

文章编号 :1001-2486(2000)06-0109-04

一种强度补偿反射式光纤位移传感器的研究*

徐涛,吕海宝,杨华勇,陈晓露

(国防科技大学机电工程与自动化学院,湖南长沙 410073)

摘要 提出一种等间距排列的三探头反射式光纤位移传感器,该传感器通过双路接收的方法来实现光强补偿。从理论上对该种传感器的补偿机理作了详细的分析,得出了位移特性调制函数的表达式,给出了仿真曲线。结果表明,这种光纤传感器可以有效地消除因光源光强波动、表面反射率以及光纤传输损耗的改变对输出特性的影响。

关键词 光纤;传感器;补偿;调制特性;位移测量

中图分类号 :TN25,TH703.2 **文献标识码** :A

Research of a Reflective Fiber - optic Displacement Sensor with Intensity Compensation

XU Tao, LU Hai - bao, YANG Hua - yong, CHEN Xiao - lu

(College of Mechaeronics Engineering and Automation, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract A reflective fiber - optic displacement sensor of three probes with equal transverse space is introduced. The sensor can perform automatic compensation by two receiving optical fibers. The compensation mechanism of this sensor is analyzed in detail, and at the same time the displacement modulating function and corresponding simulating curves are presented. Results show that this sensor can effectively eliminate the influence to output characteristics caused by power fluctuation, difference of surface reflectivity and transmission loss.

Key words optical fiber; sensor; compensation; modulating characteristic; displacement measurement

在整个光纤传感器家族中,反射式强度调制型光纤位移传感器是最基本和最成熟的一种。它不仅具有结构简单、设计灵活、性能可靠、造价低廉等优点,而且很容易实现对应变、压力、振动、温度以及表面粗糙度等多种物理量的测量。因此,它在光纤传感技术领域占有十分重要的地位。

这种强度调制方式也有其不足之处:它对光源、光纤以及其它系统元件存在的特性变化非常敏感,光信号通道中被传输的光强很容易受到外界因素干扰而发生变化,从而引起较大的测量误差。因此,在测量精度和稳定性要求较高的情况下,工业上实用化传感器的设计必须采用某种形式的补偿,以减小或消除上述因素带来的影响。

1 调制原理

最简单的反射式强度调制型光纤位移传感器如图 1 所示。整个传感器系统包括光源 L、光纤传感头和光电接收器 D。光纤传感头由发射光纤和接收光纤组成。光源 L 发出的光经发射光纤至被测对象表面,反射回来的光由接收光纤接收,最后由光电接收器 D 将接收到的信号光转换为电信号。当光源功率保持不变时,接收光纤接收到的光强与光纤探头和反射面之间的距离存在着一定的对应关系。根据检测到的光强信号,便可得出此距离值,进而推算出位移量的大小。

这种光纤传感器的主要缺点是光源的不稳定直接导致整个传感器输出的不稳定,造成位移测量的误差。另外,反射体表面反射率的不同,以及光线在光纤中传输损耗(包括本征损耗和弯曲损耗)的改变,都会对位移的精确测量造成一定的误差。

为避免上述因素所带来的影响,Hull—Allen 最早提出并研究了间距不等的三光纤反射式强度补偿

* 收稿日期 2000-04-28
项目类别 湖南省科委工业科技计划项目(99GKY2009)
作者简介 徐涛(1977-)男,硕士生。

型光纤传感系统^[1]其探头结构如图2所示。文献[2]也对这种探头结构作了一定的研究,进一步分析其强度补偿机理,建立起特性调制函数的理论表达式,进行了相关的实验,指出:采用这种补偿结构的光纤位移传感系统可以有效地消除光源输出起伏对测量精度的影响。

Hull - Allen 等人采用的是间距不等的三探头结构。当间距相等时,若不考虑反射面各处反射率的差异,两路接收光强完全一致,这样,若按照其补偿机理采用比值法作为输出,输出将不再含有被测参量的信息,上述原理失效,不能完成测量。另外,对于图2所示探头结构,由于光纤芯细柔软,容易弯曲,且各相邻光纤间距又较小,固定比较困难,间距的准确大小也不好确定,给测量引入新的误差。这里,我们提出一种等间距排列三探头结构的光纤传感器,如图3所示。这种光纤探头无间隙紧密排列,光纤尺寸相同,易于做成带状,省去了各光纤间间距的调整。其间距大小仅由光纤芯径和包层厚度来确定。反射面到光纤端面的距离最终通过两相邻接收光纤光强信号的比值来确定,这种光纤传感器也能自动补偿光源强度和反射面反射率变化对测量精度的影响。

