

使用自聚焦透镜测量小位移的新方法

黄伟同 俞本立 杨瀛海 罗 鹏
(安徽大学物理系, 合肥 230039)

摘 要 提出一种使用自聚焦透镜构成的光强度调制的光学位移测量原理, 利用发光二极管作光源, 光从第一根自聚焦透镜发出, 然后受到反射镜的反射而进入第二根自聚焦透镜, 当反射镜有小位移时, 进入第二根自聚焦透镜的光强度被调制, 用光电管检测光强度的变化, 可以确定位移的大小。根据该原理, 位移分辨率的理论值可达 10^{-9} m, 实验测量的位移分辨率为 10^{-8} m。该原理亦可用于测量小振动和压力等量。

关键词 自聚焦透镜, 位移分辨率。

1 前 言

使用光学方法的位移测量原理已有许多报道, 其位移分辨率可高达 $10^{-8} \sim 10^{-9}$ m 量级, 但它们的结构大多比较复杂, 调整较烦, 测量范围小, 容差也小。本文提出了用发光管作光源, 光电管检测光信号, 利用自聚焦透镜的传光特性, 制成结构简单、价格低、调整方便、测量范围较大、容差大、位移分辨率可达 10^{-8} m 量级的小型位移测量装置。

2 原 理

2.1 自聚焦透镜的光学特性

与传统的均匀介质透镜不同, 自聚焦透镜由非均匀折射率介质构成, 其径向折射率分布为

$$n(\bar{r}) = n_0(1 - Ar^2/2) \quad Ar^2 \ll 1 \quad (1)$$

式中 n_0 为沿光轴的折射率, A 为折射率分布常数, r 为到轴线的距离, 光线在非均匀介质中传播时, 如图 1 所示。

射线轨迹可用矩阵表示为:

$$\begin{vmatrix} r_0 \\ r'_{0air} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \cos(A_{1/2}l) & (n_0 A^{1/2})^{-1} \sin(A^{1/2}l) \\ -A^{1/2} n_0 / \sin(A^{1/2}l) & \cos(A^{1/2}l) \end{vmatrix} \begin{vmatrix} r_i \\ r'_{air} \end{vmatrix} \quad (2)$$

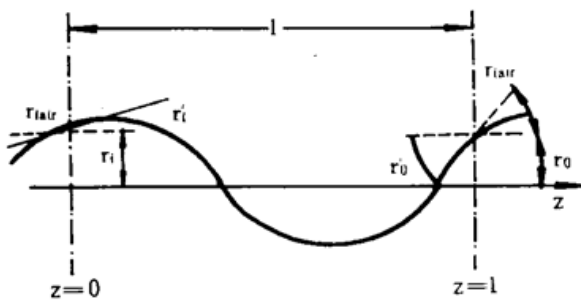


Fig. 1 Ray trace in the SELFOC lens

光线在自聚焦透镜内传播时有两个重要特点:

1) 由(2)式可得

$$r_0 = r_i \cos(A^{1/2}l) + r'_{air} (n_0 A^{1/2})^{-1} \sin(A^{1/2}l) \quad (3)$$

当取 $l = 1/4$ 周期、 $r_i = R$ 、 $r_{air} = 0$ ，由(3)式得 $r_o = 0$ ，即以自聚焦透镜半径 R 为半径的平行光束入射到 $1/4$ 周期长的自聚焦透镜时，光线将会聚于自聚焦透镜输出端面的光轴线上。

2) 根据光线的可逆性，当光源置于 $1/4$ 周期长的自聚焦透镜端面光轴上，则输出的光为一束半径等于 R 的平行光。

2.2 结构

如图 2 所示， L_1 和 L_2 为一对参数相同、半径为 R 、长度为 $1/4$ 周期的自聚焦透镜，发光管 S 紧贴于 L_1 端面轴线上。 L_1 截面积比发光管发光面积约大 20 倍，故讨论中可把发光管作为点光源，在 L_2 的出射端面轴线上紧贴着一光电管 T ，它把检测到的光信号转变为电信号输出。 F 为一反射镜， L_1 和 L_2 相对于 F 应如图 2 所示位置排列，此时 L_1 发出的平行光束以 θ 角入射到 F ，经等角反射进入 L_2 ，反射光线与轴线平行，当反射镜发生位移时，反射光线将扫过 L_2 的截面，如反射镜位移 Δy ，光束扫过 L_2 截面的距离为 Δx ，则：

$$\Delta y = l \cos\theta, \quad \Delta x = l \sin(180^\circ - 2\theta), \quad \Delta x/\Delta y = 2 \sin\theta \tag{4}$$

