

像散法离焦检测系统的分析与校准

陈力 王军华 徐敏

复旦大学光科学与工程系上海超精密光学制造工程技术研究中心, 上海 200438

摘要 离焦检测技术的研究是光学加工与检测行业的一项重要课题。像散法由于操作简单、灵敏度高等优点,被广泛应用于离焦检测技术中。然而,基于像散法的离焦检测系统设计有待完善。基于像散法的基本理论,综合考虑系统像面光斑大小合理性和光学元件可加工性等因素对像散离焦检测系统进行灵敏度分析。设置合适的参数,并使用光学设计软件 Zemax 对光学元件几何参数进行优化。为了计算实际光斑的能量非均匀与非标准椭圆的性质带来的误差,采用 MATLAB 对该系统进行光线追迹。根据光线追迹的结果,完成对零信号像面的校准工作,提高了测量精度。

关键词 测量;离焦检测;像散法;光线追迹

中图分类号 O435.1 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP53.051205

Analysis and Calibration of Defocus Detection System Based on Astigmatism Method

Chen Li Wang Junhua Xu Min

Shanghai Ultra-Precision Optical Manufacturing Engineering Center, Department of Optical Science and Engineering, Fudan University, Shanghai 200438, China

Abstract Research on defocus detection is an important issue in optical manufacture and testing. Astigmatism method is widely applied in the defocus detection due to the advantages of simple operation and high sensitivity. However, the design of defocus detection system based on astigmatism method is under improvement. The sensitivity analysis of the measurement system based on the basic theory of astigmatism method is carried on considering factors such as system components machinability and spot size rationality. The suitable parameters are determined and geometric parameters of optical components are optimized by the optical design software Zemax. The MATLAB is used for ray tracing to calculate the error caused by facular energy heterogeneity and non-standard elliptic property. Calibration of image plane with zero signal has been completed and the accuracy of measurement has been improved.

Key words measurement; defocus detection; astigmatism method; ray tracing

OCIS codes 120.4290; 120.4820; 220.1010; 080.2720

1 引言

在激光直写、光存储、聚焦伺服技术等领域^[1-3],为了保证系统的工作质量,对工作距离的非接触式实时精确检测是必不可少的。将工作距离的变化转换为离焦量的检测是较为普遍的一种方式。现有的离焦检测方法有临界角法^[4-5]、像散法^[6-7]、共焦法^[8-9]等,其中像散法由于具有操作简单与测量精度高等优点,已经成为被广泛使用的离焦检测方法。像散离焦检测技术基本原理是当工件表面偏离系统前焦点时,由于像散元

收稿日期: 2015-11-23; **收到修改稿日期:** 2015-12-29; **网络出版日期:** 2016-03-30

基金项目: 国家科技重大专项(2011ZX02402)

作者简介: 陈力(1991-),男,硕士研究生,主要从事光学设计与光电测量方面的研究。

E-mail: 14210720010@fudan.edu.cn

导师简介: 徐敏(1959-),男,研究员,博士生导师,主要从事光学设计、先进光学制造与光电测量等方面的研究。

E-mail: minx@fudan.edu.cn(通信联系人)

件的存在,失配的位置关系导致光束投射到探测器表面上的光斑发生非对称的变化。通过光电探测器将光斑的能量信息转换为电信号输出,进而对输出信号的分析反解出离焦的大小。国内外关于像散法离焦检测技术的研究已经取得了一定的成绩。2003年,西安光学精密机械研究所的贺锋涛等^[6]用像散法对微位移进行实时测量,该系统的测量分辨率优于17 nm。2009年,Rhee H G^[10]在激光直写机中采用两个柱面透镜设计的离焦检测系统,在 $\pm 50 \mu\text{m}$ 的调焦范围内测量分辨率达 $0.1 \mu\text{m}$ 。2012年,合肥工业大学的Li Y等^[11]以像散法为基础设计的高精度微位移系统,分辨率为 $0.1 \mu\text{m}$ 。