2 补偿机理

2.1 纤端出射光场分布

对强度调制型光纤传感器而言,接收光强的变化反映了被测信号的变化,其光强响应特性是这类传感器的设计依据和应用基础。而光强响应特性又是在纤端出射光场分布的基础上建立起来的,因此,首先必须建立合适的光场分布假设。

强度型光纤传感器在早期的设计中,不少人都采用了均匀性假设^[3,4],即在光纤的数值孔径内,纤端出射光场的径向分布是均匀的。这虽然简化了对光纤输出模型的分析,但明显与实际不符,只能局限于一定条件下的近似应用。Hoogenboom 等人曾指出,光纤端面出射光场的场强分布可用高斯型函数来描述^[5],但并未给出具体的表达式。文献[6]直接按照高斯函数形式,给出了一种光强分布的表达式,但此式的通用性差,且与实验的符合程度不够理想。

文献[2]在理论分析的基础上,认为实际上纤端光场既不是纯粹的高斯光束,也不是纯粹均匀分布的几何光束,而是更接近于两者的混合。在综合上述两种近似情况后,给出一个既与实际相符,又具有通用性的纤端光场场强分布,即

$$I(r, z) = \frac{K_0 \Phi_0}{\pi R^2(z)} \cdot \exp[-r^2/R^2(z)] \quad (1)$$

式中 K_0 表示光波在发射光纤中的损耗; Φ_0 为光源耦合到光纤中的光强; $R(z)$ 为光场分布等效半径,且

$$R(z) = a_0 + k \tan \theta_c z^{3/2} \quad (2)$$

其中 a_0 为纤芯半径, θ_c 为光纤的最大入射角, k 为光场耦合系数,表征光源的性质和耦合条件对光场分布的影响。我们就从式(1)所描述的纤端光场分布出

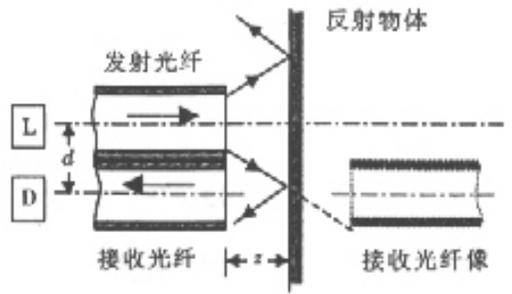


图1 反射式强度调制型光纤位移传感器工作原理

Fig.1 Operation principle of a reflective intensity-modulated fiber-optic displacement sensor

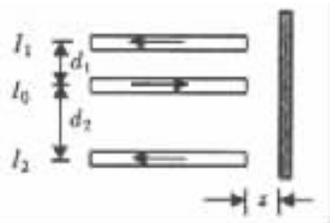


图2 Hull-Allen 探头结构

Fig.2 The fiber-optic probe given by Hull-Allen

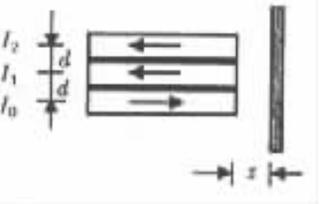


图3 等间距排列探头结构

Fig.3 The fiber-optic probe with equal space

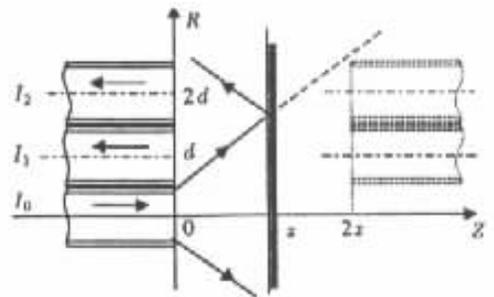


图4 三探头光纤传感器光耦合原理图

Fig.4 The optical principle figure of a three-probe fiber-optic sensor

发,分析等距排列三探头光纤传感器的补偿机理。

2.2 补偿机理分析

对于图3所示的三探头光纤传感头结构,以发射光纤中心轴线为 Z 轴,以过三光纤端面中心的连线为 R 轴建立坐标系,如图4所示。对这种反射接收型的光纤传感器,假设反射面为光滑镜面,不考虑散射的影响,则接收光纤所接收到的光强等价于将之置于反射体镜像对称处直接接收到的光强乘以镜面的反射系数。根据光纤纤端光强分布假设,并将(1)式代入可得接收光纤收到的光通量为

$$\Phi(r, z) = \rho \cdot \iint_S K \cdot K(r, z) \cdot \exp(-\sum_i \eta_i r_i) ds \quad (3)$$

