

文章编号: 0253-2239(2003)02-0202-05

微型差动式共焦自聚焦光聚焦探测系统*

谭久彬 张 杰

(哈尔滨工业大学超精密光电仪器工程研究所, 哈尔滨 150001)

摘要: 为解决微小内轮廓尺寸为代表的微小尺寸的非接触式超精密测量问题,提出了将自聚焦透镜体积小特点与共焦显微技术的高分辨率和绝对位置跟踪特性相结合的差动式自聚焦共焦微型显微技术的光探测技术,建立了相应的传感系统。介绍了系统的工作原理和构成,自聚焦透镜测头直径为 1 mm,两个探测器差动设置,不但消除了光源的光强漂移和探测器的电子漂移产生的共模噪声,提高了测量信噪比,而且有效地提高了系统的轴向分辨率。初步实验表明,系统轴向分辨率在倾斜度小于 20 度的范围内可达 5 nm。

关键词: 光学测量; 差动式共焦显微镜; 自聚焦透镜; 高分辨率; 非接触测量

中图分类号: T714.8 文献标识码: A

1 引 言

近年来,共焦显微技术由于其独特的轴向响应特性而引起众多专家学者的关注。在三维测量领域,已开发出多种共焦显微探测技术^[1~13],典型的方法有自聚焦法^[2,3],即当被测表面沿光轴通过焦平面时记录最大光强信号。该方法简单易行,但测量的轴向分辨率只在亚微米级;扩展聚焦法^[4,7],即对扫描位置的轴向响应进行积分,它虽然可以使焦深增大,但其轴向分辨率和对比度都要低于前一种方法;非干涉差分共焦显微技术^[5,6],该技术利用共焦显微技术的轴向响应曲线斜边处的光强随位置线性变化的规律进行表面轮廓测量,其轴向分辨率达到纳米量级。但是由于测量原理所限,存在较大的非线性误差,其测量范围也较小,只有几个微米。此外,以上几种方法的精度都受光源的光强波动以及探测器的电子噪声的影响较大,因此对光源的稳定性和探测器的精度要求较高,不适用于高精度的非接触测量,而且由于信号都是单极性信号,不是双极性聚焦误差信号,要确定物体是靠近还是远离焦平面比较困难,因而也不适用于自动调焦系统。

为克服上述光聚焦探测方法中存在的不足和缺陷,同时针对微小内轮廓表面测量,本文提出了差动式自聚焦共焦显微探测技术。该技术利用光路的差动技术,不但消除了光源的光强漂移和探测器的电

子漂移等共模噪声,大大地提高了测量的信噪比,而且在聚焦范围内光强随扫描位置的变化斜率变大,把轴向分辨率提高到非干涉差分共焦显微技术的 2 倍。同时,该技术还有诸多优点,如前端测头由于自聚焦透镜的使用而实现了测头微型化(测头直径为 1 mm);利用聚焦误差信号的双极性探测特性,有利于进行探测和跟踪瞄准的方向判别,在信号变化斜率最大处存在绝对位置零位。由此可见,该技术集中了微型化、高分辨率、高精度、具有绝对位置瞄准、双极性跟踪能力及测量范围大等优点。

2 差动自聚焦共焦探测工作原理

2.1 自聚焦透镜特性

目前,测量正向着微型化、集成化方向发展。用微型透镜作成的光学仪器体积小、重量轻、易安装调试、使用方便,可以明显地改善仪器的性能,从而在探测系统中得到广泛应用。作为微透镜中的重要一员,自聚焦透镜和传统的球面透镜相比,具有重量轻、体积小、平端面等特点,因而更适合应用于微型光探测系统中。自聚焦透镜的折射率分布为^[11]

$$n(r) = n(0) \left(1 - \frac{1}{2} Ar^2 \right), \quad (1)$$

即抛物线分布,如图 1 所示。式中, A 为与梯度折射率变化有关的常量,称为聚焦常量。自聚焦透镜的光线轨迹方程为

$$\begin{bmatrix} r_2 \\ \dot{r}_2 \end{bmatrix} =$$

* 国家自然科学基金(50075020)资助课题。

E-mail: tanjblab@hope. hit. edu. cn

收稿日期: 2001-12-10; 收到修改稿日期: 2002-03-29

$$\begin{bmatrix} \cos(\sqrt{A}Z) & \frac{1}{n_0\sqrt{A}}\sin(\sqrt{A}Z) \\ -n_0\sqrt{A}\cos(\sqrt{A}Z) & \cos(\sqrt{A}Z) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_1 \\ \dot{r}_1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