然而,像散离焦检测系统的设计在参数选定与系统校准等方面仍需要进一步完善。例如,文献[3]中分析了物镜焦距的影响,并指出测量线性范围可达到 $2 \mu\text{m}$ 。基于该文献给出的参数,可以计算得到其像面光斑大小为 $20 \mu\text{m}$ 左右。一般在像散离焦检测系统中采用的四象限探测器最小尺寸在1 mm左右,并且各象限之间存在间隙,且间隙范围保持在几十微米的量级。故使用四象限探测器探测 $20 \mu\text{m}$ 左右大小的光斑是不切实际的,并且截至目前对于如此小的尺寸也未见相关报道提出可替代的光电探测器。因此为了提高测量灵敏度,盲目优化参数大小而忽略实际可行性是一种不可取的设计方式。传统的像散法理论得到的信号响应曲线是基于像面光斑能量分布均匀与光斑形状规则两个基本假设之上的,由上述两条假设给测量结果带来的误差并未见相关的报道分析。因此,本文基于像散法的基本理论,对像散离焦检测系统进行灵敏度分析,并使用光线追迹手段完成对误差的分析与消除。

2 像散法基本理论

像散法离焦检测系统中的像散透镜使轴向旋转对称的光束会聚到探测器上形成的探测光斑呈近似椭圆形的分布。当工件表面从不同的方向偏离系统前焦点时,探测光斑的分布会发生非对称的变化。柱面透镜是一种应用较为广泛的像散透镜,光束经过柱面透镜后在不同的人射平面内,成像过程有所差异。如图1所示,柱面透镜存在两个特殊的人射平面,其中入射平面1内的剖面与凸透镜的剖面相同,对这个平面内的光线有会聚作用。另外在与之垂直的入射平面2内,剖面与平行平板的剖面相同,对光线无会聚作用。

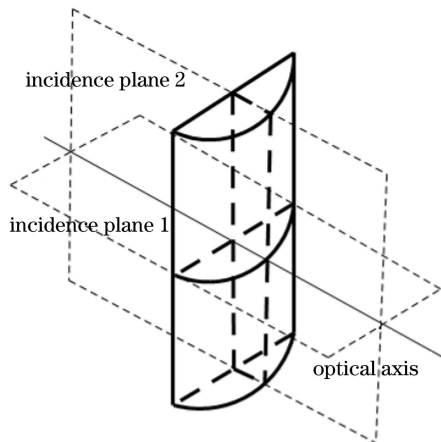


图1 柱面透镜示意图

Fig. 1 Schematic diagram of cylindrical lens

像散法采用了四象限光电探测器(QD)将光信号转换为电信号,该探测器由4个性能完全相同的光电二极管按照直角坐标要求排列而成,分别记录4个象限光强的信息。像平面与前焦点位置存在某一特定关系时,可使得正焦时像平面处的光斑形状为正圆,此时4个象限的光强大小相等。当工件表面偏离前焦点位置时,即存在离焦,则像平面上的光斑变为椭圆形。将第一、三象限与第二、四象限之间的差动信号经过滤波和放大等处理后得到信号值,进而根据系统信号曲线求得离焦大小。显然,正焦时,差动信号的大小为零;存在前后离焦时,差动信号的大小不为零,且信号的正负代表着不同方向的离焦。像散法离焦检测系统如图2所示,圆透镜 L_1 的焦距为 f_1 ;柱面透镜 L_2 的焦距为 f_2 ; l , d 和 w 依次表示物镜与工件表面的距离、物镜与柱面透镜的距离、柱面透镜与像平面的距离。

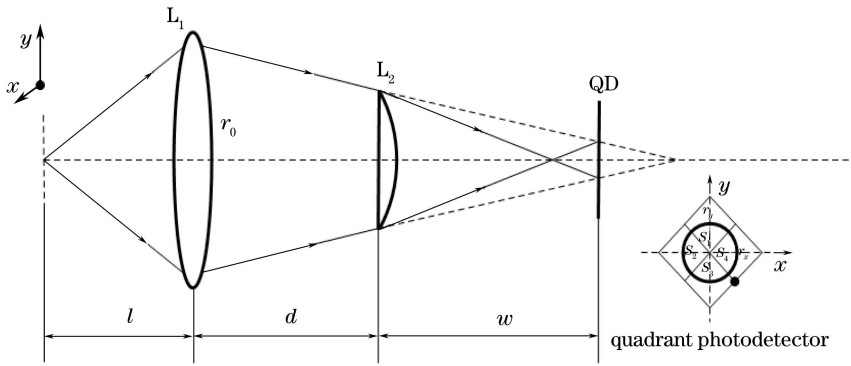


图2 像散法离焦检测光学系统

Fig. 2 Optical system based on astigmatic method for defocusing detection

根据几何光学理论,有如下关系式^[6]:

$$r_x = r_0 \left[1 - \frac{d(l-f_1)}{lf_1} \right] \left[1 - \frac{w(l-f_1)}{lf_1 - ld + f_1d} \right], \quad (1)$$

$$r_y = r_0 \left[1 - \frac{d(l-f_1)}{lf_1} \right] \left[\frac{w}{f_2} - 1 + \frac{w(l-f_1)}{lf_1 - ld + f_1d} \right]. \quad (2)$$

式中 r_x 和 r_y 分别为探测面上椭圆形光斑的半轴大小, r_0 为入瞳半径。正焦时,为了在像平面处得到圆形的探测光斑,即 $r_x = r_y$,可计算得到参数 l 与参数 w 须满足关系:

$$w[lf_1 + (2f_2 - d)(l - f_1)] = 2f_2(ld - f_1d). \quad (3)$$

现作如下两条假设,首先入射总能量为 $I_0 = k_0 \pi r_0^2$,其中 k_0 为一常数,所有能量均能被探测器吸收。其次,像平面上光斑能量呈均匀分布,即能量大小与面积成正比。基于以上两条假设,可得输出信号:

$$P_s = Ck_0 r_0^2 \left(\pi - 4 \arcsin \frac{|r_x|}{\sqrt{r_x^2 + r_y^2}} \right), \quad (4)$$

式中 C 为探测器响应系数。

从(4)式中不难看出,当 $|r_x| > |r_y|$ 时, $P_s < 0$; 当 $|r_x| < |r_y|$ 时, $P_s > 0$; 当 $|r_x| = |r_y|$ 时, $P_s = 0$ 。当系统存在不同程度的离焦时,四象限探测器差动信号的大小将随着离焦的变化而变化。由此可建立以离焦量为横坐标,信号大小为纵坐标的直角坐标系,绘制系统信号曲线。实际测量过程中,根据信号的大小对比信号响应曲线,即可完成对离焦量的检测。

3 像散法系统的应用与分析

像散法离焦检测系统主要的应用场合是对微小尺寸的精密测量,如振动量的实时监控和表面形貌的检测等。如图3所示,该图是一套基于像散法的表面形貌检测系统的光路图。由激光器(LD)出射的光束经过

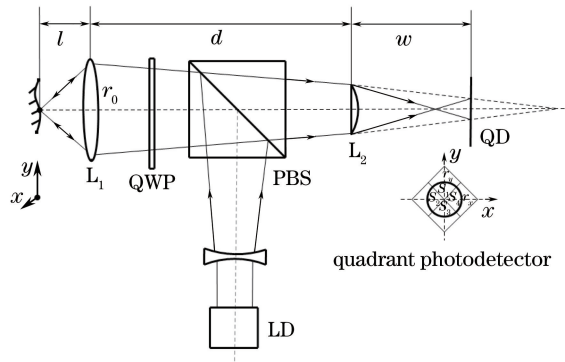


图3 基于像散法的表面形貌检测的测量系统

Fig. 3 Measurement system based on astigmatism method for surface morphology detection

偏振分光棱镜(PBS)成为 S 偏振光,得到的 S 偏振光由工件表面反射。光束由于两次经过四分之一波片(QWP),偏振方向将偏转 90° 成为 P 偏振光,顺利透过偏振分光棱镜,然后经像散透镜 L_2 投射在四象限探测器(QD)上。根据离焦的大小推算被测工件的表面高度,配备机械横向扫描的方式可完成对物体表面微形貌的测量。该表面形貌测量系统的主要部分即为前面所叙述的像散法离焦检测系统。后续对离焦检测系统的参数分析和校准等工作均是来自于该测量系统的设计。