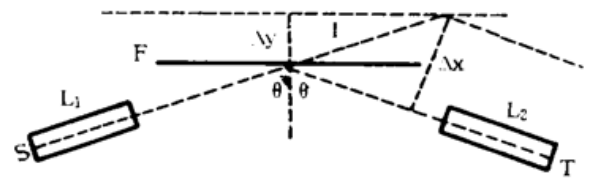


Fig. 2 Measuring setup of displacement
 L_1, L_2 :SELFOC lens, S :LED,
 T :Photocell, F :Mirror

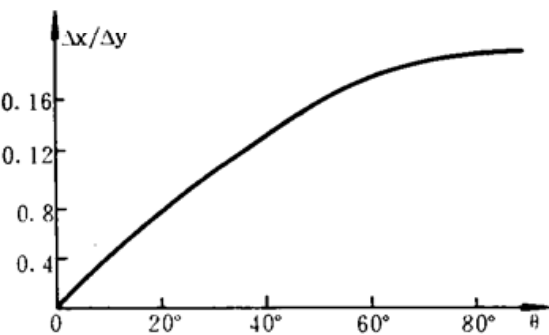


Fig. 3 Relationship between $\Delta x/\Delta y$ and θ

图 3 为 $\Delta x/\Delta y \sim \theta$ 关系曲线，曲线表明当 θ 很小时， Δx 远较 Δy 为小，亦即位移的动态测量范围扩大，例如，取 $R = 0.5 \text{ mm}$ ， $\theta = 1^\circ$ ，当 $\Delta x = 0.5 \text{ mm}$ 时， $\Delta y = 14.33 \text{ mm}$ 。又当 θ 趋于 90° 时， $\Delta x \approx 2\Delta y$ ，显示位移有一“放大量”，但此“放大量”最大为 2。若 $\theta > 88^\circ$ ，位移 $\Delta y = 1 \text{ mm}$ ，则 $\Delta x = 1.999 \text{ mm}$ 。所以这种设置较常用的反射式或对接式光纤位移传感器灵敏度高一倍。

由于 L_1 和 L_2 之间是通过较普通光纤心径大 20 倍的平行光束进行耦合，因而耦合容量较大，便于调整，光强度受反射镜位移 Δy 调制，因此，从光电管检测出的光强的变化，即可确定位移 Δy 。

3 耦合分析

本设计的关键是求得自平面镜反射的平行光束有多大部分进入 L_2 。当 $\Delta y \neq 0$ 时，反射的平行光束中心线与 L_2 轴线发生横向位移。因此，入射到 L_2 的光束截面积减小。为此，只需计算一根自聚焦透镜耦合到另一根参数相同的自聚焦透镜的光功率。由于自聚焦透镜端面上各点的数值孔径不同，在公共重叠区一点处耦合到接收透镜中的总光功率受到数值孔径的限制，即取决于该点处两个数值孔径的较小者。自聚焦透镜端面上一点 r 处的光功率 $P(r)$ 与该点处本地数值孔径 $NA(r)$ 的平方成正比，即：

$$P(r) = P(o) \cdot NA^2(r) / NA^2(o) = P_o [1 - (r/R)^2] \tag{5}$$

式中 $P(o)$ 是自聚焦透镜轴线上光功率密度， $NA(r)$ 、 $NA(o)$ 分别为 r 处与轴心处的数值孔径。透镜总光功率为

$$P = \int_0^{2\pi} \int_0^R P(r) dr d\theta = P(o) \pi r^2 / 2 \tag{6}$$

如图 4 所示，当二自聚焦透镜轴线横向位移量为 x 时，计算自聚焦透镜接处传输的功率。

将重叠区分成 S_1 和 S_2 两部分进行分析,在 S_1 处接收透镜数值孔径受到发射透镜数值孔径的限制。在 S_2 处,接收透镜数值孔径较发射透镜的数值孔径小,图中虚线各点上两部分的数值孔径相等,在区域 S_1 中接收到的光功率 P_1 为:

$$P_1 = 2 \int_0^{\theta_1} \int_{r_1}^R P(r) r dr d\theta = 2P(o) \int_0^{\theta_1} \int_{r_1}^R [1 - (r/R)^2] r dr d\theta \quad (7)$$

$$= P(o)(R^2/2) \{ \cos^{-1}(x/R) - [1 - (x/2R)^2]^{1/2} (5 - x^2/2R^2)x/6R \}$$

式中积分限 $r_1 = x/2\cos\theta$, $\theta_1 = \cos^{-1}(x/2R)$ 。

由区域 S_2 耦合的光功率 P_2 与 P_1 相等,因此自聚焦透镜 L_2 接收到的总光功率 P_T 为:

$$P_T = \frac{2}{\pi} P \{ \cos^{-1}(x/2R) - [1 - (x/2R)^2]^{1/2} (x/6R) (5 - x^2/2R^2) \} \quad (8)$$