其中 r_1 和 r_2 分别代表入射点和出射点的位置坐标, \dot{r}_1 和 \dot{r}_2 分别为入射光线和出射光线在 r_1 和 r_2 处的斜率, Z 为透镜棒的长度坐标。光线坐标如图 2 所示。

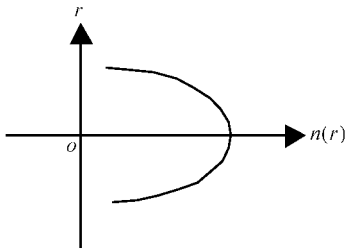


Fig. 1 Index distribution on grin lens

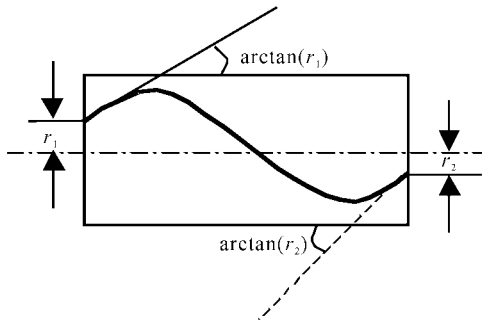


Fig. 2 Ray coordinate in grin lens

自聚焦透镜的传输轨迹是一正弦曲线,如图 3 所示,其周期(节距)为 $P=2\pi/\sqrt{A}$ 。根据透镜截距的不同,透镜可以对光线发散、会聚或准直。自聚焦透镜的独特特点,使它在光探测系统中,可以非常有效的取代普通透镜。

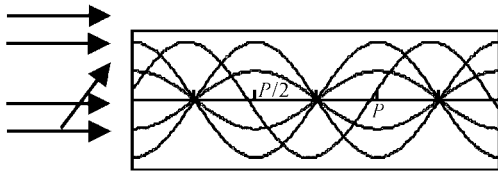


Fig. 3 Sinusoidal ray paths through a grin lens

2.2 工作原理

差动式自聚焦共焦光聚焦探测技术中,探头部分选用自聚焦透镜,探测器针孔的位置分别对称地位于焦平面之前和之后,通过对两探测信号求差与求和,获得光聚焦信号,其工作原理如图 4 所示。当物体位于焦平面时,两针孔的位置相对于像焦平面对称,两探测器的差值为零;当物体偏离焦平面一个微小位移时,探测器光功率一个增大,一个减小,因

而产生的差动信号可以较好地反映出物体位移的大小和方向。

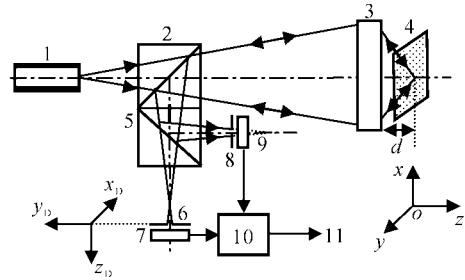


Fig. 4 Schematic diagram of differential confocal technique with a grin lens. 1: light source; 2: PBS; 3: grin lens; 4: object; 5: BS; 6: pinhole 1; 7: detector 1; 8: pinhole 2; 9: detector 2; 10: subtractor; 11: focus error signal

如果两针孔轴向偏离焦平面的位移分别是 $+u_D$ 和 $-u_D$,则两个探测器聚焦信号为^[8,9]

$$I(u, u_D) = |h(v_{xD} = 0, v_{yD} = 0, 2u + u_D)|^2 = \left[\frac{\sin(2u + u_D)/4}{(2u + u_D)/4} \right]^2, \quad (3)$$

