

文章编号: 0253-2239(2003)04-0446-05

应用共焦显微镜原理测量倾斜工程表面*

张建寰 谭久彬

(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: 用基尔霍夫衍射公式分析反射式共焦光路,得到了被测件有一定倾斜角度表面的共焦轴向响应理论模型。由菲涅耳衍射近似公式得到的共焦轴向响应特性只是它的理论模型的一个特例。同时,对接收端采用差动连接的共焦测量的聚焦瞄准信号进行了分析,得到了表面倾斜角对聚焦瞄准信号影响的关系。应用共焦实验系统及差动测量系统对具有不同倾角的块规斜面的轴向响应信号进行了测量。理论模型的数值分析与实验结果相吻合。用差动共焦光学系统作为瞄准传感器、用电容传感器进行位移监测,对倾角为 10° 的角规的斜面进行测量,得到分辨率小于 20 nm 的表面形貌图。

关键词: 光学计量; 差动共焦显微镜; 倾斜表面; 瞄准测头

中图分类号: TH741.8; TB96 文献标识码: A

1 引 言

近年来超精加工技术发展很快,因而相应的分辨率及准确度在亚微米甚至纳米级的超精测量手段也在世界范围得到了广泛的关注。应用共焦显微技术对工程表面进行测量,其精度可达 $10\text{ nm}^{[1]}$ 。在共焦显微检测领域,因为有许多学者、专家,如德国的 Wilson^[2],澳大利亚的 Gu Min^[3] 等的努力,使共焦显微术发展很快,共焦理论分析也逐渐完善。然而,利用共焦显微镜原理测量具有任意面型的工程表面时,遇到了不可逾越的障碍:被测表面的倾斜对共焦显微镜的轴向响应的影响。对这一问题的理论分析及实验研究还是一个空白,严重阻碍了共焦显微技术在超精加工及检测领域的应用。

共焦显微成像的思想是 Minsky 等人,于二十世纪 50 年代首次提出的。其独特的轴向分辨特性(深度分辨特性或层析特性),使共焦显微成像技术迅速发展起来并广泛应用于微电子、半导体材料、生物科学、医学检测、信息存储及表面轮廓计量等领域。

2 被测表面倾斜时共焦轴向特性的理论分析

图 1(a)是典型的反射式共焦显微镜的原理图;图 1(b)为其典型响应曲线。如图 1(a)所示的反射式共焦光路,当由光源发出的光经物镜、被测面反射再经同一透镜收集到达探测器前的光场振幅为^[1]

$$U_4(x_4, y_4) = \frac{\exp[-ik2(d_1 + d_2)]}{\lambda^4 d_1^2 d_2^2} \iint h_1(Mx_3, My_3) R(x_3 - x_s, y_3 - y_s) h_2(x_4 + Mx_3, y_4 + My_3) \times \exp\left[-\frac{ik}{d_1}(x_4^2 + Mx_3^2, y_4^2 + My_3^2)\right] dx_3 dy_3, \quad (1)$$

式中, $h_1(x, y)$ 和 $h_2(x, y)$ 是汇聚透镜和收集透镜的点扩散函数; $M = d_1/d_2$ 为透镜的放大倍数; λ 为入射光波的波长。

点探测器的探测函数为

$$D_4(x_4, y_4) = \delta(x_4)\delta(y_4),$$

并将系数归一化处理,则得到的光强为

$$I = |h_1 h_2 \otimes R|^2, \quad (2)$$

在这里,由于入射光路中的汇聚透镜和反射光路中的收集透镜是同一透镜, $h_1 = h_2 = h$ 。假设被测表面为一全反射镜,反射率函数 R 取为 1。则光强函数变为 $I = |h(x_2, y_2)|^4$ 。

引入归一化的径向坐标和轴向离焦量,得到光

* 国防预研基金(99J18.2.3HT0137)资助课题。

E-mail: acoluszjh@0451.com

收稿日期: 2002-08-09; 收到修改稿日期: 2002-10-28

强表达式

$$I(v, u) = \left| \int_0^1 P(x_2, y_2) \exp\left(-\frac{i u \rho^2}{2}\right) J_0(v \rho) 2\pi \rho d\rho \right|^4, \quad (3)$$