式中 $(x/2R) < 1$ 。一般小位移测量中, x 较 R 为小,上式可近似写作:

$$P_T = P [1 - (8/3\pi)(x/R) + (1/3\pi)(x/R)^3 - (3/25\pi)(x/R)^5] \quad (9)$$

当 $x/R < 0.6$ 时,上式的准确度在 5% 以内。图 5 为 $(P_T/P) \sim (x/R)$ 曲线,光功率 P_T 的光进入自聚焦透镜 L_2 ,在光电管上产生的光电流 $I_d = \eta P_T$, η 为光电管的检测效率。

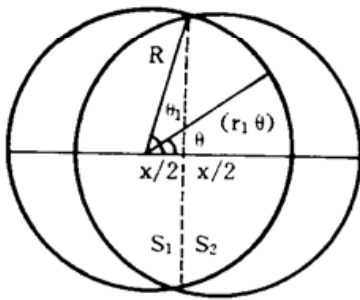


Fig. 4 Calculation of the coupling power

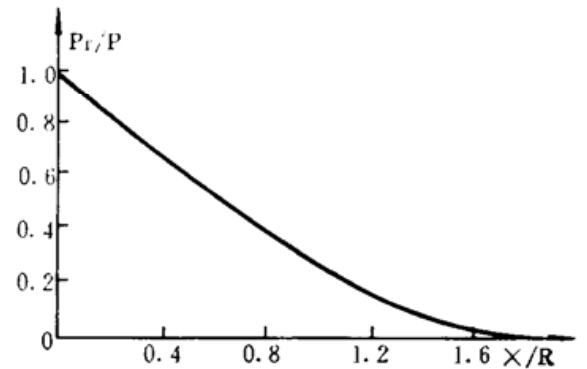


Fig. 5 Relationship between $P_T/P \sim x/R$

当光束扫过 L_2 截面一段距离 Δx 时,光电管产生的信号电流为 $I_s = (dI_d/dx)\Delta x$ 可近似为:

$$I_s = (\eta P_T / \pi R) [-8/3 + (x/R)^2 - (3/5)(x/R)^4] \Delta x \quad (10)$$

由于检测系统的散射噪声和光电管暗电流的存在,导致过小的信号电流可能淹没在噪声电流中而不能被检测,光电管检测器的噪声电流均方根值为:

$$I_n = [2eB_n(nP_T + I_{dk})]^{1/2}$$

式中 e 为电子电量, B_n 为噪声带宽, I_{dk} 为光电管暗电流,因此信噪比 S/N 为:

$$S/N = E(x)\eta P_T \Delta x / [2eB_n(\eta P_T + I_{dk})]^{1/2} \quad (11)$$

其中

$$E(x) = (1/\pi R) [-8/3 + (x/R)^2 - (3/5)(x/R)^4]$$

位移测量中一个重要参量是分辨率 Δy_{\min} ,

$$\Delta y_{\min} = \{ [2eB_n(\eta P_T + I_{dk})]^{1/2} / [E(x)\eta P_T] \} S/N \quad (12)$$

从上式可知, Δy_{\min} 的值主要决定于自聚焦透镜的半径 R 、信噪比 S/N 、接收功率 P_T 以及转换效率 η 。由于本设计中使用了自聚焦透镜,因此,接收的光功率将较一般光纤接收的功率大得多, ηP_T 的值约为 10^{-8} A 量级,而 I_{dk} 约为 10^{-9} A 量级,因此光电管的暗电流及其起伏可以忽略,采用不同的信噪比 S/N ,将获得不同的 Δy_{\min} 。图 6 为 $S/N = 1, 10, 100$ 时 $\Delta y_{\min} \sim P_T$ 的关系曲线,可见,当 S/N 取小值时得到小的 Δy_{\min} 。