式中 ρ 表示镜面的反射率, K 表示接收光纤的光功率损耗系数(本征损耗), $\exp(-\sum_i \eta_i r_i)$ 代表由于接收光纤弯曲所附加的损耗, S 为光纤有效接收面积。

下面来计算图4中接收光纤1、2所接收到的光通量。利用(3)式分别在各自端面上的积分得

$$\Phi_1(r, z) = \rho_1 \cdot \iint_{S_1} \frac{K_0 K_1 \Phi_0}{\pi R^2(z)} \cdot \exp(-\sum_i \eta_i r_i) \cdot \exp[-r^2/R^2(z)] ds_1 \quad (4)$$

$$\Phi_2(r, z) = \rho_2 \cdot \iint_{S_2} \frac{K_0 K_2 \Phi_0}{\pi R^2(z)} \cdot \exp(-\sum_j \eta_j r_j) \cdot \exp[-r^2/R^2(z)] ds_2 \quad (5)$$

由于此积分式比较复杂,不便于直接求积,我们作一定的近似处理以适当简化。由于单根多模光纤端面纤芯尺寸较小(一般其直径不超过零点几个毫米),我们可用接收端面中心点处的光强来作为各光纤面上的平均光强。在图4所建立的坐标系中,两接收光纤中心点处的坐标分别为 (z, d) 和 $(z, 2d)$,这里 d 为两光纤轴心的间距。将上述坐标值分别代入(4)、(5)式,可得

$$\Phi_1 = \rho_1 \cdot \frac{K_0 K_1 S_1 \Phi_0}{\pi R^2(z)} \cdot \exp(-\sum_i \eta_i r_i) \cdot \exp[-d^2/R^2(z)] \quad (6)$$

$$\Phi_2 = \rho_2 \cdot \frac{K_0 K_2 S_2 \Phi_0}{\pi R^2(z)} \cdot \exp(-\sum_j \eta_j r_j) \cdot \exp[-(2d)^2/R^2(z)] \quad (7)$$

采用二者的比值,可得这种光纤传感器的输出特性调制函数为

$$M(z) = \frac{\Phi_2}{\Phi_1} = \frac{\rho_2 K_2 S_2}{\rho_1 K_1 S_1} \cdot \frac{\exp(-\sum_i \eta_i r_i)}{\exp(-\sum_j \eta_j r_j)} \cdot \frac{\exp[-(2d)^2/R^2(z)]}{\exp[-d^2/R^2(z)]} \quad (8)$$

显见,特性调制函数通过两路接收信号的比值,巧妙地消掉了因子 K_0 和 I_0 ,从而消除了光源输出光强的变化以及发射光纤损耗的大小对结果的影响。

另外,对同一反射镜面而言,若不考虑其表面各处反射率的差异(即使有一定的差异,但由于不同反射处距离很近,而使这种差异小得可以忽略),再假设两接收光纤为同种光纤,且一起成缆,两光纤端面的纤芯面积、本征损耗和弯曲所带来的附加损耗可认为一致,则有近似关系:

$$\begin{aligned} \rho_1 &= \rho_2 \quad S_1 = S_2 \quad K_1 = K_2 \\ \exp(-\sum_i \eta_i r_i) &= \exp(-\sum_j \eta_j r_j) \end{aligned}$$

于是式(8)可化为

$$M(z) = \exp\left\{\frac{-3d^2}{[a_0 + k \cdot \tan\theta_c(z)^{3/2}]^2}\right\} \quad (10)$$

(10)式即为此种光纤传感器调制函数的表达式。由此可见,当光纤结构参数 d 、 a_0 、 θ_c 一定时,光纤输出特性仅与光纤端面到反射体之间的距离 z 有关,而与光源强度、反射体的反射率、光纤的本征损耗和由弯曲所带来的附加损耗等因素无关。这就通过两路光纤接收并采用比值形式进行补偿的方法,从原理上消除了上述各参量的变化对输出结果的影响,从而保证了测量的精度。

3 输出特性仿真

图5根据式(10)给出了一种此类光纤传感器输出特性的仿真曲线。选用的光纤探头等间距紧密排

列 纤芯半径 $a_0 = 100\mu\text{m}$,包层厚度 $b_0 = 50\mu\text{m}$,相邻光纤间距 $d = 2a_0 + 2b_0 = 300\mu\text{m}$,光纤最大出射角 $\theta_c = 34^\circ$,参数 $k = 0.5\text{mm}^{-1/2}$ 。另外 ,对于两路接收光纤接收到的信号光强 ,若不考虑附加弯曲损耗 ,并将其系数作归一化处理 ,令 $\rho_1 K_0 K_1 S_1 I_0 = \rho_2 K_0 K_2 S_2 I = 1$,则可作出它们的光强曲线如图 6 所示。

