

文章编号: 0253-2239(2003)02-0176-06

平行光束反射光强调制型光纤位移传感器研究*

马惠萍 刘丽华 杨乐民 李鹏生

(哈尔滨工业大学自动化测试与控制系, 哈尔滨 150001)

摘要: 讨论并建立了一种基于平行光束发射光强调制的光纤位移传感器,该传感器的入射和接收光纤的端部都用渐变折射率光纤(GRIN)制成的透镜耦合。入射光纤的渐变折射率光纤透镜发出的平行光束以一定入射角照射到试件表面,接收渐变折射率光纤透镜放置在入射光的镜面反射方向。详细分析了试件表面为镜面反射和朗伯反射时传感器的输出特性,由仿真计算可知,通过调整测头的结构参量,该传感器可获得较强的输出信号,适用于对测量范围和工作点有灵活要求的场合。

关键词: 光纤光学; 平行光束; 渐变折射率光纤透镜; 朗伯反射

中图分类号: TH703.65 文献标识码: A

1 引 言

反射光强调制型光纤位移传感器是光电子技术的新产品,它具有灵敏度高、不受电磁干扰、体积小、重量轻、使用方便等特点,已广泛用于尺寸、压力、温度、流量等各种物理量的测量和控制中。传感器结构如图 1 所示,入射光纤发出的发散光束经试件表面反射后,仅有一部分光能被接收光纤接收,输出光强的大小取决于测头到被测试件表面的距离 D 。若测头和试件垂直时,入射光纤和接收光纤之间的距离 d 必须足够小,否则测量存在“死区”,测量范围小,限制了光纤传感器的应用,而且过小的光纤间距也不易调整。

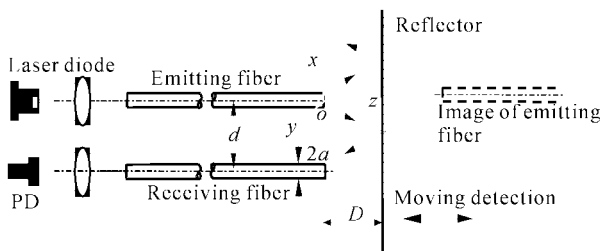


Fig. 1 Principle of reflective intensity-modulated sensor

本文提出一种平行光束光纤位移传感器,如图 2 所示,入射光纤和接收光纤的端部各耦合一个渐变折射率光纤制成的透镜,该透镜可使光源发出的光会聚成一平行光束并以入射角 θ 照射到试件上。

接收渐变折射率光纤透镜放置在镜面反射的方向上。若把试件置于某一特定位置 D_M ,接收光纤能接收到所有入射光。当试件向测头移近或远离时,仅能接收到一部分光,也就是说,接收光强的大小取决于距离 D ,由此可求出测头到被测表面的距离 D 。和上述的发散光束传感器相比较,这种类型传感器有两个优点:首先,由于测量时的入射光是平行光束,使得输出信号增强;其次,在这种结构传感器中,两光纤间距 d 和入射角 θ 都是可调节的。针对不同的测量要求,可选择不同的参量 d, θ ,对工作距离没有限制。这些特点使该类传感器在在线检测和过程控制方面有着广泛的应用前景。

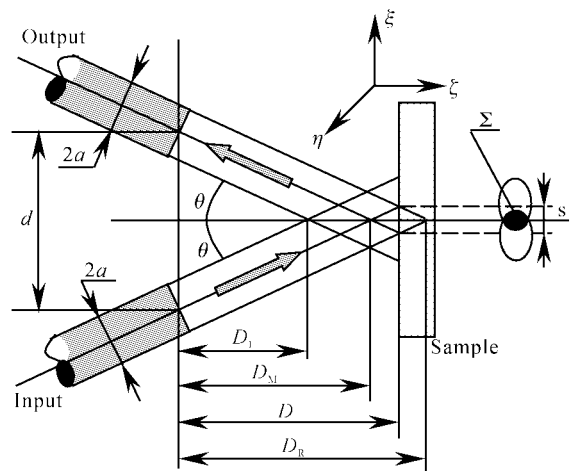


Fig. 2 Schematic of a collimated beam reflective intensity modulation proximity sensor for a specularly reflective sample