其中 $v = \frac{2\pi}{\lambda} r \sin \alpha$, $u = \frac{8\pi}{\lambda} z \sin^2\left(\frac{\alpha}{2}\right)$

为归一化的横向、轴向坐标。 $\sin \alpha$ 为透镜物方数值孔径。 J_0 为零阶第一类贝塞尔函数, ρ 为归一化径向坐标, $P(x_2, y_2)$ 为透镜的光瞳函数。

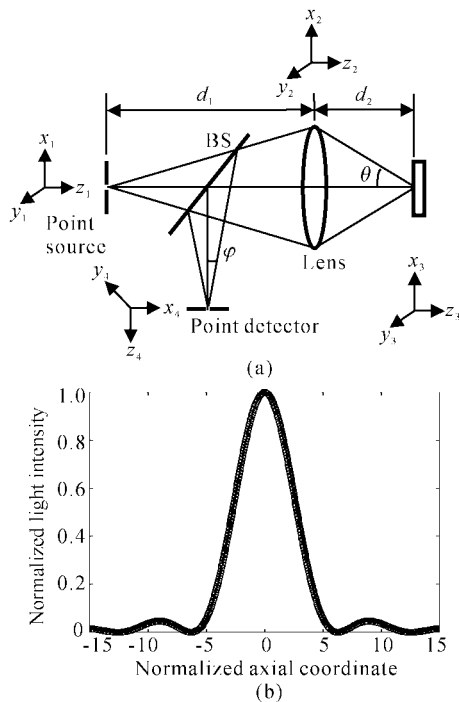


Fig. 1 Schematic diagram (a) and axial response (b) of confocal microscope

当被测表面倾斜时, 反射光线的光场方向偏转被测面倾斜角的 2 倍, 如图 2 所示。此时到达透镜前的某点 j 的光场, 可采用下面的基尔霍夫公式^[4] 分析,

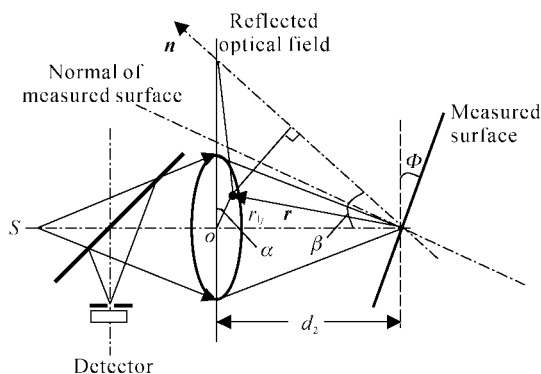


Fig. 2 Analysis of reflected optical field

$$U(x, y) =$$

$$\frac{i}{\lambda} \iint_{-\infty}^{+\infty} U'(x, y) \exp(-ikr) \frac{\cos(\mathbf{n}, \mathbf{r})}{r} dx dy, \quad (4)$$

式中 $\cos(\mathbf{n}, \mathbf{r})$ 是光轴方向 \mathbf{n} 与观察方向 \mathbf{r} 之间夹角的余弦。

由图中的几何关系可得

$$\cos(\mathbf{n}, \mathbf{r}) = \frac{d_2 \cos \beta + r_{1j} \sin \beta \cos \alpha}{r}, \quad (5)$$

其中

$$r_{1j}^2 = x_2^2 + y_2^2,$$

$$\alpha = \arctan(y_2/x_2),$$

$$r^2 = d_2^2 + r_{1j}^2$$

代入基尔霍夫公式(4), 引入归一化坐标整理得共焦响应轴向特性:

$$I(v=0, u) = \left[\frac{\sin(u/4)}{u/4} \right]^2 \times \cos^2 \beta \left| \int_0^1 \frac{\rho}{d_2^2 + \rho^2} \exp\left(-\frac{i u \rho^2}{2}\right) d\rho \right|^2. \quad (6)$$

