

用斐索自聚焦光纤干涉仪测微区面形

孙晓红 明海白 明 张国平 吴云霞 刘 畅 梁忠诚 谢建平

(中国科技大学物理系 合肥 230026)

束继祖

(中国科学院国家微重力实验室 北京 100084)

摘要 采用 LD 泵浦的单纵模 Nd:YVO₄ 倍频激光器、自聚焦棒以及三维精密调整架构成斐索型干涉仪,它具有同时测量微区振动和面形的功能,着重给出了测量微区面形的实验结果和理论分析。

关键词 斐索干涉仪,自聚焦棒,光纤传感器

1 引言

采用自聚焦透镜构成斐索型干涉仪的优点是:干涉仪中自聚焦光纤透镜既作为传光介质,又作为成像透镜;通过改变光纤透镜的长度,可以测量物体中不同大小的微型区域;多周期的长自聚焦透镜可作为一根硬性探针,深入到隐藏区域进行测量。用斐索自聚焦透镜干涉仪测量微区振动在文献[1,2]中已讨论过,本文报道由激光二极管(LD)泵浦的 Nd:YVO₄ 倍频小型激光器、自聚焦透镜和三维精密调整架构成的斐索型干涉仪,具有同时测量微区振动和面形的功能,可用于微重力下液桥的振动与变形的测试。本文在对斐索型干涉仪测振研究的基础上,着重进行物体微区面形测量的研究,给出了原理性实验结果并进行了理论分析。

2 实验装置

实验装置如图 1 所示。这里所用的光源是 LD 泵浦的单纵模 Nd:YVO₄ 倍频小型激光器,功率为 30 mW,波长为 532 nm,它发出高功率的绿色偏振光。此光源有很多优点,一方面它的时间相干性特别好,功率稳定,为提高干涉条纹的可见度提供了条件。另一方面其波长比较短,可以提高干涉测量精度。再者它发出的绿光位于海水窗口,适于对水中物体进行测量。

图 1 中的激光器,半反镜 BS,自聚焦棒 GL,成像屏(接收屏)IS,CCD 摄像机和光电探测器 PD 都安装在三维精密调整工作台上。该工作台是

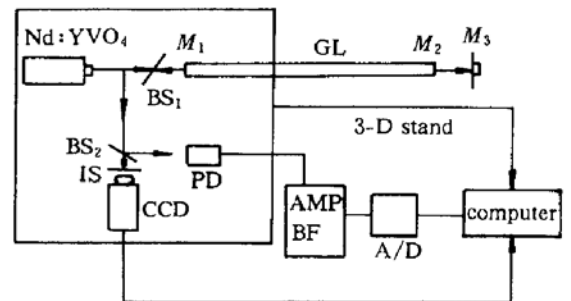


图 1 实验装置图

Fig. 1 Diagram of the experimental setup

精密机械与电子技术相结合的仪器,由计算机控制可实现在光学测量中三维方向上的精密位移,最大行程均为 100 mm,步进精度为每步 2.1 μm。工作台的运行可由计算机进行全过程的精密控制,也可由驱动电源上的手动开关控制。通过改变三维工作台在 x, y, z 方向的位置来改变 GL 棒的位置,从而测出物体不同位置上的面形和振动。

3 工作原理

图 1 中倍频 Nd:YVO₄ 偏振光经分束器 BS₁ 直接耦合进自聚焦棒的 M₁ 端,由自聚焦棒 GL 出射的光照到物体表面 M₃,以自聚焦棒的 M₂ 面反射回来的光为参考光 V_R 和从振动物体表面 M₃ 反射回来的光为物光 V_O,则它们经自聚焦棒 GL 与分束器 BS₁,在分束器 BS₂ 上形成干涉光,并由 BS₂ 分为两路:一路由光电探测器 PD 接收,经放大滤波器 AMP BF 和高速 A/D 转换后,将待测数据输入计算机,用来测物面 M₃ 的振动情况;另一路由成像屏接收,CCD 摄像机拍摄经计算机处理得到物体面形。