* 黑龙江省科学技术计划攻关项目资助课题。

E-mail: mahuijing74826@x263.net

收稿日期: 2002-01-09; 收到修改稿日期: 2002-04-01

传感器的位移灵敏度曲线是传感测量的基础,一般情况下,传感器的输出光强和距离 D^{-2} 成正比。

但实际测量时,调制函数不但与传感器结构(如测头直径 $2a$,数值孔径 NA 及光纤间距 d)有关,而且还与试件表面反射率 ρ 、旋转角度等因素有关。发散光束传感器的调制函数特性根据试件表面反射率的不同分下列两种情况已进行了研究^[1,2]:光滑表面和朗伯散射表面。对平行光束传感器目前还没有得到广泛的应用^[3,4],对调制函数与传感器结构和被测表面特性的关系也没有进行详尽的分析。本文对平行光束传感器的调制函数进行了理论分析,在分析中考虑了传感器结构对函数的影响,并且对光滑表面和朗伯散射表面分别进行了研究。由于篇幅所限,本文仅研究垂直于光轴的试件。

2 理论分析

平行光束传感器结构如图 2 所示,光纤芯径为 $2a$,渐变折射率光纤透镜的直径也为 $2a$,假设透镜孔径接收到的光亮度 B_1 是均匀的,则照射到透镜上的光照度为常数 $E_1 = \pi B_1$,光纤输出光强为

$$P_1 = \iint_A E_1 dA = \pi a^2 E_1, \quad (1)$$

式中 A 为透镜的孔径面积。

2.1 光滑镜面反射表面

假设被测试件是光滑全反射表面,以 θ 入射的光束在试件表面投影为椭圆形,椭圆的短轴为光纤半径 a ,长轴为 $b = a \sec \theta$,照射光斑上的光照度分布为^[5]

$$E(\xi, \eta) = P_1 / (\pi ab) = P_1 \cos \theta / (\pi a^2), \quad (2)$$

当试件垂直于光轴(ξ 轴)并且放置在距测头为 D_M 处(即测头和反射光束中心线的交点)时,入射光能全部被接收光纤接收,在该位置输出信号最大。当测头到试件表面的距离 D 位于 $\{D_L, D_M\}$ 或 $\{D_M,$

$D_R\}$ 区间内时,仅有一部分光被接收光纤接收,输出光强下降。当 $D < D_L$ 或 $D > D_M$ 时,没有输出光强(如图 2)。所以该传感器的位移特性曲线是一条以 D_M 为峰值的对称曲线,其中 D_L, D_M 和 D_R 可由下列公式表示为

$$\begin{aligned} D_L &= \frac{d - 2a \sec \theta}{2 \tan \theta} = \frac{d \cos \theta - 2a}{2 \sin \theta}, \\ D_M &= \frac{d}{2 \tan \theta}, \\ D_R &= \frac{d + 2a \sec \theta}{2 \tan \theta} = \frac{d \cos \theta + 2a}{2 \sin \theta}. \end{aligned} \quad (3)$$

由(3)式可知,探测距离参量 D_L, D_M 和 D_R 取决于传感器结构参量(如透镜直径 $2a$,两光纤间距 d ,入射角 θ)的大小,这样的传感器就可满足不同的任务要求。

在任意距离 D 处输出光强为

$$\begin{aligned} P_R &= \rho(\theta) \iint_{\Sigma} E(\xi, \eta) d\xi d\eta = \\ &= \frac{P_1 \cos \theta}{\pi a^2} \rho(\theta) \iint_{\Sigma} d\xi d\eta, \end{aligned} \quad (4)$$

其中, $\rho(\theta)$ 为试件在入射角 θ 处的反射率; Σ 为接收光纤接收到的光斑面积,大小由入射光纤以入射角 θ 照射到试件表面的椭圆形光斑和接收光纤沿反射角 θ 方向在试件上的椭圆形投影的重叠区决定。当试件位于如图 2 所示的位置 D 时,照明光斑的中心位于光轴 ξ 的上方,接收光纤的投影光斑中心在光轴 ξ 的下方,而且两光斑在光轴两端是对称分布的,它们的中心位置由下式决定:

$$\xi_L = -\xi_R = D \tan \theta - (d/2) = s/2, \quad (5)$$

此处 $s = \xi_L - \xi_R$ 是两椭圆光斑中心的距离。输出光强由两光斑重叠面积决定。

$$(\xi - \xi_L)^2 / b^2 + \eta^2 / a^2 = 1, \quad (\xi - \xi_R)^2 / b^2 + \eta^2 / a^2 = 1, \quad (6)$$

$$\iint_{\Sigma} d\xi d\eta = 2a^2 \sec \theta \left[\arccos\left(\frac{s}{2a} \cos \theta\right) - \frac{s}{2a} \cos \theta \sqrt{1 - \frac{s^2}{4a^2} \cos^2 \theta} \right], \quad (7)$$