然而,要求在小信噪比的情况下检测出光信号电流,则检测电路的要求也高,发光管光功率的稳定性是使用发光管作光源存在的共同问题,由(12)式可知,当 P_T 变化量为 1% 时, Δy_{min} 的变化量为 5%,要取得更准确的结果,发光管输出光宜采用双光路设计,一束为调制光,一束为参考光。

当取 $B_s = 100 \text{ Hz}$, $\eta = 0.5 \text{ A/W}$, $I_{dt} = 5 \times 10^{-9} \text{ a}$, $R = 0.5 \text{ mm}$, $P_T = 10^{-6} \text{ W}$,理论计算得到: $S/N = 1$ 时, $\Delta y_{min} = 1.5 \times 10^{-9} \text{ m}$, $S/N = 10$ 时, $\Delta y_{min} = 1.5 \times 10^{-9} \text{ m}$ 。

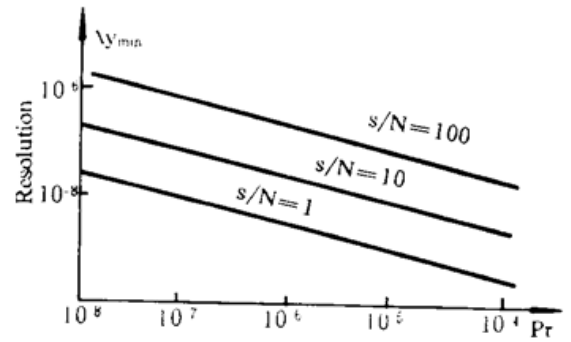


Fig. 6 Δy_{min} as a function of P_T for three values of S/N

4 实验结果

取长度约为 1/4 周期长的自聚焦透镜,由于发光管与光电管靶面不能紧贴在自聚焦透镜端面,故自聚焦透镜要适当磨制和检验,以保证第一根自聚焦透镜发出的是平行光,第二根自聚焦透镜能把此平行光会聚于光电管靶面上,实验中采用的自聚焦透镜参数为:半径 $R = 0.5 \text{ mm}$,聚焦常数 $A^{1/2} = 0.196 \text{ mm}^{-1}$,透镜长度 $L = 7.95 \text{ mm}$,数值孔径 $NA = 0.15$,中心折射率 $n_0 = 1.538$ 。

分别选取自聚焦透镜的入射角为 30° 和 60° ,当自聚焦透镜及反射镜位置调整合适,即入射到第二根自聚焦透镜的平行光束中心轴与透镜的中心轴重合,(9)式的 $x = 0$,此时检测到的光功率最大, $P_T/P = 1$,然后将反射镜沿 y 轴移动,每次间隔为 $10 \mu\text{m}$,分别记录对应的 P_T/P 值,把这些值代入(9)式即可得到待测的位移值。测量结果见表 1。测量中的分辨率约为 10^{-8} m ,较理论值约小一个量级,进一步提高检测装置性能,分辨率可望得到提高。

Table 1. Experimental results for displacement measurement

θ°	measuring range	mean error	resolution
30	$M < 50 \mu\text{m}$	$< +2\%$	$2 \times 10^{-8} \text{ m}$
	$100 < M < 300 \mu\text{m}$	$< +0.3\%$	
60	$M < 50 \mu\text{m}$	$< +2\%$	$3 \times 10^{-8} \text{ m}$
	$100 < M < 300 \mu\text{m}$	$< +0.3\%$	

与耦合器不同,本测量原理不是要求测量出射光功率的绝对值,而是测量入射光始末两位置对应出射光功率的差值,由此求出位移量,理论与测量表明,在一定范围内装置失调对测量结果造成的影响很小,可以忽略。

4.1 横向失调的影响

当反射镜反射的平行光束的轴线与第二根自聚焦透镜轴线不在同一直线上,即产生横向失调,从图 5 可知,在 $x/R < 0.5$ 区域内, $P_T/P - x/R$ 近似是线性的,因此,在此范围内测量,横向失调的影响可以忽略,在此区域外,横向失调可使测量的位移值偏大。应该指出,当存在横向失调时,测量起始位置的 P_T/P 应为最大值,当有位移时,此值逐渐减小,否则将得出错误结果。

表 2 为不同横向失调引起误差的理论值和实验值。

Table 2. Influence of lateral misalignment on measurement

lateral misalignment (μm)	measuring range (μm)	mean error	
		calculated	measured
20	0~100	+0.36%	+0.45%
	0~300	+0.77%	+0.82%
30	0~100	+0.57%	+0.63%
	0~300	+1.24%	+1.52%
40	0~100	+0.75%	+0.83%
	0~300	+1.65%	+1.77%
50	0~100	+1.12%	+1.32%
	0~300	+2.14%	+2.86%

