

文章编号: 0253 2239(2006)09 1363 4

测量表面倾角对差动共焦瞄准信号影响分析

张建寰 周军现

(厦门大学机电工程系, 厦门 361005)

摘要: 普通共焦显微镜的轴向响应特性, 因受到被测量表面的倾斜角影响引从而起轴向响应特性变化, 而应用差动共焦光学系统对超精密加工的表面进行瞄准测量时, 差动系统的瞄准信号也受到影响, 并进而影响到测量系统对加工表面的测量精度及分辨特性。通过对差动共焦测量系统输出信号理论模型的分析得出被测量面的倾斜角变化不影响差动共焦输出信号零点位置; 倾角在一定范围内变化时不影响瞄准测量分辨力的结论, 并给出了实验分析结果。

关键词: 光学测量; 差动共焦显微镜; 瞄准信号; 分辨力

中图分类号: O432.2 文献标识码: A

Effect of Tilt Angle of Surface to be Measured on Differential Confocal Microscope Pointing Signal

Zhang Jianhuan Zhou Junxian

(Department of Mechanical and Electrical Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005)

Abstract: The axial response of conventional confocal microscope is affected by the tilt angle of the surface to be measured. When the ultra precisely machined surface is measured with pointing method based on the differential confocal microscope, the tilt angle of the surface to be measured influences the pointing signal, as well as the measuring accuracy and resolution of the treated surface. On the basis of the analysis of the theoretical model of the output signal of differential confocal microscope, it is concluded that the zero point is independent of the tilt angle of surface to be measured and the resolution of the pointing signal is not affected with the tilt angle in a certain range. The experimental results are also presented.

Key words: optical measurement; differential confocal microscope; pointing signal; resolution

1 引言

应用普通共焦显微镜原理实现对加工表面形貌的测量, 由于受到光源波动、杂散光、光电探测器及测量电路的共模噪声等因素的影响^[1~4], 其测量的分辨力只有微米量级^[5~7], 这远不能满足对超精密加工表面的测量要求。基于此, 将普通的共焦光路中的反射光路用一个 50°:50° 的分束镜分成两路, 分别用两个以差动形式连接的位于焦平面前和焦平面后的光电探测器进行接收, 以此构成了差动接收系统^[4, 8, 9], 如图 1 所示。

差动共焦光学系统的输出信号经过零点, 见图 2 所示。可利用过零点进行瞄准测量。这种差动共焦

测量系统虽然比普通共焦测量系统光路稍微复杂些, 但却消除了光源波动、入射光路中的杂散光、光电探测器及测量电路的电子噪声等。因此, 采用差动共焦光学系统开发的测量系统具有信号稳定、分辨力高、线性范围较大等优点。另外, 也可利用差动输出信号较大的线性范围进行双向线性跟踪测量^[9]。

因共焦轴向响应受被测表面的倾斜角影响^[10], 则差动共焦光路的输出信号曲线必然受被测量表面倾斜角的影响, 加之实测中光学系统光路调节、光电探测器响应特性的不一致等因素的影响, 使输出信号曲线的线性范围、信号过零点位置及过零瞄准的分辨力等发生变化, 并影响到瞄准探测的精度和

作者简介: 张建寰(1966~), 男, 黑龙江肇东市人, 厦门大学机电工程系副教授, 主要从事光电检测及超精密测量方面的研究。E-mail: aeolus@xmu.edu.cn