(7)式也可表示试件位于峰值 D_M 左边的情形,此时 $s = d - 2D \tan \theta$ 。则试件位于不同位置时输出光强可分别表示为

当 $0 \leq D \leq D_L$ 或 $D_R \leq D \leq \infty$, 则 $P_R = 0$;

当 $D_L \leq D \leq D_M$ 或 $D_M \leq D \leq D_R$, 则 $P_R =$

$(2/\pi) P_1 \rho(\theta) [\arccos(s') - s' \sqrt{1 - s'^2}]$;

当 $D = D_M$, 则 $P_R = P_1 \rho(\theta)$;

其中 $s' = [s/(2a)] \cos \theta, s = |2D \tan \theta - d|$ 。

2.2 朗伯反射表面

当考虑试件为朗伯反射时,测头发出的光经试件后向四周反射,即光亮度为

$$B(\xi, \eta) = \rho E(\xi, \eta) / \pi = \rho P_1 \cos \theta / (\pi^2 a^2), \quad (8)$$

式中 ρ 为全反射系数。同理,入射光纤发出的平行光束照射到试件上是一个椭圆形光斑(见图 3), $\xi_L =$

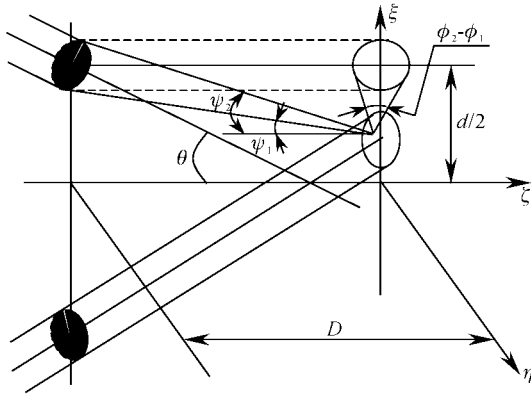


Fig. 3 Illustration of the calculation of modulation functions for a Lambertian diffusive sample

$D \tan \theta - d/2, b = a \sec \theta$ 。朗伯表面把入射光向四周散射,仅有一部分散射光被接收光纤接收,即从椭圆形表面向立体角 Ω 发射的光能被接收,接收光强为

$$P_R = \iint_{\Omega} d\omega \iint_{\Sigma} B(\xi, \eta) \cos \psi d\xi d\eta = \frac{\rho P_1 \cos \theta}{\pi^2 a^2} \int_{\phi_1}^{\phi_2} d\phi \int_{\psi_1}^{\psi_2} \sin \psi d\psi \iint_{\Sigma} \cos \psi d\xi d\eta, \quad (9)$$

式中 Ω 和立体角 Ω 有关的角度为

$$\left. \begin{aligned} \phi_1 &= -\arctan\left(\frac{a+\eta}{d/2-\xi}\right), \\ \phi_2 &= \arctan\left(\frac{a-\eta}{d/2-\xi}\right), \\ \tan \psi_1 &= \frac{d/2 - a \cos \theta - \xi}{D + a \sin \theta}, \\ \tan \psi_2 &= \frac{d/2 + a \cos \theta - \xi}{D - a \sin \theta}, \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

同时,只有满足 $|\theta - \psi| \leq \theta_N$ 的光才能被渐变折射率光纤透镜接收,此时的输出光强为

$$P_R = \frac{\rho P_1 \cos \theta}{2\pi^2 a^2} \int_{\xi-b}^{\xi+b} g(\xi) g_1(\xi) d\xi, \quad (11)$$