对(6)式进行数值仿真计算得如图 3 所示的仿真曲线。

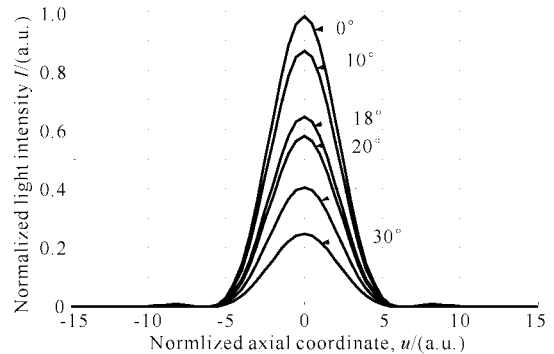


Fig. 3 Axial response of confocal microscopy of different slopes measurement

当被测面倾角 $\beta=0$, 则被测面法线与共焦轴线相平行, 并把菲涅耳近似条件 $\rho/d_2 \approx 0$ 代入(6)式得到

$$I(v=0, u) = \left[\frac{\sin(u/4)}{u/4} \right]^4. \quad (7)$$

这与传统的共焦轴向响应特性是一致的^[3]。

在共焦光路的接收侧, 将被测量信号分成两路, 用两个光电转换器以差动方式连接, 得到共焦差动信号。用共焦差动信号作为测量瞄准信号对工程表面测量时, 可克服光聚焦探测方法中存在的线性误差较大、测量范围小、精度受光源及探测器噪声影响较大的缺点。并且消除了光源的光强漂移和探测器的电子漂移等共模噪声, 大大提高了测量的信噪比; 利用共焦差动测量信号的双极性探测及在测量信号斜率最大处存在绝对零位的特性, 可进行绝对位置瞄准、

双极性跟踪等操作,具有测量范围大的优点^[4]。

差动共焦测量光路如图 4 所示。

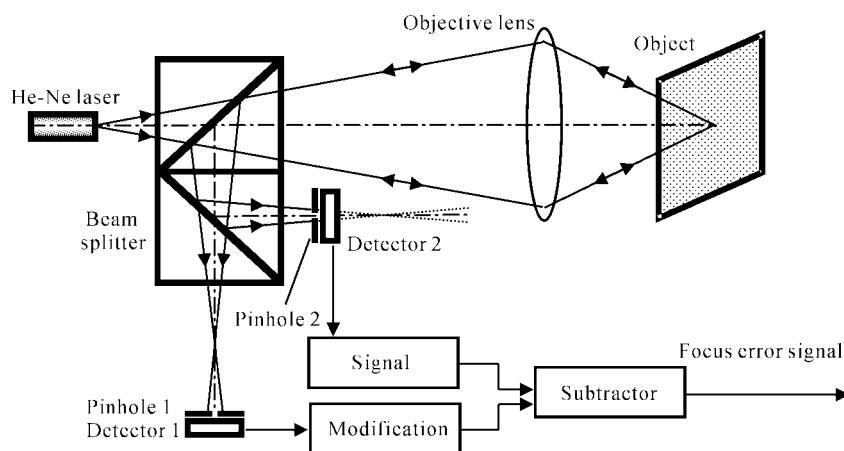


Fig. 4 Schematic diagram of differential confocal microscopy detection technique

$$S_{FE} = I(u, +u_D) - I(u, -u_D) = \left[\frac{\sin[(2u + u_D)/4]}{(2u + u_D)/4} \right]^2 - \left[\frac{\sin[(2u - u_D)/4]}{(2u - u_D)/4} \right]^2, \quad (8)$$

测量倾斜表面,当探测器有轴向偏移时,共焦显微镜的轴向响应特性变为^[4]

$$I(v = 0, u + u_D) = \left[\frac{\sin(u/4)}{u/4} \right]^2 \cos^2 \beta \left| \int_0^1 \frac{\rho}{d_2^2 + \rho^2} \exp \left[-\frac{i(u + u_D)\rho^2}{2} \right] d\rho \right|^2, \quad (9)$$

$$I(v = 0, u - u_D) = \left[\frac{\sin(u/4)}{u/4} \right]^2 \cos^2 \beta \left| \int_0^1 \frac{\rho}{d_2^2 + \rho^2} \exp \left[-\frac{i(u - u_D)\rho^2}{2} \right] d\rho \right|^2, \quad (10)$$