收稿日期: 2005 09 06; 收到修改稿日期: 2006 03 01

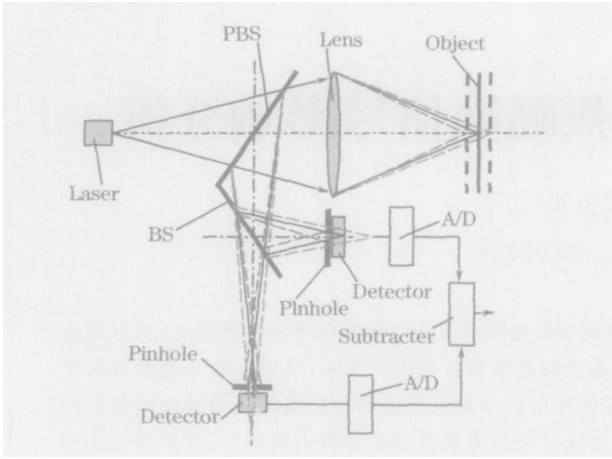


图 1 差动共焦原理图

Fig. 1 Schematic diagram of differential confocal microscope

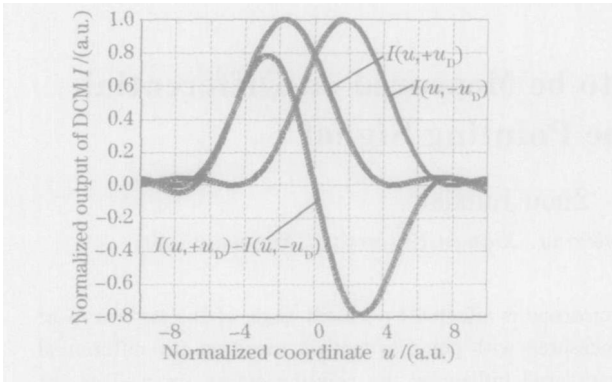


图 2 差动共焦输出信号

Fig. 2 Output signal of differential confocal microscope
分辨力。因此，研究差动共焦光学测量系统中被测
量表面倾斜角对差动共焦输出的瞄准信号的影响是
差动共焦瞄准探测技术的基础。

2 差动共焦光学测量系统输出信号模型及瞄准探测原理

2.1 差动共焦光学系统输出信号

在反射式共焦显微镜测量系统中，当被测量表面的法线与共焦光学系统的光轴有一个夹角 β 时，其轴向响应信号的数学模型经过推导为^[10]

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

式中 u, v 为归一化径向坐标， ρ 为被透镜光瞳归一化的径向坐标， d^2 为工作距离， β 为被测量表面的倾斜角度。

从图 1 所示的差动共焦光学系统的结构中可以看到，该光学系统使用了两个探测器，每个光电探测

器的输出均可用 (1) 式表示。但两个探测器不是布置在物镜的焦平面位置上，而是一个在焦平面前，一个在焦平面后。假设光路调整后离焦量同为最优值^[9]，则两个光电探测器的输出分别为^[10]

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

$$I(v = 0, u) = \left[\frac{\sin(u/4)}{u/4} \right]^2 \cos^2 \beta \times \left| \int_0^1 \frac{\rho}{d^2 + \rho^2} \exp \left[-\frac{i(u - u_D)\rho^2}{2} \right] d\rho \right|^2, \quad (3)$$

(2) 式，(3) 式中 u_D 为光电探测器的归一化离焦量^[9]。

差动共焦的输出信号是两个光电探测器输出的差，即差动共焦输出的归一化光强：

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

2.2 数值分析

对上面得到的光学系统信号模型进行数值分析，研究差动共焦输出信号的过零点位置及该处的曲线斜率变化情况。

2.2.1 轴向离焦光电探测器输出信号的数值分析

对 (2) 式、(3) 式进行数值分析，得到如图 3 所示的曲线。

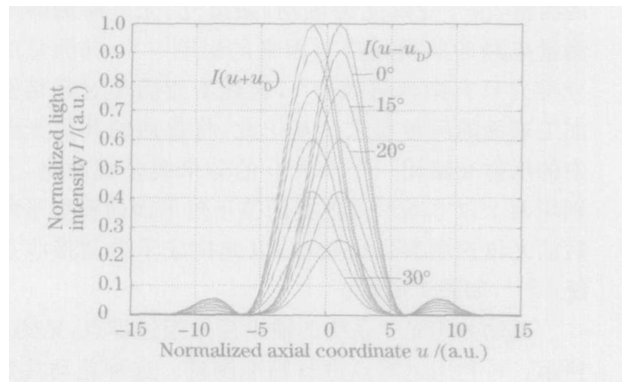


图 3 离焦时不同倾角的共焦轴向响应

Fig. 3 Confocal axial response with defocused detector in different slope angle

从图 3 可以看到两个光电探测器的输出信号随

轴向离焦量的变化曲线相对于 Y 轴分别有 $\pm u_D$ 的偏移量。输出信号的极点值随被测量表面的倾斜角的增大而变小。但每个光电探测器的轴向输出信号的半峰全宽(FWHM)不随被测表面的倾斜角变化^[10]。