式中

$$g(\xi) = \int_{-r_1(\xi)}^{r_1(\xi)} (\phi_2 - \phi_1) d\eta = |d - 2\xi| \left(\gamma_2 \arctan \gamma_2 - \log \sqrt{1 + \gamma_2^2} \right) - \gamma_1 \arctan \gamma_1 + \log \sqrt{1 + \gamma_1^2}, \quad \phi_1 \phi_2 > 0, \quad (12)$$

$$g(\xi) = 4\pi \Gamma_1(\xi), \quad \phi_1 \phi_2 < 0, \quad (13)$$

式中

$$\Gamma_1(\xi) = (a/b) [b^2 - (\xi - \xi_1)^2]^{1/2}, \quad (14)$$

$$\gamma_1 = \frac{a - \Gamma_1(\xi)}{|d/2 - \xi|}, \quad \gamma_2 = \frac{a + \Gamma_1(\xi)}{|d/2 - \xi|}, \quad (15)$$

如果 $|\phi_1| < |\phi_2|$, 则

$$g_1(\xi) = 0, \quad |\phi_1 - \theta| > \theta_N, \quad (16)$$

$$g_1(\xi) = \sin^2(\theta_N + \theta) - \sin^2 \phi_1$$

$$|\phi_1 - \theta| \leq \theta_N, \quad |\phi_2 - \theta| > \theta_N, \quad \phi_2 > 0, \quad (17)$$

$$g_1(\xi) = \sin^2(\theta_N - \theta) - \sin^2 \phi_1$$

$$|\phi_1 - \theta| \leq \theta_N, \quad |\phi_2 - \theta| > \theta_N, \quad \phi_2 \leq 0, \quad (18)$$

$$g_1(\xi) = \sin^2 \phi_2 - \sin^2 \phi_1, \quad |\phi_2 - \theta| \leq \theta_N, \quad (19)$$

如果, $|\phi_1| > |\phi_2|$, 则

$$g_1(\xi) = 0, \quad |\phi_2 - \theta| > \theta_N, \quad (20)$$

$$g_1(\xi) = \sin^2(\theta_N + \theta) - \sin^2 \phi_1$$

$$|\phi_2 - \theta| \leq \theta_N, \quad |\phi_1 - \theta| > \theta_N, \quad \phi_1 > 0, \quad (21)$$

$$g_1(\xi) = \sin^2(\theta_N - \theta) - \sin^2 \phi_1$$

$$|\phi_2 - \theta| \leq \theta_N, \quad |\phi_1 - \theta| > \theta_N, \quad \phi_1 \leq 0, \quad (22)$$

$$g_1(\xi) = \sin^2 \phi_1 - \sin^2 \phi_2, \quad |\phi_1 - \theta| \leq \theta_N, \quad (23)$$

同理也可求出峰值位置和测量范围。如图 4 所示,渐变折射率光纤透镜的孔径角 θ_N 可看作是一个光锥,试件表面散射的光在光锥范围内的都可被透镜接收。由此可得光锥在试件所在平面的投影为 $\xi^2 + \eta^2 = (\xi' + D \sec \theta + a \operatorname{ctg} \theta_N)^2 \arctan^2 \theta_N$, (24) 式中, $\xi' = (\xi + \xi_l) \cos \theta, \xi' = -(\xi + \xi_l) \sin \theta$, 则椭圆的投影公式为

$$\frac{(\xi - \xi_R)^2}{q^2} + \frac{\eta^2}{p^2} = 1, \quad (25)$$

椭圆光斑的中心位置为

$$\xi_R = -\xi_l - \frac{D \tan \theta \tan^2 \theta_N + a \sin \theta \tan \theta_N}{\cos^2 \theta - \sin^2 \theta \tan^2 \theta_N} = \frac{d}{2} - \frac{D}{2} [\tan(\theta_N + \theta) - \tan(\theta_N - \theta)] - \frac{a}{2} \sin \theta [\tan(\theta_N + \theta) + \tan(\theta_N - \theta)]. \quad (26)$$

长轴和短轴为

$$q = \frac{D \tan \theta_N + a \cos \theta}{\cos^2 \theta - \sin^2 \theta \tan^2 \theta_N} =$$