4.2 角度失调的影响

当平面镜反射的平行光束不是垂直入射于第二根自聚焦透镜,即入射光束轴线与自聚焦透镜轴线有一偏角时,也会出现误差。角度失调无疑会使 P_T/P 变小,当入射光束与 L_2 轴线为 α 时可由下经验公式计算失调损耗:

$$L(\text{dB}) = -10 \log(1 - \alpha/\pi NA) \quad (13)$$

式中, NA 为自聚焦透镜的数值孔径, α 用弧度表示。当 $\alpha = 1^\circ$ 时, P_T 下降 4%, 当 $\alpha = 5^\circ$ 时, P_T 下降 18%。如上所述,光强下降对测量结果没有明显影响,但由于扫射光束与透镜端面不垂直造成的误差在 5% 左右。

角度失调造成误差的主要原因是,此时平行光束以一角度入射于第二根自聚焦透镜,平行光束将不再会聚于透镜输出端面轴线上,而是与轴线有一小距离 r_0 , 由(3)可知。当失调角度不大,如 $\alpha = 1^\circ$, $r_0 = 0.056 \text{ mm}$ 。一般光电管光敏面直径约为 0.3 mm, 此时出射光束聚焦斑点仍落在光电管靶面上,当 $\alpha = 5^\circ$ 时, $r_0 = 0.348 \text{ mm}$, 光束斑点已不落在靶面上,不能进行测量。

测量中对结构的参数可根据使用的需要作适当的选择,当测量的位移量小,分辨率的要求高,应采用小的 θ 值和 R 值。若要测量的位移量较大,对分辨率的要求不很高,则宜采用大的 θ 值和 R 值,半径 R 的选择还应注意: R 值小时位移分辨率高,但容差小,误差较大。相反,当 R 值大时,位移分辨率下降,但容差较大,易于调整使用。

结 论 利用自聚焦透镜的光学特性以及科学的设计安装,可制成高分辨率、测量范围大、容差大、调整方便、新颖小巧的小位移测量装置。

使用一对 1/4 周期长、半径 $R = 0.5 \text{ mm}$ 的自聚焦透镜,当 $P_T = 10 \mu\text{W}$, $\eta = 0.5 \text{ A/W}$, $x/R = 0.1$, $B_s = 100 \text{ Hz}$, $\theta = 30^\circ$, $S/N = 1$ 时,分辨率的理论值 $\Delta y_{\min} = 1.5 \times 10^{-9} \text{ m}$ 。

测量中使用自聚焦透镜的参数为: $R = 0.5 \text{ mm}$, $A^{1/2} = 0.196 \text{ mm}^{-1}$, $L = 7.95 \text{ mm}$, $NA = 0.150$, $n_0 = 1.538$ 。

利用本测量原理还可以用于测量微振动、压力等量。

参 考 文 献

- [1] R. O. Cook, C. W. Hamm, Fiber optic lever displacement transducer. *Appl. Opt.*, 1979, 18(19): 3230~

3231

- [2] N. Lagakos, T. Lilovitz, P. Macedo, Multimode optical fiber displacement sensor. *Appl. Opt.*, 1981, **20**(2): 167~168
- [3] S. D. Cusworth, J. M. Senior, A reflective optical sensing technique employing a GRIN rod lens. *J. Phys. (E)*, 1987, **20**(1): 102~103
- [4] Mark Johnson, Fiber optics displacement sensor for metrology and control. *Opt. Engng.*, 1985, **24**(9): 961~965
- [5] Patrick J. Murphy, Thomas P. Coursolle, Fiber optics displacement sensor employing a graded index lens. *Appl. Opt.*, 1990, **29**(4): 544~547

Displacement Measurement Employing a Group of SELFOC Lens

Huang Weitong Yu Benli Yang Yinhai Lo Pong

(Department of Physics, Anhui University, Hefei 230039)

(Received 10 February 1995; revised 11 August 1995)

Abstract A novel method of intensity modulated optic displacement measurement is described. A LED is used as source. The ray projects from the first SELFOC lens, then is reflected by the mirror and enters into second SELFOC lens. When the mirror has some little displacement, the ray entering the second SELFOC lens is modulated. The value of displacement is determined according to the change of light intensity with photocell. A resolution of 1×10^{-9} m is attainable with this metering device. The principle can be also used in the measurement of pressure and vibration.

Key words SELFOC lens, displacement resolution.