经多次尝试并综合考虑灵敏度大小和实际可行性等因素,设定检测系统目标参数如下: $f_1 = 6 \text{ mm}$, $f_2 = 18 \text{ mm}$, $d = 150 \text{ mm}$, $\omega = 22 \text{ mm}$, $r_0 = 6 \text{ mm}$,且正焦时光斑直径为 2 mm 。根据像散法离焦检测基本理论,理想信号响应曲线如图 4 所示。在绘制曲线的过程中为了消除由探测器响应系数 C 与常数 k_0 引起信号曲线的变动,已对信号采取无量纲标准化操作。

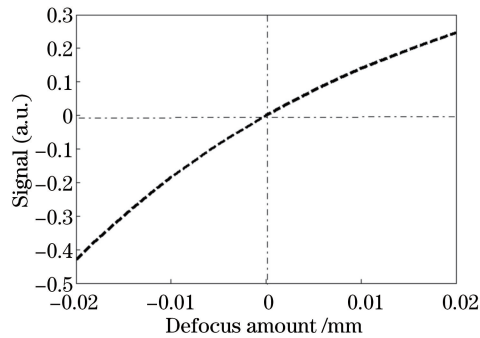


图 4 理想响应曲线

Fig. 4 Ideal response curve

对于一套离焦检测系统,在其后端信号采样与处理方式一定的情况下,系统测量分辨率的大小主要依赖于系统信号曲线的灵敏度。测量灵敏度受到系统参数的影响,然而,盲目改变参数提高灵敏度的方式是不可取的。需要在分析的同时综合考虑系统设计的可行性,其中像面光斑大小与光学元件加工难度是较重要的两个因素。例如,一般情况下灵敏度与探测光斑的大小成反比,但是目前可用四象限探测器的受光面直径范围从一毫米到十几毫米不等。直径过小的光斑可能造成探测器无法有效探测到信号,且对系统的装配精度要求较高,导致系统的测量误差较大。

在灵敏度分析的过程中,若各参数定义域未知,则难以定量分析灵敏度的变化趋势。将上述目标参数的大小设为讨论范围的参考点,以方便计算与进行图形的直观表示。为了实现灵敏度的量化,将差动信号的大小(已标准化)对于离焦量的导数表示此时测量灵敏度的相对大小。显然对不同大小的离焦量,导数的大小是不同的。考虑到离焦检测系统一般是实现对微小位移的测量,则可用正焦时的导数来表征灵敏度的大小。改变某一参数的大小,保持其他参数不变,给出灵敏度大小与探测光斑大小的变化曲线,结果如图 5 所示。

从图 5 中可以看到测量灵敏度随着 f_1 和 ω 的增加而下降,随着 f_2 和 d 的增加而上升。在观察灵敏度变化趋势的同时,计算了正焦时像面光斑的半径。经分析发现不同参数对于像面光斑大小与光学元件加工难度这两个因素的敏感程度是不同的。下面分别从以上两个制约因素对结果进行分析:

1) 曲线如图 5(a)所示,随着物镜的焦距 f_1 从 4 mm 变化至 8 mm ,像面光斑的半径保持在 1.0041 mm 左右,基本无变化。因此物镜的焦距 f_1 不受像面光斑大小的约束,但是显然对于口径为 12 mm 、焦距为 4 mm 的透镜加工是比较困难的。故当物镜口径一定时,物镜的焦距受到加工难度的限制。

2) 以下几个参数的变化会在提高测量灵敏度的同时,使得光斑的尺寸急剧减小。如图 5(b)所示,物镜与柱面透镜的距离 d 从 100 mm 增加至 200 mm ,光斑半径从 1.3248 mm 降至 0.8085 mm 。如图 5(c)所示,随着柱面透镜焦距 f_2 的增加,由 16 mm 增加至 20 mm ,光斑的半径从 1.3176 mm 降至 0.8112 mm 。如图 5(d)所示,对于柱面透镜与像平面的距离 ω 的影响,随着 ω 的减小,由 24 mm 减小到 20 mm ,光斑半径由 1.2973 mm 降至 0.7692 mm 。因此对于这几个参数的大小选择,应优先考虑到光斑的大小限制,避免出现盲目提高灵敏度,导致光斑尺寸过小的情况。