2.2.2 差动共焦输出信号的数值分析

当测量表面有不同的倾斜角时(计算中取 β 分别为 0° 、 10° 、 15° 、 20° 、 25° 、 30°)，对(4)式进行数值分析，得到如图 4 所示的数值分析结果。

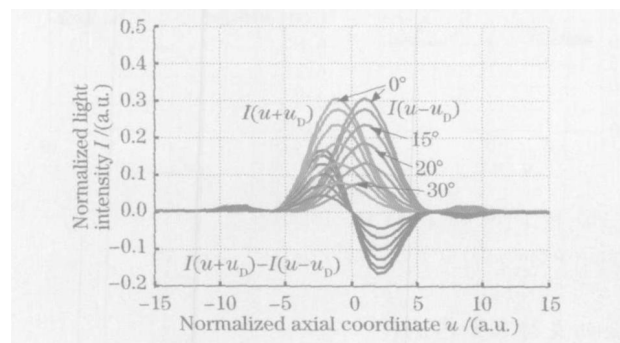


图 4 不同倾斜面的差动输出信号曲线

Fig. 4 Output of differential confocal system with different slopes

从图 4 可见，差动共焦输出信号有以下几个特点：

1) 曲线与横轴的交点不随被测量表面倾斜角的变化而变化，即被测量表面的倾斜角变化对差动共焦输出信号曲线的过零点位置没有影响；

2) 输出信号曲线在过零点处的斜率随倾角的加大而急剧变小，表明被测量表面倾角较大时，差动共焦输出信号线性段的分辨特性变差。这将直接影响到差动共焦瞄准测量的分辨力；

3) 输出信号曲线的线性段随倾角的增加而变小，即利用差动共焦输出信号曲线进行直接的线性测量的测量范围变小。

2.2.3 差动共焦瞄准探测技术的原理

上文分析表明，输出信号曲线经过零点，该点对应于光学系统中物镜的焦平面位置(两探测器的离焦量及光电响应特性相同)，以过零点作为瞄准触发信号，光学系统沿光轴方向进行扫描，当物镜焦平面经过被测表面时，差动共焦输出信号经过零点，触发记录仪记下位移传感器的位移值，继而测出表面的起伏变化。

2.2.4 差动共焦瞄准信号的分辨力

对差动共焦输出信号(4)式取一阶导数：

$$\frac{\partial I_{\text{diff}}}{\partial u} = \frac{\partial [I(u+u_D) - I(u-u_D)]}{\partial u}, \quad (5)$$

$$\Delta I(u) = \left| \int_0^1 \frac{\rho}{d^2 + \rho^2} \exp\left[-\frac{i(u+u_D)\rho^2}{2}\right] d\rho \right|^2 - \left| \int_0^1 \frac{\rho}{d^2 + \rho^2} \exp\left[-\frac{i(u-u_D)\rho^2}{2}\right] d\rho \right|^2, \quad (6)$$

$$\frac{\partial I_{\text{diff}}}{\partial u} = \left\{ \left[\frac{\sin(u/4)}{u/4} \right]^2 \cos^2 \beta \times \Delta I(u) \right\} / \partial u. \quad (7)$$

对于利用差动共焦输出信号的过零点进行过零瞄准发讯的测量技术，所关心的是零点处的分辨力。因此这里仅研究零点处的差动共焦光学系统输出信号的斜率。将原点处坐标 $u = 0$ 、最佳归一化探测器轴向离焦量 $u_D = 5.2$ ^[9] 代入(7)式，经计算

$$\frac{\partial I_{\text{diff}}}{\partial u} \Big|_{u=0, u_D=5.2} = -0.54 \times \cos^2 \beta, \quad (8)$$