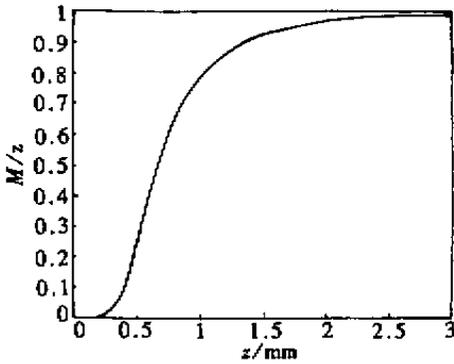


图 5 输出特性调制曲线

Fig.5 The curve of output characteristic

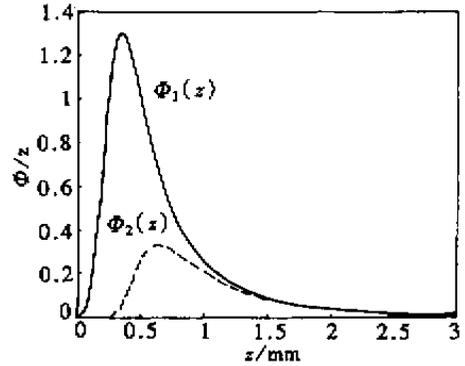


图 6 两路接收光纤曲线

Fig.6 The intensity curve of two receiving fibers

由图 6 中可以看出 ,两路接收光纤接收到的光强均随着距离的增大而增大 ,在达到某一距离处又开始减小。其前坡段灵敏度及线性度较好 ,可以用来进行微米级的测量 ;后坡段可用于距离较远而灵敏度、线性度和精度要求不高的测量 ;而在峰值距离处 ,由于输出信号对于光强变化的灵敏度要比对于位移变化的灵敏度大得多 ,可用于对表面状态进行光学测量。当光源光强、表面反射率以及光纤损耗发生变化时 ,接收到的光强也会发生变化 ,且这种变化受随机的外界因素的影响不能提前确定 ,造成位移测量的误差。而采用比值法进行补偿 ,将消除这些变化的影响 ,不管这些影响因素如何变化 ,输出特性始终表现为图 5 所示的一条曲线。从图中还可看出 ,在以上条件下位移测量的量程为 3mm 左右 ,在 0.2 ~ 1mm 范围内测量灵敏度较高 ,线性度较好 ,在 0.2mm 以内存在一段测量死区。这是由于距离过近时 ,经反射镜面反射后的光线大部分都集中在 $2d$ 以内 ,接收光纤 2 接收到的光强与接收光纤 1 相比非常微弱 ,这样采用比值法处理时 ,输出非常小 ,故产生一段死区。

4 结束语

本文采用双路接收的方法 ,给出一种可以较好地实现光强补偿的三探头反射式光纤位移传感器 ,并在多模光纤末端光场分布的基础上 ,从理论上对该种传感器的补偿机理作了详细的分析 ,得出其特性函数表达式。结果表明 ,该传感器能有效地对由光源强度、反射表面性质以及光纤光强损耗和弯曲损耗等因素变化带来的影响进行补偿 ,使其输出特性只敏感于光纤探头与反射体之间的距离 ,从而可以实现位移的精密测量。

参考文献 :

- [1] Hull - Allen G. Reflectivity compensation and linearization of fiber optic proximity probe response[J]. SPIE , 1984 , 518 : 81-90.
- [2] Yuan Libo , et al. The analysis of the compensation mechanism of a fiber - optic displacement sensor[J]. Sensors and Actuators : A , 1993 , 36(3) : 177-182.
- [3] Cook R O , et al. Fiber optic lever displacement transducer[J]. Applied Optics , 1979 , 18(19) : 3230-3241.
- [4] Lawson C M , et al. Fiber - optic diaphragm - curvature pressure transducer[J]. Optics Letters , 1983 , 8(5) : 286-288.
- [5] Hoogenboom L , et al. Theoretical and experimental analysis of a fiber optic proximity probe[J]. SPIE , 1984 , 478 , Fiber Optic and Laser Sensors II : 46-57.
- [6] 尹爱国等. 反射型光纤束的研究及其应用[J]. 仪器仪表学报 , 1990 , 11(3) : 244-249.