其中(9)式为探测器位于焦面前的位置时的轴向响应数学模型,(10)式是探测器位于焦面后的位置时的轴向响应数学模型, u_D 为针孔与焦点之间的差动

量。

将两个光电探测器差动连接后,其输出的差动信号的数学表达式为

$$S_{FE} = I(u + u_D) - I(u - u_D) = \left[\frac{\sin(u/4)}{u/4} \right]^4 \cos^2 \beta \left\{ \left| \int_0^1 \frac{\rho}{d_2^2 + \rho^2} \exp \left[-\frac{i(u + u_D)\rho^2}{2} \right] d\rho \right|^2 - \left| \int_0^1 \frac{\rho}{d_2^2 + \rho^2} \exp \left[-\frac{i(u - u_D)\rho^2}{2} \right] d\rho \right|^2 \right\}, \quad (11)$$

如果令(11)式中的测量表面倾角 $\beta = 0$,并把菲涅耳近似条件代入得到与(8)式相同的差动共焦测量信号的表达式。

对(9)式、(10)式、(11)式进行数值计算,得随测量表面的倾角变化差动共焦测量曲线如图 5 所示。

从共焦差动测量信号曲线(图 5)可以得出:测量信号的斜率随测量表面的倾角而变化,当测量表面倾角为零时,曲线的斜率最大,即此时进行双极性测量的分辨率最高。另外,用于测量时瞄准的差动共焦测量信号的过零点的位置不随测量表面的倾角变化。

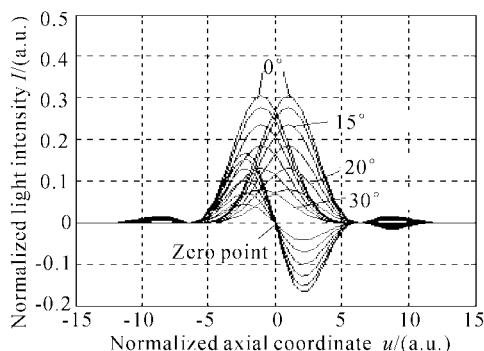


Fig. 5 Axial response of confocal microscopy and the pointing signal of differential confocal microscopy

3 共焦测量实验系统

图 6 所示为共焦实验系统。利用该系统进行了三个实验：单路共焦测量倾斜不同角度的表面的轴向响应、差动共焦测量不同倾角表面的测量瞄准信号和对倾角为 10° 的量块的倾斜表面轮廓的局部形貌的测量。

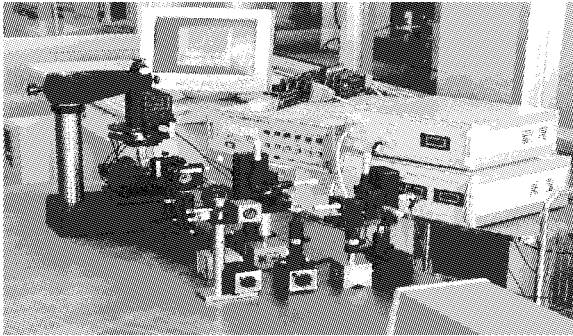


Fig. 6 Experimental system of confocal microscopy

该系统中的光源为 HP5528 的 He-Ne 激光器；物镜是 Olympus 公司的 40×0.65 的平场消像差物镜；光电探测器为美国 Newfocus 公司产品；实验中的微位移驱动采用的是 PI 公司的压电陶瓷；位移的监测是本课题组开发的经激光干涉测量仪标定的电容位移传感器；实验光路中所用的小针孔是美国 Newport 公司的 PH-10，小孔直径 $10\ \mu\text{m}$ ，厚度为 $15.24\ \mu\text{m}$ ，材料为钨合金。