其中 $h(v_{xD}, v_{yD}, u_D)$ 为系统三维点扩散函数,

$$\left. \begin{aligned} v_{xD} &= \frac{2\pi}{\lambda} x_D \frac{a}{d}, \\ v_{yD} &= \frac{2\pi}{\lambda} y_D \frac{a}{d}, \\ u_D &= \frac{2\pi}{\lambda} z_D \left(\frac{a}{d} \right)^2, \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

其中 a 为透镜光瞳孔径,则聚焦误差信号(FES)为

$$I_{diff} = I(u, -u_D) - I(u, u_D) = \left(\left\{ \frac{\sin[k(u - u_D/2)(1 - \cos \alpha)]}{k(u - u_D/2)(1 - \cos \alpha)} \right\} - \left\{ \frac{\sin[k(u + u_D/2)(1 - \cos \alpha)]}{k(u + u_D/2)(1 - \cos \alpha)} \right\}^2 \right) I_0. \quad (5)$$

当针孔偏离焦平面一个恰当的位移时,式(3)给出的即为该情况下检测到的光聚焦信号,为两光强信号的差,其仿真曲线如图 5 所示。由于采用共光路设计思想,光源的噪声和漂移同时作用于两探测器,差动的光聚焦探测信号可以有效地抑制光源产生的影响。

3 光聚焦探测传感系统组成及实验结果分析

微型高精度光探测三维内尺度测量有五个要求:一是微型化;二是轴向分辨率;三是对倾斜面的瞄准能力;四是对位置的绝对跟踪能力,即具有对非

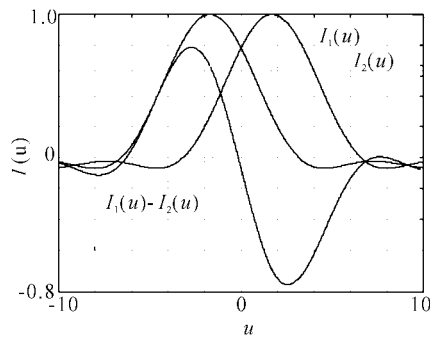


Fig. 5 Theoretical curve of focus error signal and detector measurement signal

连续轮廓和位置表面的跟踪瞄准能力,五是与瞄准探测头一体化的高精度的位移传感器,依此获得坐标值。结合上述基本要求,进行了实验。聚焦探测传感系统装置如图6所示,在激光器前面放置一个针孔,使光源成为点光源,经扩束器扩束后变成平行光进入偏振分光镜(PBS),透射过分光镜的光经过 $\lambda/4$ 波片和自聚焦透镜后到被测工件表面上(20度角规块),反射光经偏振分光镜反射后的光束由普通分光镜(PB)再次分别经过聚光镜聚焦,并探测透过针孔的光强信号。物体(20度角规块)在压电陶瓷(PZT)的驱动下(线性范围为 $\pm 10 \mu\text{m}$,并以一定频率驱动它作扫描振动,每个驱动脉冲可以获得2纳米的轴向进给)做轴向扫描运动,当扫描位置经过焦平面时,探测到的差动光强信号为最强点,此时高精度电容位移传感器(分辨率为1 nm,线性范围为 $\pm 50 \mu\text{m}$)测得的信号即为物体轴向的位移。

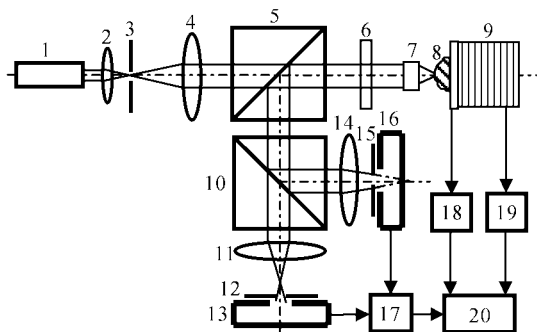


Fig. 6 Schematic diagram of differential confocal detection system using a gradient-index lens. 1: He-Ne laser; 2, 4: lens; 3: pinhole; 5: PBS; 6: $\lambda/4$; 7: GRIN lens; 8: object; 9: PZT; 10: PB; 11: collector; 12: pinhole1; 13: detector1; 14: collector; 15: pinhole2; 16: detector2; 17: subtractor; 18: displacement sensor; 19: PZT actuator and controller; 20: computer