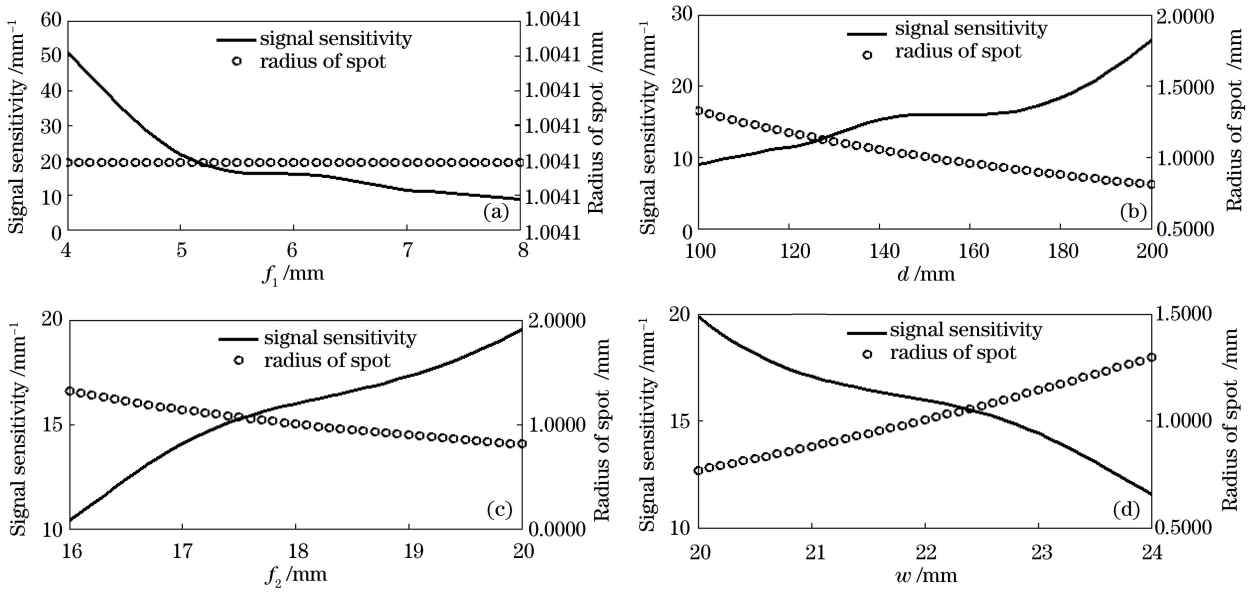


图 5 不同参数对测量灵敏度和光斑大小的影响。(a) f_1 ; (b) d ; (c) f_2 ; (d) w

Fig. 5 Influence of different parameters on measurement sensitivity and radius of light spot. (a) f_1 ; (b) d ; (c) f_2 ; (d) w

4 像散法系统的校准

以所给出的各元件目标参数为基础,采用光学设计软件 Zemax 对该系统光学元件的几何参数进行优化。设计结果显示当 $l=6.1795$ mm 时,在距离柱面透镜第二个表面 21.2269 mm 处有 $r_x=r_y=1.017$ mm。该光学系统像面上光斑能量分布如图 6 所示。其中,图 6(a)为正焦时像面的光斑能量分布,图 6(b)和图 6(c)分别为前后离焦时像面的光斑能量分布。