自聚焦光纤是一种具有成像作用的梯度折射率光纤,其折射率沿径向成二次曲线分布。光线在其中传播时,路线成周期性变化。光线的传播满足方程

$$\begin{cases} x = x_0 \cos(\sqrt{A} z) + \frac{P_0}{\sqrt{A}} \sin(\sqrt{A} z) \\ P = -x_0 \sqrt{A} \sin(\sqrt{A} z) + P_0 \cos(\sqrt{A} z) \end{cases} \quad (1)$$

坐标系如图 2 所示,其中 (x_0, P_0) 为光线入射点的径向坐标和光线斜率, (x, P) 为相应的出射点的坐标。当传播距离 $D = 2\pi L = 2\pi / \sqrt{A}$ 时, $x = x_0, P = P_0$,光线在自聚焦棒中的传播路程为一个周期,此时的光纤棒长度 D 即为自聚焦棒的拍长。其中 A 是光纤棒的特性常数,与光纤的制作过程和介质有关。成型的光纤棒拍长为定值,可通过截取不同长度自聚焦棒改变其成像特征。

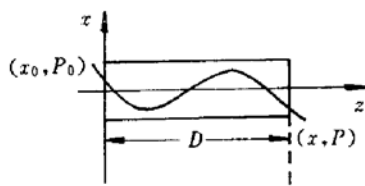


图 2 光线在自聚焦棒中的传播

Fig. 2 Propagation of the paraxial ray in GL

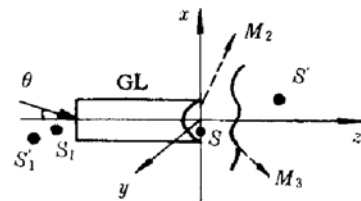


图 3 1/4拍长斐索干涉仪测面形原理图

Fig. 3 The principle diagram of the 1/4 pitch Fizeau Interferometer for the profile measurement

下面分析自聚焦棒为 1/4拍长(平行光入射,出射光为发散光)的斐索干涉仪,在被用来测任意曲面面形时的干涉原理。如图 3 所示,一束与自聚焦棒光轴成 θ 角的平行光线,经过自聚焦棒的传输,将 $z = 1/4 \times 2\pi L, P_0 = \tan\theta, x_0 = 0$ 代入光线传播方程(1)可得在出射端会聚在点 $S(0, L \tan\theta)$ 。参考面 M_2 和待测物面 M_3 的反射光的干涉可看作是点光源 S 及 S 通过曲面 M_3 反射所成虚像点 S' 的干涉引起的。如果假设待测曲面 M_3 是曲率半径为 R 且与 GL 共轴的凹球面,

则由凹面反射成像公式及垂轴放大率公式可得 S' 点的坐标为 $\left(\frac{2U'^2 + 2RU'}{2U' + R}, \frac{RL \tan \theta}{R + 2U'}\right)$ 。 S 和 S' 经过自聚焦透镜分别成像在 S_1 和 S_1' 。点 S_1 和 S_1' 的干涉场与 S 和 S' 的干涉场是等价的,所以参考面 M_2 和待测物面 M_3 的反射光的干涉场可由点 S_1 和 S_1' 的干涉场来获得。由自聚焦透镜的成像公式^[3]

$$\begin{cases} z' = n_1 \frac{z + L \left(\frac{n_2}{n_0}\right) \tan \frac{D}{L}}{n_2 - n_0 \left(\frac{z}{L}\right) \tan \frac{D}{L}} \\ x' = \frac{x}{\cos \frac{D}{L} - \left(\frac{n_0}{n_2}\right) \left(\frac{z}{L}\right) \sin \frac{D}{L}} \end{cases} \quad (2)$$

其中 n_1 和 n_2 分别为自聚焦透镜两端面外介质的折射率, n_0 为其中心折射率。可得 S_1 和 S_1' 的坐标分别为 (∞, ∞) , $(z', x') = \left[-\frac{L^2(2U' + R)}{n_0^2(2U'^2 + 2RU')}, -\frac{RL^2 \tan \theta}{n_0(2U'^2 + 2RU')}\right]$ 。 S_1 产生的是一束平行光,由光路可逆知此平行光沿入射光束方向出射。两束光波方程可分别表示为

$$\begin{aligned} V_R &= R \exp(jkz \sin \theta) \\ V_O &= \frac{O}{z''} \exp\left\{j \frac{k}{2z''} [(x - x')^2 + y^2]\right\} \quad (\text{其中 } z'' = z - z') \end{aligned}$$

