

文章编号 1004-924X(2009)03-0537-05

# 临界角法检焦系统的设计

郝贤鹏<sup>1,2</sup>, 任建岳<sup>1</sup>, 邹振书<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

**摘要:**利用临界角法检焦具有分辨力高、损失光能小、结构简单、系统调试容易的特点设计了亚微米级检焦系统。介绍了临界角法离焦检测的基本原理,通过合理假设,利用菲涅尔公式和高斯光学公式得到了离焦误差信号的计算公式。实验采用单光路临界角法,利用 He-Ne 激光器、临界角棱镜、四象限光电探测器、信号采样电路、数据采集卡等元器件组成离焦检测系统,实现离焦信号的提取;通过数字滤波、归一化处理等技术得到离焦误差信号(FES),以此获得 FES 的大小和变化趋势与离焦量的关系曲线。实验表明,临界角法探焦系统静态分辨力 $<15\text{ nm}$ 、线性范围可达 $\pm 4\text{ }\mu\text{m}$ ,满足亚微米级检焦系统的设计要求。

**关键词:**临界角法;离焦检焦;亚微米级

**中图分类号:**TH703 **文献标识码:**A

## Design of focus error detection system based on critical angle method

HAO Xian-peng<sup>1,2</sup>, REN Jian-yue<sup>1</sup>, ZOU Zhen-shu<sup>1</sup>

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*

2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100039, China*)

**Abstract:** A focus error detection system in sub-micrometer grade is designed based on critical angle method with high resolution and low light losses. The principle of defocus detection by critical angle method is introduced and the expression of defocus is deduced with Gauss optical formula based on Fresnel formula and a reasonable hypothesis. The detection system consists of He-Ne laser, critical angle prism, four-element photodetector, signal sampling circuit and data acquisition card, etc., the error of defocus is detected by single light path critical-angle method. Moreover, a digital filter and the normalization technology are used to extract the Focus Error Signal(FES) to obtain the defocus curve. Experimental results indicate that the focus resolution is less than 15 nm and static linearity range is  $\pm 4\text{ }\mu\text{m}$ , which satisfies the focus error detection system requirements in sub-micrometer grade and provides references for engineering application of focus error detection system with critical-angle method.

**Key words:** critical-angle method; focus error detecting; sub-micrometer grade

收稿日期:2008-02-15;修订日期:2008-02-28.

基金项目:国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. 863-2-5-1-13B)

## 1 引言

测量精密、超精密加工工件表面形貌特征参数的仪器主要分为接触式和非接触式两大类。传统的机械触针式测量具有稳定、可靠、测量动态范围大等优点,但由于是接触式测量,存在易划伤被测表面、测头磨损及不能测量较软质材料等局限性。而非接触式形貌测量方法可实现对表面形貌的无损测量和评定,并且还有助于高精度快速测量,因此受到了人们的广泛重视和普遍应用。目前的非接触式形貌测量方法所依据的原理主要是光、声、电或是其中两种的结合,其中几何光学方法在非接触式形貌测量中的应用最为广泛。常用的非接触式光探针离焦检测方法有临界角法、像散法、准直小孔调焦法等。像散法分辨力高,但动态范围很小、装调困难;小孔调焦法结构简单,动态范围适中,但动态分辨力低;而临界角法具有分辨力较高、损失光能小、动态范围适中、结构简单、调试相对容易等优点,是亚微米级检焦技术的一种常用的方法,广泛应用于表面形貌测量、激光直写设备等方面<sup>[1-3]</sup>。

离焦信号检测的基本原理是:当聚焦光斑偏离工件表面(即离焦)时,离焦检测系统通过检焦光路把离焦量进行放大,并利用光电探测器件把光强大小转换为输出电信号的变化,通过对光电探测器输出的信号做进一步处理,得到离焦量的值即被测表面的形貌信息。本文介绍了临界角法离焦检测的基本原理,利用光电二极管作为光电探测器件输出离焦误差信号,经过处理调节压电陶瓷驱动调节聚焦物镜,使聚焦光点始终聚焦在被测表面上,从而得到被测表面形貌特征。

## 2 临界角法离焦检测原理

当光从一种媒质向另一种媒质传播时,在界面上产生反射和折射,其反射率随入射角的变化而变化,这种变化关系可由 Fresnel 公式给出<sup>[4-5]</sup>:

$$R_p = \frac{n_2 \cos \theta_i - n_1 \cos \theta_t}{n_2 \cos \theta_i + n_1 \cos \theta_t}, \quad (1)$$

$$R_s = \frac{n_1 \cos \theta_i - n_2 \cos \theta_t}{n_1 \cos \theta_i + n_2 \cos \theta_t}, \quad (2)$$