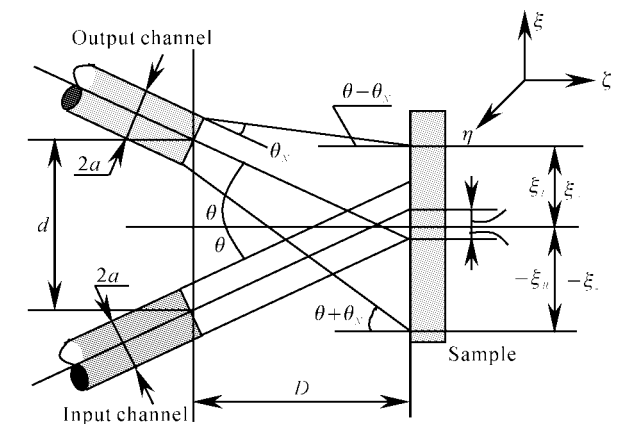


Fig. 4 The peak position and measurement range for the Lambertian ellipse diffusive sample

$$\frac{D}{2}[\tan(\theta_N + \theta) + \tan(\theta_N - \theta)] + a \cos \theta + p = \frac{q}{(\cos^2 \theta - \sin^2 \theta \tan^2 \theta_N)^{1/2}}, \quad (28)$$

$$\frac{a}{2}[\tan(\theta_N + \theta) - \tan(\theta_N - \theta)], \quad (27)$$

椭圆和 ξ 轴的交点 ξ_- 、 ξ_+ 分别为

$$\xi_- = -(D + a \sin \theta) \tan(\theta_N + \theta) + d/2 - a \cos \theta, \quad \xi_+ = (D - a \sin \theta) \tan(\theta_N - \theta) + d/2 + a \cos \theta, \quad (29)$$

ξ_R 、 q 与 ξ_+ 、 ξ_- 的关系为

$$\xi_R = (\xi_+ + \xi_-) / 2, \quad q = (\xi_+ - \xi_-) / 2.$$

由图 4 可知,传感器的测量范围由 D_L 、 D_R 决定,且 $\xi = \xi_1 + b$,则

$$D_L = \frac{d - a \sec \theta [1 + \cos^2 \theta + \sin \theta \cos \theta \tan(\theta_N + \theta)]}{\tan \theta + \tan(\theta_N + \theta)}, \quad (30)$$

$$D_{M1} = \frac{d + a \sec \theta [1 - \cos^2 \theta - \sin \theta \cos \theta \tan(\theta_N + \theta)]}{\tan \theta + \tan(\theta_N + \theta)}, \quad (31)$$

$$D_{M2} = \frac{d - a \sec \theta [1 - \cos^2 \theta + \sin \theta \cos \theta \tan(\theta_N - \theta)]}{\tan \theta - \tan(\theta_N - \theta)}, \quad (32)$$

$$D_R = \frac{d + a \sec \theta [1 + \cos^2 \theta - \sin \theta \cos \theta \tan(\theta_N - \theta)]}{\tan \theta - \tan(\theta_N - \theta)}, \quad (33)$$

很显然,当 $\theta_N = 0$ 时, D_{M1} 、 D_{M2} 和点 D_M 重合, D_L 、 D_R 的表达式同(3)式。

3 实验结果

分别取玻璃和铝作为研究对象,其中玻璃的折射率 $n = 1.5151$,激光器 $\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$,试件铝的光学常数 $\epsilon' = -40.18$, $\epsilon'' = 16.14$ 。所选渐变折射率光纤透镜的数值孔径 $\text{NA} = 0.3$,直径 $2a = 2 \text{ mm}$,两光纤间距 $d = 12 \text{ mm}$ 。在入射角 $\theta = 30^\circ$ 、 45° 、 60° 时的传感器输出特性曲线如图 5~图 8 所示。