自聚焦透镜的数值孔径将决定系统的分辨率;同时其外形尺寸将对微小内轮廓曲面的测量起到直

接影响。实验中选择数值孔径0.42,通光孔径1.0 mm的自聚焦透镜,其棒长与共轭长度(工作距离+棒长)及工作距离的关系分别如图7曲线1,2所示。由图可见,长度为1.3 mm时共轭距达到最小。再考虑使用要求,选择长度为1 mm的透镜,从而保证该探头可对半径5 mm以下的内曲面轮廓和尺寸进行探测,工作距离为1.2 mm。

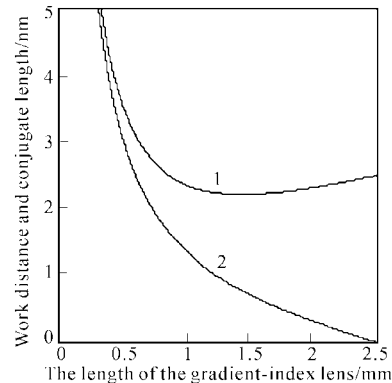


Fig. 7 The relationship between GRIN lens length and its work distance

选用 He-Ne 激光器作为光源,波长 632.8 nm,输出功率 7 mW,功率稳定性 $\leq 2.5\%/h$,光束直径 0.7 mm,光束发散角 $\leq 1 \text{ mrad}$,其保证了探测信号的稳定性和较高强度;聚光镜选用放大倍率为 10、数值孔径为 0.25 的普通平场显微物镜。图 8 给出了量块(a图)、8度角规块(c图)和 20度角规块(d图)的光聚焦探测信号的实验曲线。图 8(b)为图 8(a)聚焦检测信号在 $\pm 1 \mu\text{m}$ 位移范围内的放大曲线,该曲线表明此时信号灵敏度可达 2.5 nm/mV。由图 8(a),8(c)和 8(d)分析可知倾角对系统分辨率影响不大,系统对不同倾角的实验曲线基本相同;在 $\pm 1 \mu\text{m}$ 位移范围和 ± 20 度倾角范围内,差动曲线拐点处的灵敏度为 2.5 nm/mV,采用 12 位模/数转换精度为 ± 1 最低有效位,在 $\pm 5 \mu\text{m}$ 的线性范围内,模/数转换误差为 $\pm 3.3 \text{ nm}$,压电陶瓷驱动工作台可得到脉冲 2 nm 的进给。在考虑系统噪声及稳定性,因而可得,系统可进行分辨率 $\pm 5 \text{ nm}$ 的非连续轮廓和尺寸表面的跟踪瞄准,且前端测头直径仅 1 mm,结合高精度电容位移传感器和压电陶瓷,可获得微小内轮廓的坐标。对应图 8(a)所示 a~b 段,图 9 分别给出探测器 1、探测器 2 和聚焦误差信号的输出噪声信号曲线,通过比较,说明利用光路的差动设置,差动共焦探测技术可以有效地抑制因光源光强漂移和探测器电子漂移而产生的共模噪声。