$n_1$ 、 $n_2$  是两种介质的折射率, $\theta_i$ 、 $\theta_t$  分别是入射角和折射角。

当  $n_2 > n_1$ , 光从光密介质向光疏介质传播,若  $\theta_i \geq \bar{\theta}_i$  ( $\bar{\theta}_i = \sin^{-1}(\frac{n_1}{n_2})$ , 称为临界角), 将发生全反射。当  $\theta_i < \bar{\theta}_i$  时, 其反射系数陡峭下降(见图 1)。其中, 图 1 中 S 光与 P 光分别代表入射光在垂直入射面和平行入射面方向的光振动。

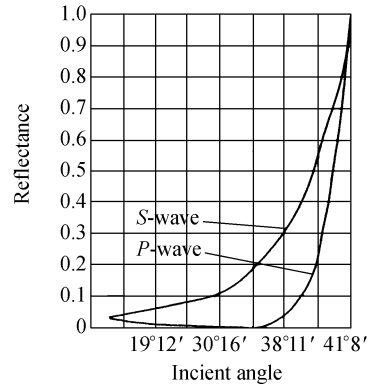


图 1 强度反射系数

Fig. 1 Intensities of reflection coefficients

临界角探焦技术正是基于这一特性,图 2 表明了临界角探焦技术的原理。当工作面处于透镜聚焦平面上(B 点)时,反射光线经透镜后,平行出射,四象限探测器输出的离焦误差信号为零;而当偏离焦平面(A 点或 C 点)时,以发散或会聚光束出射,从临界角棱镜输出的光强产生了差别,因此四象限探测器输出的信号不为零,这样便可检测出离焦误差信号。

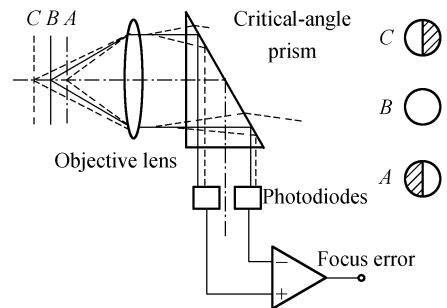


图 2 临界角探焦原理

Fig. 2 Principle of critical-angle focus error detection

为了得到临界角离焦误差信号表达式,必须采用一些合理假设:

(1) 会聚透镜为衍射受限系统;

(2) 反射光线满足严格几何光学条件。

图 3 为简化的反射光线光路图,定义  $\delta$  为离焦量; $f'$  为透镜焦距; $NA$  为数值孔径; $I'$  为像距; $\rho \in [0, 1]$ 。由菲涅尔公式和高斯光学公式得到离焦误差信号表达式为<sup>[6]</sup>:

$$FES = 1/2 \int_0^{\pi/2} \int_0^1 P_m \rho d\rho d\varphi, \quad (3)$$

式中,

$$P_m = \sqrt{2NA \cdot \rho \cdot \cos \Psi / (nf')} H_m - NA \cdot \rho \cdot \delta \cos \Psi / (nf') (H_m)^2$$

其中  $H_m = 4n^2 / (n^2 - 1) / 4$ 。

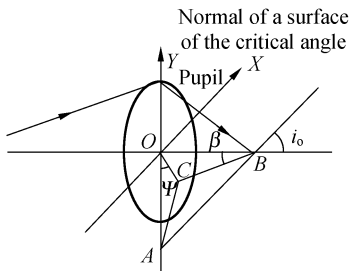


图 3 反射光线原理图

Fig. 3 Principle diagram of reflection beam

镜转向,经过 1/4 波片后通过物镜聚焦在检测面上,反射光再次通过 1/4 波片后,偏振方向改变 90°,透过偏振分光棱镜入射至临界角棱镜内,光线在临界角棱镜内经 3 次反射后进入光电探测器转换为微小电信号,进入到调焦控制单元。调焦控制单元主要由 FDC(焦点位移控制模块),FPI(焦点探测模块),FPM(信号预处理模块),FSP(调焦信号处理模块),FAM(调焦驱动模块)等组成,如图 5 所示。经调焦信号预处理模块(包括滤波、增益控制电路等)处理后的离焦误差信号通过

