

■ 光纤位移/压力传感特性的研究

目的要求

1. 了解光纤传感实验仪的基本结构、原理和使用方法；
2. 熟悉 LED 光源的 I—P 特性，掌握其测量方法；
3. 定性了解光纤纤端光场（纵向、轴向）分布，掌握其测量方法及计算方法；
4. 了解反射式位移传感器的原理，掌握其调制特性曲线的测量方法；
5. 了解光纤弯曲损耗的机理及特性，学习利用微弯损耗测量位移/压力的方法。

实验原理

本实验所用的光纤传感实验仪采用了强度型光纤传感的方式，这里分别讨论透射调制、反射调制和微弯调制的基本传感原理，并在纤端光场分布函数的基础上，建立相应的理论分析方法。

对于多模光纤来说，光纤端出射光场的场强分布由下式给出：

$$\Phi(r, z) = \frac{I_0}{\pi \sigma^2 a_0^2 [1 + \zeta (Z/a_0)^{3/2} \operatorname{tg} \theta_c]^2} \cdot \exp \left[\frac{-r^2}{\sigma^2 a_0^2 [1 + \zeta (Z/a_0)^{3/2} \operatorname{tg} \theta_c]^2} \right] \quad (1)$$

式中 I_0 为由光源耦合进入发送光纤中的光强； $\Phi(r, z)$ 为纤端光场中位置 (r, z) 处的光通量密度； σ 为一表征光纤折射率分布的相关参数，对于阶跃光纤， $\sigma=1$ ； a_0 为光纤芯半径， ζ 为与光源种类及光源跟光纤耦合情况有关的调制参数； θ_c 为光纤的最大出射角。

如果将同种光纤置于发送光纤纤端出射光场中作为探测接收器时，所接收到的光强可表示为

$$I(r, z) = \iint_S \Phi(r, z) ds = \iint_S \frac{I_0}{\pi \omega^2(z)} \cdot \exp \left[\frac{-r^2}{\omega^2(z)} \right] ds \quad (2)$$

$$\text{式中：} \quad \omega(z) = \sigma a_0 [1 + \zeta (z/a)^{3/2} \operatorname{tg} \theta_c] \quad (3)$$

这里， S 为接收光面，即纤芯面。

在纤端出射光场的远场区，为简便计，可用接收光纤端面中心点处的光强来作为整个纤芯面上的平均光强，在这种近似下，得到在接收光纤终端所探测到的光强公式为：

$$I(r, z) = \frac{SI_0}{\pi \omega^2(z)} \cdot \exp \left[-\frac{r^2}{\omega^2(z)} \right] \quad (4)$$

1. 透射调制方式

最简单的透射式强度模拟调制光纤传感原理如图 2 所示。调制处的光纤端面为平面，通常入射光纤不动，而接收光纤可以作纵(横)向位移。这样，接收光纤的输出光强被其位移调制。

透射型调制方式的分析较简单。在发送光纤端，其光场分布为一立体光锥，各点的光通量由函数 $\Phi(r, z)$ 来描写，其光场分布坐标如图所示。当接收光纤置于发送光纤纤端光场中时，所接收到的光强可近似地由式(4)给出。

当 z 固定时，得到的是横向位移传感特性函数。而当 r 取定值时(如 $r=0$)，则可得到纵向位移传感特性函数，如图 2 所示。

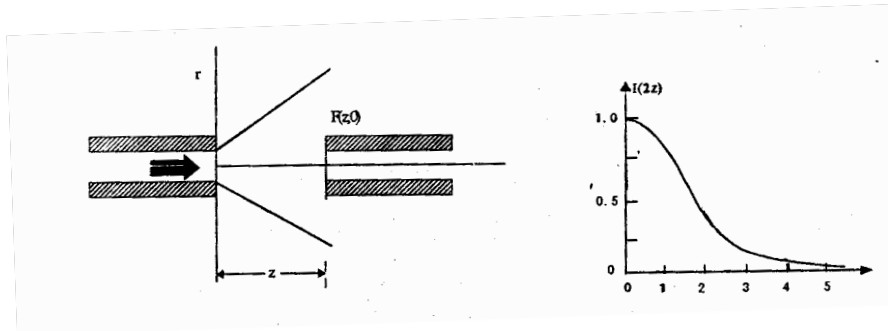


图2 透射式强度模拟调制光纤传感原理

2. 反射调制方式

由于反射调制式光纤传感器具有准确、简单、价格低廉等优点，对于传感器的广泛应用特具魅力。这种传感器通常由两根光纤组成，一根光纤把光传送到反射体，另一根光纤接收反射光并把光传到探测器。检测到的光强取决于反射体和探头之间的距离，如图3所示。

双纤式是最基本的反射调制方法，其坐标分析系统如图3所示。在分析过程中，采用等效分析法。首先，画出接收光纤关于反射体的镜像。然后利用透射分析法，直接计算出该镜像接收光纤在发送光纤纤端光场中所接收到的光强值。最后，将该光强值乘以反射体的反射率 R ，作为实际系统的等效结果。