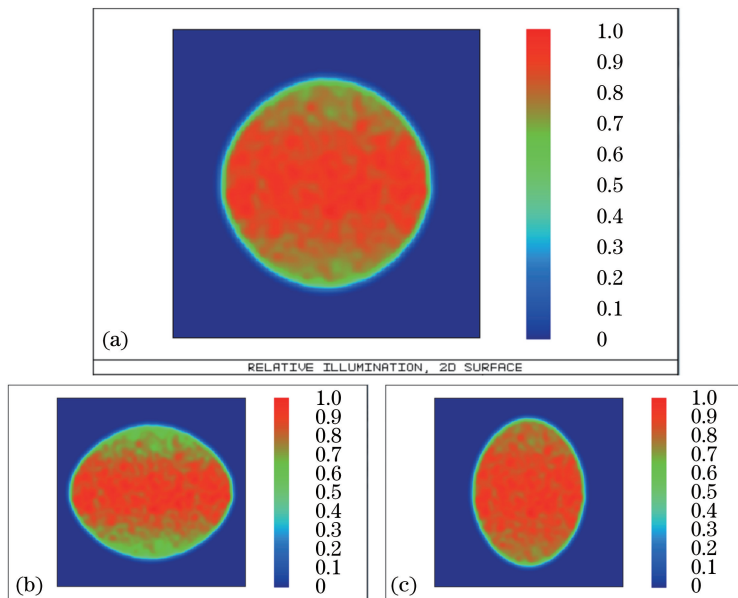


图 6 不同状态下光斑能量分布图。(a) 正焦; (b) 向前离焦; (c) 向后离焦

Fig. 6 Light spot energy distribution in different states. (a) Focus; (b) forward defocus; (c) backward defocus

从光斑能量分布图中发现,首先光斑并非十分均匀,按像散理论利用面积的大小表征光斑各区域能量的相对大小并不精确。再者,正焦时光斑显然并不为完美的圆形光斑;当存在离焦时,光斑也并不是标准的椭圆形光斑。像散理论将光斑视为标准的椭圆形均匀光斑将对测量结果带来多大的误差难以估测。

根据优化结果,使得两垂直入射平面的半轴大小相等的探测像平面位于距离柱面透镜后表面

21.2269 mm处。采用数值分析软件 MATLAB 对该像散离焦检测系统进行光线追迹,每次参与追迹的光线不少于 25000 条。实际信号曲线与理想信号曲线如图 7 所示,当无离焦时,显然差动信号的大小不为零。若依照理想系统信号曲线计算离焦的大小,对正焦位置的判断将造成约 $2.5 \mu\text{m}$ 左右的误差。

像散法离焦检测系统一般用于对微小位移的精密测量, $2.5 \mu\text{m}$ 的系统误差给整个装置的测量效果带来的影响无疑是巨大的。为了消除该误差,需要对像散离焦检测系统的零信号像面的位置进行校准。由于实际像散离焦检测系统无法与理想的系统完全匹配,无法完成对整个测量范围的校准,而校准零信号像面的位置必然可以提高对微小位移的整体测量精度。可采取的方法是移动像面的位置,使得零信号像面的位置得到校正,其实质是利用像面的位置变化来补偿由于光斑能量不均和形状不规则带来的误差。该校准过程同样可以使用光线追迹的方法来完成对实际情况的模拟。根据光线追迹的结果,可以得到四象限探测器信号为零的像面在距离柱面透镜后表面 21.6847 mm 处。

由于光斑的能量分布不均匀性及光斑形状的不规则性,导致由判据 $r_x = r_y$ 得到的零信号像面与实际系统的零信号像面的位置之间存在 0.4578 mm 的偏差。当零信号像面得到校正后,该离焦检测系统的响应曲线如图 8 所示。通过对理想响应曲线与实际响应曲线的对比发现,该校准工作消除了校准前约 $2.5 \mu\text{m}$ 的系统误差,有效地提高了系统的测量精度。