图 5、图 6 所示分别为玻璃试件镜面反射和朗伯反射的输出特性曲线。如图 5 所示,随着入射角

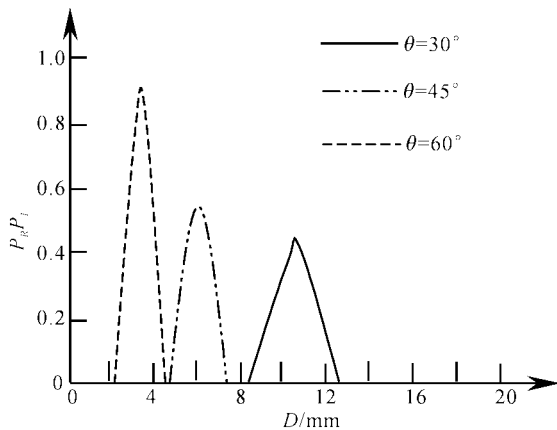


Fig. 5 Sensor modulation functions for a specularly reflective sample of glass

θ 的增大,输出光强的峰值也随之增大,这说明了表面反射率对输出函数的影响。而且,峰值位置和测量范围也受 θ 的影响:当 $\theta = 30^\circ$ 时,峰值点 $D_M = 10.39 \text{ mm}$,决定测量范围的两个临界点 $D_L = 8.39 \text{ mm}$, $D_R = 12.39 \text{ mm}$ 。同理, $\theta = 45^\circ$, $D_M = 6 \text{ mm}$, $D_L = 4.59 \text{ mm}$, $D_R = 7.41 \text{ mm}$, $\theta = 60^\circ$, $D_M = 3.46 \text{ mm}$, $D_L = 2.31 \text{ mm}$, $D_R = 4.62 \text{ mm}$ 。原因如下:入射角增大,光纤和透镜相对于试件越倾斜,测头发出的光束和光轴的交点离传感器越近,光斑和接收光纤投影的完全重叠区也向传感器移近,只有试件位于重叠区才有输出。这样,当 θ 增大,测量范围变小,峰值位置向传感器方向移近,峰值量值增大(峰值增大是因为反射率增大的缘故)。

图 6 所示为玻璃表面为朗伯反射时的输出。选 $\rho = 0.1$,因为朗伯反射时光向各个方向散射,所以测量范围变大($\theta = 30^\circ$ 时明显)。当 θ 增大时,接收透镜投影的区域变小(如图 4),测量范围变小,而且,朗伯表面向空间散射时渐变折射率光纤透镜仅能接收一部分光,所以曲线很陡(见图 6)。峰值位置和测量范围仍由发射光束和接收光纤投影的重叠区域的大小决定[见(35)式~(38)式]。当 $\theta = 30^\circ$ 时, $D > D_L = 5.56 \text{ mm}$ 才有输出(接收光纤的数值孔径 $\text{NA} = 0.3$),和镜面反射比较,该点离传感器近一些; $D_L < D < D_{M1}$ 时,传感器输出逐渐增大,在 $D = D_{M1}$ 照明光斑全在投影光锥内,输出达到最大,而且该点也比镜面反射时的峰值点距传感器近;在

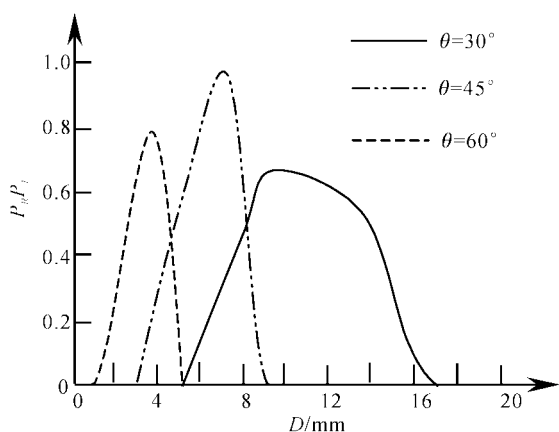


Fig. 6 Sensor modulation functions for a Lambertian diffusive sample of glass

$D_{M1} < D < D_{M2} = 14.76$ mm 时, 虽然入射光斑在投影光锥内, 但渐变折射率光纤透镜的面积是一定的, 当试件远离时, 从光斑中心引向透镜的立体角变小, 导致输出下降; 当 $D_{M2} < D < D_R = 17.67$ mm 时, 入射光斑有一部分落在光锥外, 输出大幅度下降; 当 $D \geq D_R$ 时, 光斑落在光锥外, 输出为零。由上分析可知, 朗伯反射时的光强输出曲线不是对称的。同理, $\theta = 45^\circ$, $D_L = 2.9$ mm, $D_{M1} = 3.89$ mm, $D_{M2} = 7.66$ mm, $D_R = 9.52$ mm; 当 $\theta = 60^\circ$, $D_L = 0.9$ mm, $D_{M1} = 1.54$ mm, $D_{M2} = 4.26$ mm, $D_R = 5.77$ mm。可见, 朗伯反射时的测量范围比镜面反射的大。铝块的输出特性曲线如图 7 和图 8 所示。由图 7, 镜面反射时试件反射率的变化很小, 所以峰值变化也很小。对朗伯反射(见图 8)取 $\rho = 0.9$, 高反射率仅影响输出光强的幅值。