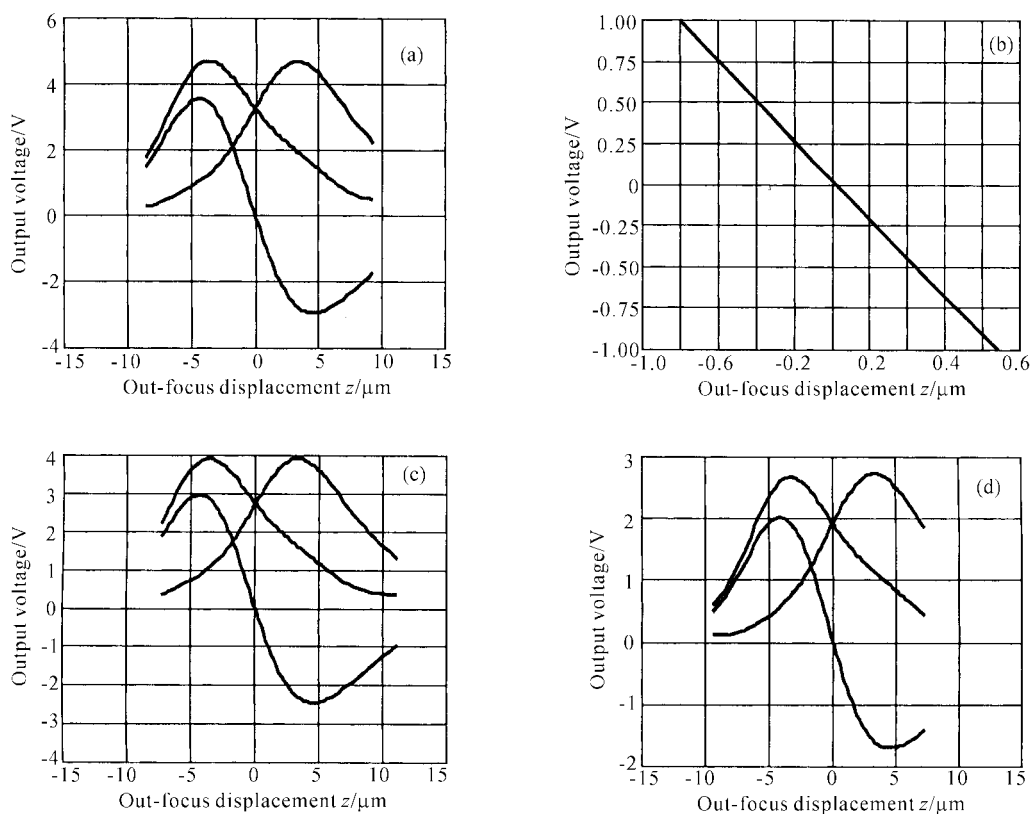


Fig. 8 Experimental curve of the focus error signal

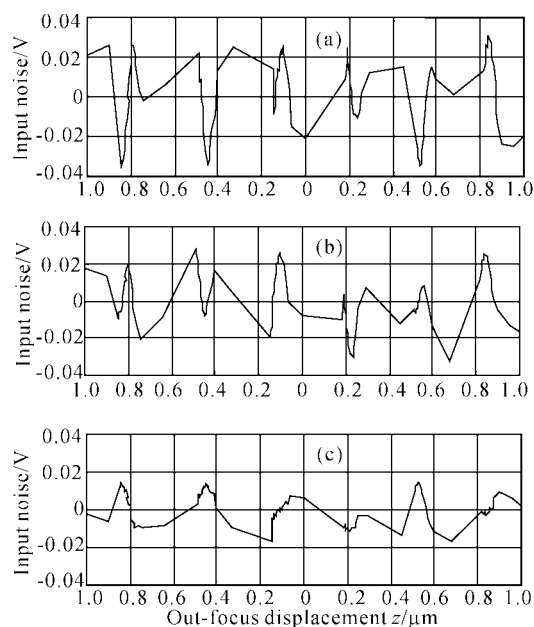


Fig. 9 Experimental curve of output noise of focus error signal (c) and detector signals [detector 1-(a), detector 2-(b)]

结论 综上所述,本文提出的差动式自聚焦共焦光探测传感系统充分利用了共焦显微镜所特有的轴向

响应特性和自聚焦透镜体积小特点,使其具备下述的特点:

- 1) 测量分辨率由光聚焦探测头和与之一体化位移传感器共同给出,位移传感器的分辨率为 1 nm,光聚焦探测头的瞄准分辨力可达 ± 5 nm;
- 2) 该系统同时具有对位置的绝对跟踪特性,这一重要特性使它具有了非连续轮廓和大台阶尺寸位置的测量能力;
- 3) 与高精度大量程位移传感器形成一体化可以实现高精度、大范围和非接触特点相兼顾的特殊测量;
- 4) 前端探头直径仅 1 mm,使它可用于微小内轮廓和尺寸的测量;
- 5) 可以有效地消除光源的噪声和漂移的影响;
- 6) 探测信号特性曲线斜率最大处存在绝对零位,因此该技术不仅同时具备测微和绝对位置跟踪能力,而且具备双极性探测特性,使在探测过程中准确判别跟踪探测方向成为可能。

感谢中国科学院西安光学精密机械研究所姚胜利高级工程师、高应俊研究员、高凤老师、严国安老师、宋辉老师等在课题研究中的帮助。

参 考 文 献

- 1 Gu M. *Principles of Three-Dimensional Imaging in Confocal Microscopes*. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd Singapore, 1996
- 2 Hamilton D K, Wilson T. Surface profile measurement using the confocal microscopy. *J. Appl. Phys.*, 1982, **53** (7):5320~5322
- 3 Hamilton D K, Wilson T. Three-dimensional surface measurement using the confocal scanning microscopy. *Appl. Phys. (B)*, 1982, **27**(1):211~213
- 4 Sheppard C J R, Hatthews H J. The extended-focus, auto-focus and surface-profiling techniques of confocal microscopy. *J. Modern Optics*, 1988, **35**(1):145~154
- 5 Lee C H, Wang J P. Noninterferometric differential confocal microscopy with 2-nm depth resolution. *Opt. Commun.*, 1997, **35**(2):233~237
- 6 Lee C H, Guo C L, Wang J P. Optical measurement of the viscoelastic and biochemical responses of living cells to mechanical perturbation. *Opt. Lett.*, 1998, **23**(4):307~309
- 7 Wilson T, Hamilton D K. Dynamic focusing in the confocal scanning microscope. *J. Microscopy*, 1982, **128** (2):139~143
- 8 Wilson T. *Confocal Microscopy*. London: Academic Press, 1990
- 9 Jordan H J, Wegner M, Tiziani H J. Highly accurate non-contact characterization of engineering surfaces using confocal microscopy. *Meas. Sci. Tech.*, 1998, **9**(9):1142~1151
- 10 Tim Dabbs, Monty Glass. Fiber-optic confocal microscope; FOCON. *Appl. Opt.*, 1992, **31**(16):3030~3035
- 11 Tomlinson W J. Applications of GRIN rod lenses in optical fiber commun. *Appl. Opt.*, 1980, **19**(8):1127~1131
- 12 Rea N P, Wilson T, Južkaitis R. Semiconductor laser confocal and interference microscopy. *Opt. Commun.*, 1996, **125**(2):158~167
- 13 Gu M, Sheppard H J R. Fibre-optical confocal scanning interference microscopy. *Opt. Commun.*, 1993, **100**(1):79~86

A Small Differential Confocal Optical Detection System Using a Gradient-Index Lens

Tan Jiubin Zhang Jie

(Institute of Ultra-Precision Optical and Electronic Instrumentation Engineering,
Harbin Institute of Technology, Harbin 150001)

(Received 10 December 2001; revised 29 March 2002)

Abstract: For super high precision non-contact measurement of miniature cavities, an optical focus detection system is proposed based on a differential confocal microscopy. This system combines a high axial resolution and absolute position traceability of a confocal microscopy with a small gradient-index lens. The differential confocal principle and the system configuration are presented. In this system, the small detector with 1 mm diameter is obtained by a gradient-index lens, the noise produced by the light source intensity drift and the detector electronic drift is eliminated, and signal-to-noise ratio and axial resolution are increased by differential design of two detectors. Measurement made with 20° degree gauge block, with a detector of 1 mm diameter, axial resolution is up to 5 nm.

Key words: optical measurement; differential confocal microscopy; gradient-index lens; high resolution; non-contact measurement