图 7 为单路共焦光路对表面倾角为 0° 、 10° 、 18° 、 20° 、 25° 、 30° 的块规进行测量得到的探测器轴向响应实验曲线。

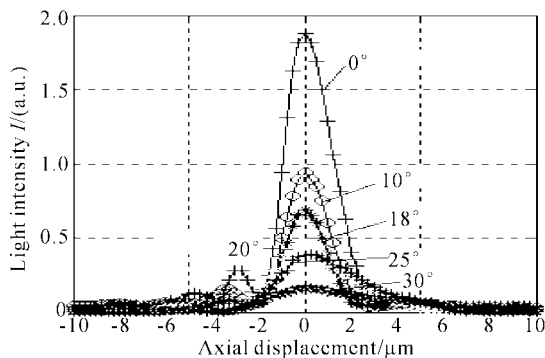


Fig. 7 Axial response of confocal microscope of different slopes. slopes of 0° , 10° , 18° , 20° , 25° , 30°

将数值分析仿真曲线图 3 与实验测量曲线图 7 加以对比，可得到如下结论：

首先，随被测面倾斜角增大，轴向响应曲线的峰值点变小、实测曲线的半极值宽度基本不随被测面的倾角变化与理论分析模型曲线是相符的。

其次，两图相比较的不同之处：被测倾角为 0° 时，实验曲线的峰值点较被测面存在倾角的情况高出很多，其原因是在这种情况下，光能损失最少；当有倾角存在时，即使很小的一个角度，如 10° ，其最大测得光强要小得多。造成这种情况的原因，一是被测面倾斜时，因收集透镜的光瞳限制，有较大的一部分光没有沿原路返回，造成较大光能损失；二是被测件的表面光洁度有差异，反射率不同造成的。

实验曲线中出现了较大的旁瓣，这是因为所用的透镜存在着像差及实验光路中所引入的杂散光所造成的；当被测面的倾角达到 30° 时，光强几乎已经不可测量了。

图 8 为差动共焦测量所得到的实验曲线。将实验曲线与图 5 所示数值仿真曲线相对照，可以看到二者规律一致：差动共焦测量信号曲线的线性段的斜率随被测面的倾角增大而减小；作为瞄准信号用的测量信号的过零点不随被测面的倾角而变化。

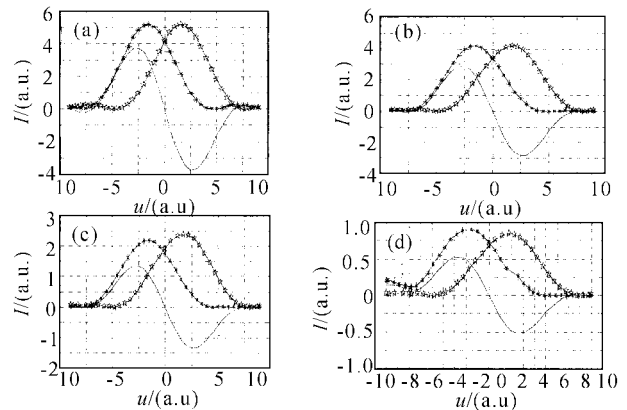


Fig. 8 Experimental diagrams of differential slopes confocal microscope. (a) 0° ; (b) 10° ; (c) 15° ; (d) 18°