干涉光场强度为

$$I(x, y) = |V_R + V_O|^2 = R^2 + \frac{O^2}{z''^2} + 2R \frac{O}{z''} \cos\left\{\frac{k}{2z''} \left\{[x - (x' - z'' \sin \theta)]^2 + y^2 + 2x' z'' \sin \theta - z''^2 \sin^2 \theta\right\}\right\}$$

所得到的干涉亮条纹方程为

$$\frac{[x - (x' - z'' \sin \theta)]^2 + y^2 + 2x' z'' \sin \theta - z''^2 \sin^2 \theta}{2z''} = n\lambda \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (3)$$

当 $R \rightarrow \infty$ 时,待测面 M_3 是平面,干涉条纹是垂直于 z 轴的 x, y 平面上的一族同心圆环;当 R 为凸面或凹面时所得干涉条纹均为同心圆环,且 $U' < |R| < 2U'$,测量条件 U' 相同时,待测物面为凹面比为凸面所得到的干涉条纹要密;当 $U' \rightarrow 0$ 或 $U' = -R$ 时,干涉条纹是 x, y 平面上的一族平行直线。

这样已知曲面 M_3 的曲率半径,即可求出干涉条纹方程和形状;反之由不同位置条纹形状,我们也可推得曲面曲率半径和形状,将在第 4 部分用实例来说明。

4 实验结果及分析

作为例子,选择长度为 106.21 mm ($1\frac{1}{4}$ 拍长),直径为 2 mm 的自聚焦棒斐索干涉仪分别对平面和焦距为 3 cm 凹透镜凹面及凸面进行测量。首先对平面进行测量,所得干涉条纹图如图 4(a) 所示;接着对凹透镜凹面进行测量,当 $U' = 0$ 时所得干涉条纹图如图 4(b) 所示, $U' \neq 0$ 时干涉条纹图如图 5(a) 所示。调节三维调整架在与图 5(a) 的 U' 相同条件下测得其凸面干涉条纹图如图 5(b) 所示。从条纹基本形状来看与第三部分理论分析相吻合,出现椭圆有两方面的原因:一是待测面球心不在 GL 光轴上,另一原因是接收面与光轴 (z 轴) 不垂直。下面从不同位置条纹形状来求面形数据和相对误差。

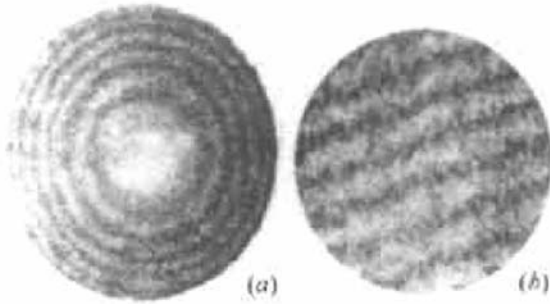


图 4 (a) 待测面为平面时的干涉条纹图;
(b) 当 $l' = 0$ 时的凹面干涉图

Fig. 4 (a) The fringe pattern of a planar object;
(b) The fringe of a concave at $l' = 0$

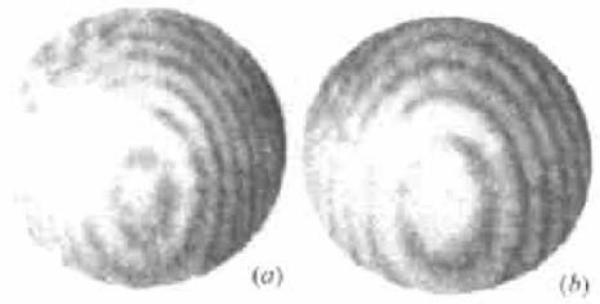


图 5 凹透镜凹面 (a) 和凸面 (b) 的干涉条纹图

Fig. 5 The interferometric pattern of a concave (a) and a convex (b)