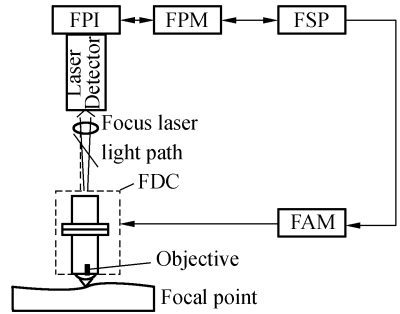


图 5 调焦控制单元框图

Fig. 5 Block diagram of focus control system

### 3 实验系统设计

系统采用单光路临界角法,由于临界角法中利用 P 光检测有利于提高离焦检测的灵敏度及光学增益,故本系统采用 P 光检测,系统框图如图 4 所示,整个实验均在气浮平台上进行。

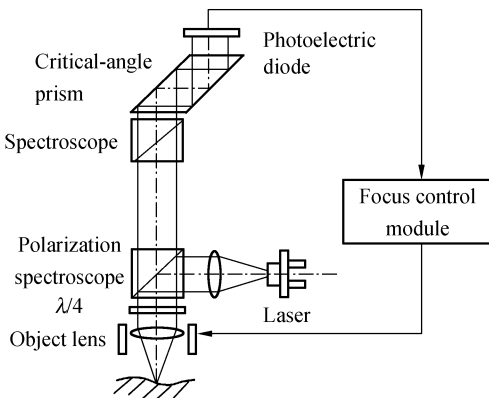


图 4 临界角法离焦检测系统原理图

Fig. 4 Principle diagram of focus error detection system with critical-angle method

He-Ne 激光器发射的激光束经偏振分光棱

数据采集卡转化为数字量进入计算机。计算机所采集到的信号不仅仅包括检测面的粗糙度等有用信息,还包括机械轴系晃动、电机的抖动及电噪声等干扰信号,而离焦误差信号在高频和低频部分均含有有用信息。传统的滤波方式采用不变的滤波阈值,常常把低频或高频中的有用信息丢失或歪曲,这就大大影响了离焦误差信号的精度。本文将小波包分析技术应用到离焦误差信号的提取当中,既可对低频部分进行分解,又可对高频部分进行分解,这样既可滤除各种噪声又可避免有用信息的丢失。为消除光强波动对测量结果的影响,本文还对分离出的离焦误差信号进行了归一化处理。这些方法的应用提高了离焦误差信号的精度和系统的抗干扰能力,保证了系统的稳定性。将经过信号处理模块后所得到的离焦量经 D/A 卡反馈到调焦驱动模块,通过焦点位移控制模块调整物面距离,使激光精确地聚焦在检测面上<sup>[7-8]</sup>。

实验中,选用  $NA=0.42$ 、 $f=12\text{ mm}$  的物镜,焦点位移控制模块选用压电陶瓷作为微位移调整器件,该器件带有电容式微位移传感器,能有效地

保证微位移精度,并且可通过计算机直接进行控制。位移量与 FES 的关系曲线如图 6 所示。

由图 6 可以看 FES 约在  $6\ \mu\text{m}$  时等于 0,曲线在  $10\ \mu\text{m}$  时出现拐点。最大线性范围为  $\pm 4\ \mu\text{m}$ ,其静态离焦检测精度优于  $15\ \text{nm}$ 。

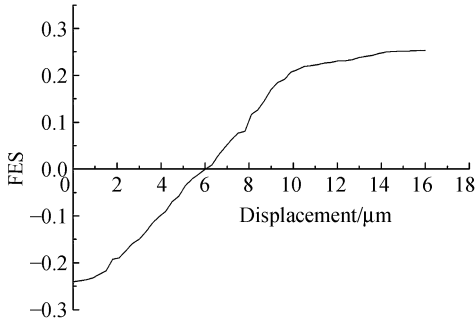


图 6 位移量与 FES 关系

Fig. 6 Relationship between FES and displacement

#### 参考文献:

- [1] HUANG P S, NI J. Angle measurement based on the internal-reflection effect using elongated critical-angle prisms[J]. *Applied Optics*, 1996, 35(13): 2239-2241.
- [2] 梁嵘,李达成,曹芒,等.表面微观形貌测量及其参数评定的发展趋势[J]. *光学技术*, 1998, 6(11): 66-68.
- LIANG ZH, LI D CH, CAO M, *et al.*. Measurement and characterization tendency of the surface micro-topography[J]. *Optical Technology*, 1998, 6(11): 66-68. (in Chinese)
- [3] 杨春兰,浦昭邦,赵辉.几何光探针法在表面形貌测量中的应用[J]. *激光杂志*, 2000, 21(6): 1-4.
- YANG CH L, PU ZH B, ZHAO H. Applications of geometrical optical stylus technologies in surface topography measurement[J]. *Laser Journal*, 2000, 21(6): 1-4. (in Chinese)
- [4] 冯晓国,孙连春.临界角法探焦静态特性实验研究[J]. *计量技术*, 2005(3): 3-5.
- FENG X G, SUN L CH. Static characteristic experimental research of detecting focus by critical angle[J]. *Measurement Technique*, 2005(3): 3-5. (in