利用上述差动共焦系统的测量信号过零点不变的特点，将该零点作为测量瞄准信号，用本课题组自

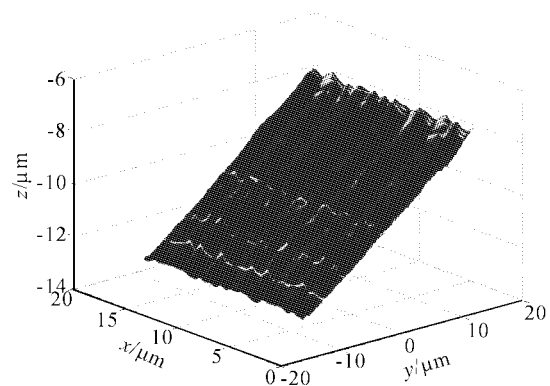


Fig. 9 Slope measurement of a angle block gauge of 10°

行研制的电容传感器作位置监测,对倾斜角为 10° 的块规的倾斜表面轮廓进行测量,得到图9所示的表面轮廓图。

用于位移监测的电容传感器的分辨率小于20 nm,块规的表面形貌的是由电容传感器的读数给出的,测得的块规的表面形貌的分辨率与电容位移传感器具有相同的量级。

结论 用基尔霍夫公式对在测量表面法线与共焦测量光轴有一定夹角的情况下的共焦显微镜的轴向响应进行理论分析得到了共焦显微镜轴向响应随测量表面倾角变化的数学模型。利用该模型对差动共焦测量系统的测量信号进行了分析,给出了测量信号的数学表达式。对这模型进行了数值分析并对不同角度的块规进行了实测。所得出的共焦轴向特性理论模型与实测得到的曲线相符。利用差动共焦系统的测量信号的零点作为瞄准信号,对倾斜角度为 10° 的块规的倾斜表面的某一局部的表面形貌进行了测量,得到测量表面形貌图。测量倾斜表面时共焦轴向响应理论模型的建立填补了共焦显微术中的一项理论空白,为测量具有任意曲面的工程表面及研制可测量具有任意倾角的工程表面的真正意义上的三维测头奠定了理论基础。

参 考 文 献

- Jordan H J, Tizani H. Highly accurate non-contact characterization of engineering surfaces using confocal microscopy. *Meas. Sci. Technol.*, 1998, **9**(7): 1142~1151
- Wilson T. *Confocal Microscopy*. New York: Academic, 1990
- Gu Min. *Principles of Three-Dimensional Imaging in Confocal Microscopes*. Singapore: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 1996
- Wang Fusheng, Tan Jiubin, Zhao Weiqian. The optical probe using confocal technique for surface profile measurement. *Proc. SPIE*, 2000, **4222**: 194~197
- Wilson T, Calini A R. Effect of detector displacement in confocal imaging systems. *Appl. Opt.*, 1988, **27**(11): 3791~3799
- Gu M, Sheppard C J R. Effects of defocus and primary spherical aberration on three-dimensional coherent transfer functions in confocal microscopes. *Appl. Opt.*, 1992, **31**(14): 2541~2549
- Sheppard C J R, Hegedus Z S. Axial behaviour of pupil-plane filter. *J. Opt. Soc. Am. (A)*, 1988, **5**(4): 643~645
- Martinez-Corral M, Andrés P, Zapata-Rodriguez C J *et al.*. Improvement of three-dimensional resolution in confocal scanning microscopy by combination of two pupil filter. *Optik*, 1998, **107**(4): 145~148
- Wilson T, Calini T A R. Size of the detector in confocal imaging system. *Opt. Lett.*, 1987, **12**(4): 227~229
- Zapf T, Wijnacndts-van-Resandt R W. Confocal laser microscope for sub-micron structure measurement. *Microelectronic Engineering*, 1986, **5**(8): 573~577
- Mizuno T, Narui H. A pit-edge confocal push-pull tracking-error signal detection method for an optical pickup. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1999, **38**(9): 4094~4099
- Reeves M, Farrell P V, Musculus M P. Demonstration of a two-photon, confocal laser-induced fluorescence technique for the detection of nitric oxide in atmospheric pressure flows and hydrocarbon-air flames. *Meas. Sci. Technol.*, 1999, **12**: 285~294

Engineering Slope Measurement with Confocal Microscopy

Zhang Jianhuan Tan Jiubin

(Ultra-Precision Photonics and Electronics Instrument Engineering Institute,
Harbin Institute of Technology, Harbin 150001)

(Received 09 August 2002; revised 28 October 2002)

Abstract: In the case of engineering slope with confocal microscopy, the paraxial condition is not suitable. The conclusion derived from Fresnel approximation condition is not suitable for this situation. The axial response of confocal microscopy of slope measurement is first acquired with the application of Kirchhoff diffraction formula, and the axial response of confocal microscopy derived from Fresnel approximation condition is just a special case of the general module given in this paper. Meanwhile, as the detectors are arranged in a differential way, the theoretical module of measuring signal is obtained and analyzed. Some slopes with different angles are measured and a series of experimental curves are presented. With numerical calculation, the conclusion that experimental result accords with the theoretical analysis is inferred. The slope of 10° angle block gauge is profiled with resolution of 20 nanometer with the differential confocal microscopic system.

Key words: optical measurement; differential confocal microscopy; engineering slope; panting probe