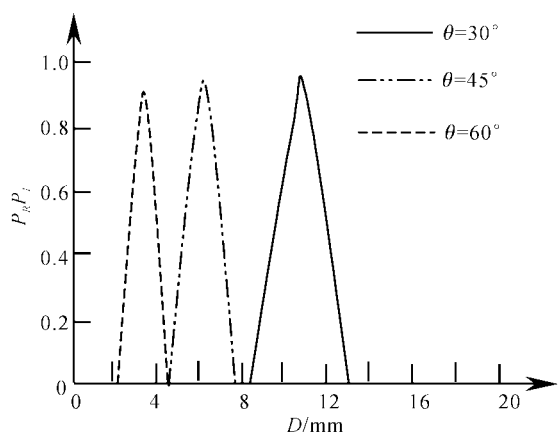


Fig. 7 Sensor modulation functions for a specularly reflective sample of aluminum

由此可见, 实验结果和理论分析是一致的。另

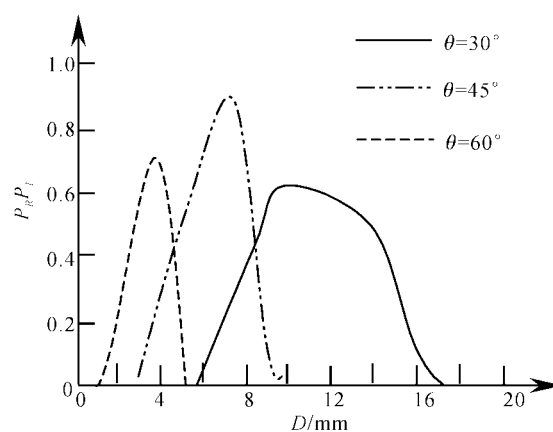


Fig. 8 Sensor modulation functions for a Lambertian diffusive sample of aluminum

外, 实际测量时还必须考虑测量范围以确定合适的测头参量。测头确定后, 在标定时根据测量范围定出起始工作点(通过调整测头的安装距离), 从而确定调制函数的可用工作段, 该工作段必须是单调的, 来保证测量的唯一性。

结论 传统的反射式光强调制型光纤位移传感器具有测量范围小、存在测量死区等缺点而限制了其应用。本文提出的一种平行光束光强调制型位移传感器可解决上述问题。分析了镜面反射和朗伯反射时的调制函数, 通过理论分析和实验验证可知: 通过调整测头参量(如光纤芯径 $2a$ 、数值孔径 NA、入射光纤和接收光纤之间的距离 d 和入射角 θ 等)来设计测量范围和工作点可变的传感器, 在在线检测方面有着广泛的应用前景。

参 考 文 献

- 1 Zhao Z, Lau W S, Choi A C K *et al.*. Modulation functions of the reflective optical fiber sensor for specular and diffuse reflection, *Opt. Engng.*, 1994, **33**(9):2986~2991
- 2 Zhao Z, Lau W S, Choi A C K *et al.*. Modulation functions of a reflective fiber sensor with random fiber arrangement based on a pair model, *Opt. Engng.*, 1995, **34**(10):3055~3061
- 3 Johnson M. Fiber displacement sensors for metrology and control, *Opt. Engng.*, 1985, **24**(6):961~965
- 4 Frank G I, Franklin D E, Palylyk R A. General purpose position sensor, *Proc. Soc. Photo-Opto. Instrum. Engng.*, 1985, **586**:238~243
- 5 Xu Shiwen. *Measurement Photology* (计量光学). Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 1988. 109~117

Fiber Optic Displacement Sensors Based on the Principle of Collimated Beam Reflective Intensity Modulation

Ma Huiping Liu Lihua Yang Lemin Li Pengsheng

(Automated Measurement and Control Department, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001)

(Received 9 January 2002; revised 1 April 2002)

Abstract: A fiber optic displacement sensor based on the principle of collimated beam reflective intensity modulation is constructed. Both emitting fiber and receiving fiber are connected to graded-index (GRIN) lenses. The probe GRIN lens emits a collimated beam to illuminate a sample at an oblique incident angle. The receiving GRIN lens is then placed in the direction of specular reflection. Modulation functions are analysed for specularly reflective and Lambertian diffusive samples. Artificial calculation shows that the sensor has high signal level and flexibility in working distance and measurement range through adjusting the configuration parameters.

Key words: optical fiber optics; collimated beam; GRIN lens; Lambertian diffusive sample