光纤光栅压力和温度的同时测量[J]. 中国激光, 2000, 27(11): 1 002~ 1 006
- [24] 郁 可, 张永胜, 管 立, 等. 基于光时域反射技术与缠绕式光纤传感阵列的结构状态监测方法[J]. 光学学报, 1999, 19(11): 1 530~ 1 535
- [25] Hiroshige H, Hiroshige N. Industrial applications of the BoTDR optical fiber strain sensor[J]. Optical Fiber Technology, 2001, 7(1): 45~ 64