## 4 结 论

临界角法是一种高精度、实时性好、装调容易、能够进行动态检焦的检焦方法,广泛适用于大表面形貌检测、激光直写设备等系统中。本文所提出的临界角法离焦检测系统,不仅可用于平面离焦检测系统,也可用于曲面离焦检测系统。实验表明,采用单光路 P 光临界角法检焦实验系统最大线性范围为  $\pm 4\ \mu\text{m}$ ,其静态离焦检测精度优于  $15\ \text{nm}$ 。另外,理论上讲,临界角法的离焦探测的线性范围和精度还可以提高,但这就增大了探测器的装调以及信号探测处理的难度,成本也将大幅度提高。在实际工作中为消除信号的畸变分量,降低被测面反射率和倾斜变化的影响常常采用双光路差动临界角法。

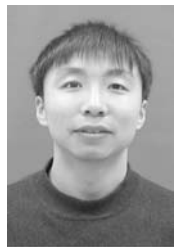
Chinese)

- [5] 侯澍.像差在临界角方法探焦技术中的影响[J]. *光学精密工程*, 1998, 6(1): 122-126.
- HOU SH. The influence of aberration on measuring sensitivity in critical-angle method of total reflection for focus error detection[J]. *Opt. Precision Eng.*, 1998, 6(1): 122-126. (in Chinese)
- [6] 陈海清,常海燕,阮玉.关于临界角法菲涅耳公式简化理论处理的新方法[J]. *光子学报*, 1995, 24(6): 551-555.
- CHEN H Q, CHANG H Y, RUAN Y. The new method of a simplified processes of fresnel formula for the method of critical angle[J]. *Acta Photonica Sinica*, 1995, 24(6): 551-555. (in Chinese)
- [7] 熊木地,肖文礼,邢忠宝.激光直写设备调焦伺服控制系统的研究[J]. *光学精密工程*, 2000, 8(1): 79-82.
- XIONG M D, XIAO W L, XING ZH B. Focussing-servo system of laser direct writing device[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2000, 8(1): 79-82. (in Chinese)
- [8] 孙立宁,孙绍云,曲东升,等.基于 PZT 的微驱动定位系统及控制方法的研究[J]. *光学精密工程*, 2004, 12(1): 55-59.

SUN L N, SUN SH Y, QU D SH, *et al.*. Micro-drive positioning system based on PZT and its con-

trol [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004, 12(1):55-59. (in Chinese)

#### 作者简介:



郝贤鹏(1979—),男,黑龙江尚志人,中科院长春光学精密机械与物理研究所博士研究生,主要从事空间遥感成像系统设计、精密智能仪器设计、数字信号处理技术等方面的研究。E-mail: haoxp@ciomp. ac. cn

#### 导师简介:



任建岳(1952—),男,吉林长春人,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所研究员,博士生导师,主要从事大型光学精密仪器、空间光学光机电系统等方面的研究。E-mail: Renjy@ciomp. ac. cn

邹振书(1942—),男,山东龙口人,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所副研究员,主要从事光学信息处理、激光技术、全息及干涉计量等方面的研究。

(本栏目编辑:严寒)

#### ●下期预告

## 外部导入激光的积分球辐射源研制和特性研究

徐秋云,郑小兵,李健军,张 伟

(中国科学院 安徽光学精密机械研究所 遥感室,安徽 合肥 230031)

为了满足近年来迅速发展的光谱辐射遥感器的定标需求,研制了一种新型的外部导入激光的积分球辐射源。这种积分球辐射源不仅完全满足辐亮度响应度定标对定标光源的要求,而且可以对高光谱、超光谱仪器的光谱辐射响应度进行精细扫描。首先导入单波长激光对积分球辐射源的基本辐射特性进行了研究。测试结果表明,这种新型的积分球辐射源的辐亮度非稳定性在0.5 h内为0.09%;平面非均匀性在积分球出口中心 $\Phi 63$  mm范围内为0.16%; $\pm 22^\circ$ 范围内在水平面内和垂直面内的角度非均匀性分别为1.8%和0.7%。由于其具有光谱辐通量高、单色性好、波长准确性高、可宽波段调谐等优点,有着广泛的应用前景。