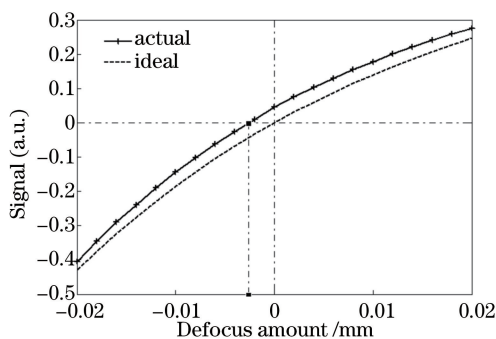


图 7 理想与实际情况下的信号曲线

Fig. 7 Signal curves in ideal and actual conditions

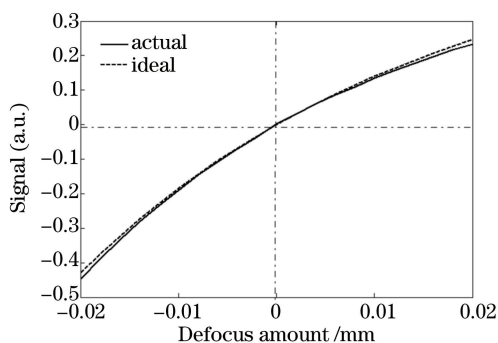


图 8 修正后离焦检测系统的信号变化曲线

Fig. 8 Signal curves of revised defocus detection system

5 结 论

阐述了像散离焦检测技术基本原理。在考虑系统实际可行性的情况下,讨论了各参数对灵敏度的影响。设置合理的系统参数,根据这些参数的大小完成光学元件的几何参数优化。为了计算由实际光斑能量分布的非均匀性与光斑形状的不规则性带来的影响,使用 MATLAB 对实际光学系统进行光线追迹。根据实际信号的变化调整像面的位置,完成零信号像面的校准工作,给出校准后离焦检测系统的响应曲线。相比传统的设计方法有较大的改进。参数的设计方面,在提高灵敏度的同时,考虑了实际系统的可行性,而不是未设定约束条件就对系统参数进行盲目地优化。基于实际系统的光线追迹结果,完成对零信号像面的校准,提高系统的测量精度。

参 考 文 献

- Liang Yiyong, Yang Guoguang, Sun Rong. Research on focusing system characteristics and defocusing application in laser direct writer[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2005, 39(2): 269-272.
梁宜勇, 杨国光, 孙戎. 激光直写调焦系统特性及离焦应用研究[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2005, 39(2): 269-272.
- Liu Tao, Xu Wendong, Zhao Chengqiang, *et al.*. High sensitivity pneumatic micro-distance measurement system for lithography autofocus[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(8): 0808003.
刘涛, 徐文东, 赵成强, 等. 可用于光刻自动聚焦的高灵敏度流量计式位移检测系统[J]. 中国激光, 2014, 41(8): 0808003.
- Lai Xianjia, Xu Wendong, Zhao Chengqiang, *et al.*. Influence of sample defocus and large thickness on measurement error in machine vision application[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(8): 0815002.

- 来先家, 徐文东, 赵成强, 等. 机器视觉应用中物体离焦及过厚对测量精度的影响[J]. 光学学报, 2015, 35(8): 0815002.
- 4 Huang P S, Kiyono S, Kamada O. Angle measurement based on the internal-reflection effect: a new method[J]. Applied Optics, 1992, 31(28): 6047-6055.
- 5 Hao Xianpeng, Ren Jianyue, Zou Zhenshu. Design of focus error detection system based on critical angle method[J]. Optics and Precision Engineering, 2009, 17(3): 537-541.
郝贤鹏, 任建岳, 邹振书. 临界角法检焦系统的设计[J]. 光学 精密工程, 2009, 17(3): 537-541.
- 6 He Fengtao, Bai Yonglin, Feng Xiaoqiang, *et al.*. An astigmatic method for real-time nanometer vibration measurement [J]. Acta Photonica Sinica, 2003, 32(10): 1208-1211.
贺锋涛, 白永林, 冯晓强, 等. 像散法对微位移和微振动的实时测量[J]. 光子学报, 2003, 32(10): 1208-1211.
- 7 Zhou Guangya, Shen Yibing, Hou Xiyun, *et al.*. Studies on high precise astigmatic focus error detect system[J]. Journal of Zhejiang University, 1998, 32(6): 694-698.
周光亚, 沈亦兵, 侯西云, 等. 象散法高精度离焦检测系统研究[J]. 浙江大学学报, 1998, 32(6): 694-698.
- 8 Tu Long, Yu Jin, Fan Zhongwei, *et al.*. Research on the technology of parallel laser confocal microscopy detection based on digital micro mirror device[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(10): 101702.
涂 龙, 余 锦, 樊仲维, 等. 基于数字微镜的并行激光共焦显微检测技术研究 [J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(10): 101702.
- 9 Udapa G, Singaperumal M, Sirohi R S, *et al.*. Characterization of surface topography by confocal microscopy: I. Principles and the measurement system[J]. Measurement Science & Technology, 2000, 11(3): 305-314.
- 10 Rhee H G, Kim D I, Lee Y W. Realization and performance evaluation of high speed autofocusing for direct laser lithography[J]. Review of Scientific Instruments, 2009, 80(7): 073103.
- 11 Li Y, Wu K, Ai Z J. Acircuit design of high-precision micro-displacement sensor system for DVD pickup head[C]. Photonics and Optoelectronics (SOPO), 2012 Symposium on. IEEE, 2012:1-4.