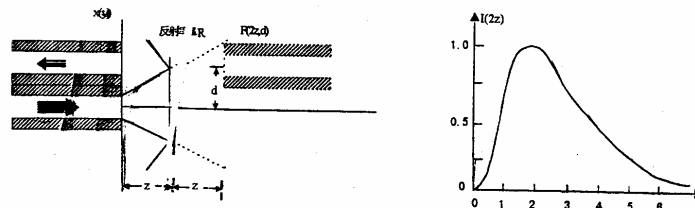


图3 反射式强度模拟调制光纤传感原理

图3所示的反射调制系统中，其接收光纤等效坐标位置为 $F(2z,d)$ 这里， d 为发送光纤轴心到反射接收光纤轴心间的距离，将其代入式(4)，并乘以反射率 R 有

$$I(z) = \frac{RI_0}{\sigma^2 [1 + \zeta(z/a_0)^{3/2} \text{tg} \theta_c]^2} \cdot \exp\left[-\frac{d^2}{\sigma^2 a_0^2 [1 + \zeta(z/a_0)^{3/2} \text{tg} \theta_c]^2}\right] \quad (5)$$

该函数的曲线形状如图3所示。

3. 微弯调制方式

微弯损耗是由光纤的空间状态变化，导致光纤中的模间耦合所引起的。利用光纤传感实验仪所提供的微弯损耗调制器来产生一种受控损耗，可以精确地把光纤输出信号与引起光纤微弯器件的位移联系起来。

微弯损耗调制器的原理如图4所示。一根多模光纤夹在一个空间周期呈梳状结构的变形器中间，选取空间周期以使它与光纤中适当选择的两个模之间的传播常数差相匹配。因而，光纤中的光功率分布随空间感应耦合而

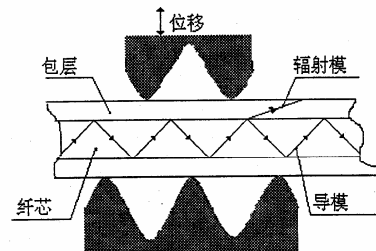


图4 微弯损耗强度型传感器原理图

变，特别是原来在纤芯中传播的某些光将转移到包层中。

如果预定引起耦合的两个模的传播常数分别为 β 和 β' ，那么所需求的值 Λ 是

$$\Delta\beta = |\beta - \beta'| = 2\pi / \Lambda \quad (6)$$

其中 Λ 为波纹周期。这是因为只有满足这种关系，相位失配才为零，模间耦合达到最佳。因此，波纹的最佳周期决定于光纤的模式特性。变形器的位移改变了弯曲处的模振幅，从而产生强度调制。调制系数可写成：

$$Q = \frac{dT}{dx} \cdot \frac{dx}{dp} \quad (7)$$

式中：T—光纤的传播系数；X—变形器的位移；P—压力。

仪器介绍

光纤传感实验仪是在光纤传感领域中的光纤透射技术，反射技术及微弯损耗技术等基本原理的基础上开发而成的，由光纤传感实验仪主机，LED 光源、发射光纤，PIN 光电探测器、接收光纤、三维微位移调节器、反射器。微弯变形器等组成的实验系统。如图 I 所示。

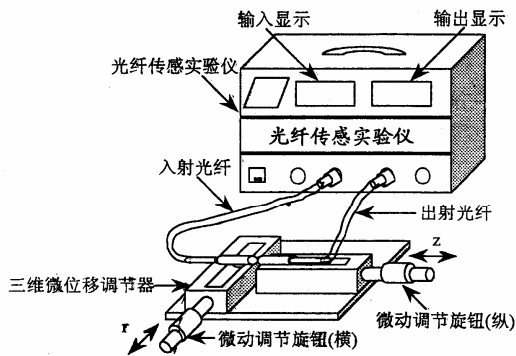


图 1 光纤传感实验仪示意图

光纤传感实验仪包括四部分：

1. 光纤传感实验仪主机。其功能是：为 LED 光源提供驱动电流；完成光电转换及放大作用，并输出电信号。

2. 三组光纤及探头：反射式发射光纤及探测接收光纤；透射式探测接收光纤；微弯式发射—接收光纤

3. 三维微位移调节器。用以固定光纤探头，实现微位移定量调节（精度为 0.01mm）。

4. 反射器和微弯变形器，配在三维微位移调节器上。

实验内容

1. 测定 LED 光源的 I—P 特性曲线（调节电流，每隔 2.5mA 记录一次电压输出值）。

2. 测定光纤纤端光场径向分布。

要求两光纤探头的间距设定为 0.5mm 和 1.0mm，分别测定光纤纤端光场径向分布，在同一坐标纸上做出两条实验曲线。

3. 测定光纤纤端光场轴向分布（在坐标纸上作理论曲线和实验曲线）。

4. 测量反射式位移传感器的调制特性曲线。

5. 微位移测量及微弯特性研究。

参考资料

[1] 张志鹏、W.A.Gambling, 光纤传感器原理, 中国计量出版, 1991, 第五章、第九章

[2] Yuan Libo and Anping Qiu, Fiber-optic diaphragm pressure sensor with automatic intensity compensation, Sensor and Actuators, A28(1)29-33, 1991

[3] Yuan Libo et al., Analysis of the compensation mechanism of a fiber-optic displacement sensor, Sensor and Actuators, A36(1), 177-182, 1993