作为例子,我们来测一焦距为 3 cm 的凹透镜的凹面,给出曲率半径值及其相对误差。有两种方法:一种是通过计算机控制三维调整架来实现;另一种是用计算机编程直接处理干涉条纹图来实现。通过计算机控制调节三维调整架,当所得到的干涉图为同心圆环时,说明凹透镜与自聚焦透镜共轴,此时控制调整架使其沿轴向靠近自聚焦棒运动,当干涉条纹为平行直条纹时,凹透镜顶点与自聚焦棒出射光线会聚点 S 基本重合(轴向重合),即 $l' = 0$,此时计算机记下三维调整架轴向位置 l_1 。再调节三维调整架沿轴向远离自聚焦棒运动,当又一次出现平行直条纹时,凹透镜凹面球心与 S 点重合,此时计算机记下轴向位置 l_2 。由此可得凹面曲率半径 $R = |l_1 - l_2|$ 。用这种方法测得 $R = 5.99907$ cm,相对误差为 0.015%。如果要测量凸透镜,就要换一根焦点在棒外(出射光为会聚光)的自聚焦棒。

另一种方法是,假定待测物体在距 M_2 面轴向距离为 l' 处,CCD 所拍摄到距 M_1 面为 z 处的干涉图相邻两干涉条纹半径分别为 R_1 和 R_2 ,最大干涉条纹半径为 l (mm),因为光纤棒半径为 1 mm,所以此干涉条纹相对于 M_1 面处条纹放大率为 l 倍,故可得 M_1 面处干涉条纹方程为

$$\left(\frac{R_2}{l}\right)^2 - \left(\frac{R_1}{l}\right)^2 = \left(\frac{2l' + R}{2l'^2 + 2Rl'}\right) \frac{L^2}{n_0^2} 2\lambda \quad (4)$$

调节三维调整架沿轴向移动距离 Δl 靠近待测物体,所得 z 处相邻干涉条纹半径为 R_1' , R_2' ,最大干涉条纹半径为 l (mm),则同理可得

$$\left(\frac{R_2'}{l}\right)^2 - \left(\frac{R_1'}{l}\right)^2 = \left[\frac{2(l' - \Delta l) + R}{2(l' - \Delta l)^2 + 2R(l' - \Delta l)}\right] \cdot \frac{L^2}{n_0^2} 2\lambda \quad (5)$$

解由(4),(5)组成的方程组可得 l' , R ,从而求得待测物面形, R 为正值待测面为凸面, R 为负值待测面为凹面。这种方法目前还不成熟,尚待研究。

另外从实验上来判断平面、凹面和凸面要根据三维调整架在调节过程中条纹形状的变化来决定。当三维调整架沿轴向远离待测物面,条纹基本形状均为同心圆环时,待测面为凸面;当远离待测物体时同心圆环逐渐变为平行直条纹,然后又为同心圆环时,待测面为凹面。当调整架垂直轴向运动条纹形状不变时,待测面为平面。

参 考 文 献

- 1 Ming Hai, Ren Baorui, Xie Jianping *et al.*. The expansion of measuring range of vibration with Fizeau type of

- gradient-index rod interferometer. *Opto-electric Engineering* (光电工程), 1991, 18(1):8~11 (in Chinese)
- 2 Ming Hai, Sun Yuesheng, Ren Baorui *et al.*. Fizeau-type of gradient index rod lens interferometer by using semiconductor laser. *Proc. SPIE*, 1991, 1572:27~31
- 3 Felix P. Kapron. Geometrical optics of parabolic index-gradient cylindrical lenses. *J. Opt. Soc. Am.*, 1970, 60(11):1433~1436

A GRIN Fizeau Interferometer for the Profile Measurement of Micro-surfaces

Sun Xiaohong Ming Hai Bai Ming Zhang Guoping
Wu Yunxia Liu Yang Liang Zhongcheng Xie Jianping
(Physics Department of USTC, Hefei 230026)

Shu Jizu

(NMLC, The Chinese Academy of Science, Beijing 100084)

Abstract A Fizeau type interferometer reported here is composed of a LD-pumped single-mode double-frequency Nd:YVO₄ laser, a different-size GRIN (Gradient Index) rod lens and a 3-D fine regulation stand. It is used for the measurement of the profile, deformation and oscillatory feature of micro-surfaces simultaneously. The experimental results and theoretical analysis are given.

Key words Fizeau interferometer, GRIN, fiber sensor