对该式进行数值分析，得到图 5 所示的零点处的斜率随测量表面倾角变化的曲线。

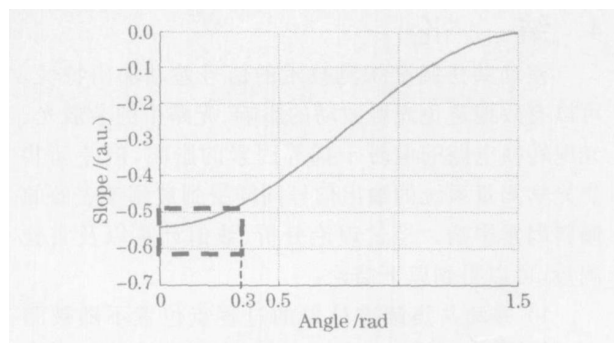


图 5 差动共焦输出曲线的零点处斜率

Fig. 5 Slope of the output curve of differential confocal microscope at zero point

由图 5 可知，零点处的斜率随测量表面倾角的余弦的平方变化，测量表面倾角不同，该点处的斜率也不同，即利用差动共焦输出信号的过零点进行光学瞄准测量的分辨力不同；零点处线性测量的分辨力最大值在倾角为 0° 处，即测量表面的法线与测量光学系统的光轴重合时，零点处斜率取得最大值，最大斜率接近于 -0.54 。从图 5 还可以看到，在测量表面倾斜角较小的一区段内(图中虚线框所括起的部分)，有一变化较为平坦的部分，倾角范围大约在 $0^\circ \sim 18^\circ$ ，其斜率的变化幅度小于 10%。由此可推知在测量精度允许的条件下，在一定角度变化范围内($-18^\circ \sim +18^\circ$)进行测量时可以不计倾角不同所引起的光学瞄准分辨力的变化。

3 实验分析

为验证倾斜被测表面对差动共焦输出信号的影响，利用所建立的实验装置用角度分别为 0° 、 10° 、

15°、18°的角规进行实验测量,得到了差动共焦输出信号曲线,如图6所示。

对实验曲线加以分析,可以发现其与理论分析结果相近。0°倾角的表面差动共焦输出曲线在零点处的斜率大约是18°倾角的2倍。实验曲线中线性

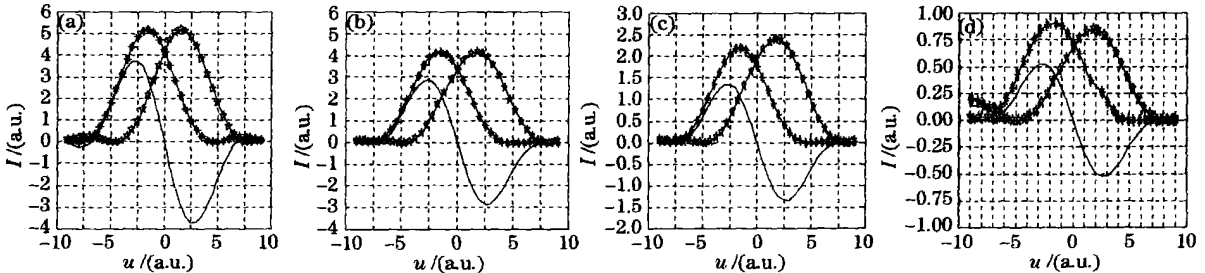


图6 差动共焦实验曲线. (a) 0°, (b) 10°, (c) 15°, (d) 18°

Fig. 6 Experimental diagram of differential confocal microscope. (a) 0°, (b) 10°, (c) 15°, (d) 18°

4 结 论

差动共焦瞄准探测技术的信号差动输出特性,可以有效地避免光源波动的影响、光路中的杂散光、光电转换电路的电磁干扰等因素的影响,但差动共焦光学测量系统的输出信号同样受到被测量表面的倾斜因素影响。经过理论分析、数值计算以及实验测量,可以得到以下结论:

1) 差动共焦瞄准信号的过零点位置不随被测表面倾角的变化而变化,因此可利用差动共焦瞄准探测技术实现对自由曲面的扫描测量;

2) 差动共焦过零瞄准点处的斜率与被测表面倾角的余弦的平方成正比,倾斜增大,斜率变小,即过零瞄准的分辨力以及利用差动共焦输出信号进行线性跟踪测量的测量分辨力随倾斜角的增大而降低(在一定精度条件下,可认为测量倾角在 $-18^\circ \sim +18^\circ$ 范围内瞄准测量分辨力不变);

3) 差动共焦输出信号的线性范围随被测量表面的倾角的增大而变小。

由于分辨力随被测量表面的倾斜角变化,因此在差动共焦瞄准测量过程中,当测量表面法线与测量光轴的夹角较大时要做相应的补偿;同样,对利用差动共焦输出信号的线性段进行线性双极性跟踪测量时,也应该考虑对分辨力随被测表面倾角变化采取补偿措施。实验结果与理论分析基本一致。

致谢 本文工作是在谭久彬教授的悉心指导下完成的,在此表示深深谢意;对厦门大学创新团队计划基

金的过零点与归一化横坐标的零点稍有偏离,这是由于光路调节时不可能将两个光电探测器的离焦量调到完全一致,而且两个光电探测器存在光电特性差异等因素引起的,这种偏移并不影响瞄准测量的精度。

金的支持表示感谢!

参 考 文 献

- 1 S. Kimura, T. Wilson. Effect of axial pinhole displacement in confocal microscopes[J]. *Appl. Opt.*, 1994, **33**(14): 2257~2261
- 2 Zhao Weiqian, Tan Jiubin, Qiu Lirong. A bipolar absolute heterodyne confocal approach to higher spatial resolution[J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(21): 5013~5021
- 3 C. J. R. Sheppard, M. Gu, M. Roy. Signal to noise ratio in confocal microscope systems[J]. *J. Microscopy*, 1992, **168**(3): 209~218
- 4 Wang Fusheng, Tan Jiubin, Zhao Weiqian. The optical probe using confocal technique for surface measurement[C]. *Proc. SPIE*, 2000, **4222**: 194~197
- 5 M. Gu. *Principles of Three Dimensional Imaging in Confocal Microscopes* [M]. Singapore: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 1996. 1~174
- 6 Zhao Weiqian, Tan Jiubin, Qiu Lirong et al.. A new laser heterodyne confocal probe for ultraprecision measurement of discontinuous contours [J]. *Measurement Science and Technology*, 2005, **16**: 497~504
- 7 C. J. R. Sheppard, H. J. Hathews. The extended focus autofocus and surface profiling techniques of confocal microscopy[J]. *J. Modern Optics*, 1988, **35**(1): 145~154 (in Chinese)
- 8 Zhao Weiqian, Qiu Lirong, Ding Xuemei et al.. An approach to expansion measurement range of heterodyne confocal microscopy system[J]. *J. Photoelectronics · Laser*, 2004, **15**(9): 1084~1087 (in Chinese)
- 9 赵维谦, 邱丽荣, 丁雪梅等. 拓展差动共焦显微系统量程范围的方法与措施[J]. *光电子·激光*, 2004, **15**(9): 1084~1087
- 10 Wang Fusheng, Tan Jiubin. Optical focus detection system with nanometer resolution using differential confocal microscopy[J]. *Optical Technique*, 2001, **27**(3): 232~234 (in Chinese)
- 11 王富生, 谭久彬. 差动共焦式纳米级光聚焦探测系统的研究[J]. *光学技术*, 2001, **27**(3): 232~234
- 12 Zhang Jianhuan, Tan Jiubin. Engineering slope measurement with confocal microscopy[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(4): 446~450 (in Chinese)
- 13 张建囊, 谭久彬. 应用共焦显微镜原理测量倾斜工程表面[J]. *光学学报*, 2003, **23**(4): 446~450