文章编号　2095-1531(2014)01-0137-07

干涉仪仪器传递函数的检测方法

孙　鸽[1,2],马冬梅[1*],张海涛[1]
(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. 中国科学院大学,北京 100049)

摘要:为了得到干涉仪的空间频率响应特性,开展了针对干涉仪的仪器传递函数的测评方法研究。建立了干涉仪成像系统的仪器传递函数的理论计算模型,利用光学设计软件仿真了菲索型干涉仪检测光路,计算并分析了该干涉系统的仪器传递函数的理论值。对基于特定频率点下的正弦位相板的方法测评干涉仪的仪器传递函数进行仿真分析,并与干涉仪的仪器传递函数的理论值进行了比对,其最大误差不超过 0.6%,验证了该方法的正确性。

关　键　词:菲索型干涉仪;干涉仪的仪器传递函数(ITF);空间频率响应特性;调制传递函数(MTF)
中图分类号:TP60　　**文献标识码**:A　　doi:10.3788/CO.20140701.0137

Interferometer instrument transfer function testing method

SUN Ge[1,2], MA Dong-mei[1*], ZHANG Hai-tao[1]
(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun* 130033, *China*;
2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*)
* *Corresponding author*, *E-mail*: *dongmei_ma*2013@163.*com*

Abstract: To acquire the spatial frequency response of the interferometer, the testing method on instrument transfer function(ITF) of interferometer was researched. First, the theoretical calculation model of instrument transfer function of imaging system was established, and the testing model of Fizeau interferometer was simulated via lens design program. Then the theoretical value was calculated and anaysed. Comparing ITF based on the method of sine phase plate with the theoretical ITF, the error is less than 0.6%, and this method is proved to be feasible via the simulation of the optical design program.

Key words: Fizeau interferometer; Interferometer transfer function(ITF); spatial frequency responds; Modulation Transfer Function(MTF)

收稿日期:2013-10-17;**修订日期**:2013-12-15
基金项目:国家科技重大专项资助课题(No. 2012T1G0032)

1 引 言

随着现代光学技术的飞速发展,对光学元件的表面精度要求日益增高,因此需要高精度的检测仪器和检测方法对光学元件进行检测。尤其是在极紫外光刻和惯性约束等高精度光学系统的制造过程中,光学元件面形精度在不同频率段会对成像质量造成不同的影响。干涉仪作为检测光学元件低频面形的检测仪器被广泛应用于现代光学加工和检测过程中。高精度的干涉仪为计算机控制抛光(CCOS)和离子束抛光(IBF)等进一步的小磨头加工提供了光学元件的中低频面形检测数据[1]。但是,想要准确获得不同仪器检测出的光学元件面形偏差,就要求检测仪器必须在指定空间频率范围内能够真实地反映光学元件的加工误差。干涉仪的仪器传递函数(Instrument Transfer Function,ITF)由于能够客观地反映出干涉仪轴向空间频率响应特性,被视为干涉系统的重要性能指标[2-3]。

美国 Peter Z、Eugene L 等人率先采用功率谱密度方法,利用标准相位台阶板,通过干涉仪测量波前信息计算台阶板的功率谱密度,与理想台阶板的功率谱密度比对,从而计算出干涉仪的 ITF[4]。日本尼康公司在发展极紫外光刻技术中,在对投影非球面物镜的加工与检测过程中也应用一个标准台阶相位板对所用的检测仪器—干涉仪的 ITF 进行标定[5];美国 Zygo 公司在生产的新型干涉仪过程中,用标准台阶板和带有固定空间频率的台阶阵列标准位相检测板对其进行轴向分辨力进行测评。四川大学张蓉竹等应用标准台阶板对大口径干涉仪传递函数也开展了检测工作[6]。

本文对干涉仪的 ITF 进行了理论推导,通过 Zemax 仿真菲索型干涉仪的检测模型,计算出该干涉系统模型的理论 ITF,将正弦位相板应用于上述干涉系统的模型中,基于位相比较的方法,检测干涉仪成像系统的 ITF,通过这种方法得到干涉仪的空间响应频率范围。

2 菲索型干涉仪基本工作原理

菲索型干涉仪被广泛应用于现代高精度光学检测工作中。菲索干涉仪测试平面光学元件的检测原理如图 1 所示,点光源通过准直镜分别平行入射到标准参考镜和被检镜上,一部分光经标准参考镜反射后形成基准参考光,另一部分光经被检镜反射后形成测试光,最终通过光学成像系统将基准参考波前和测试波前相干涉生成的干涉图成像到 CCD 上[7]。

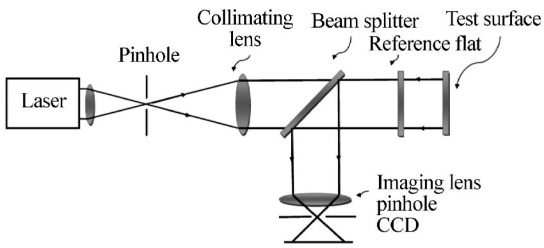


图 1 菲索型干涉仪检测工作原理

Fig. 1 Fizeau interferometer diagram

干涉仪所检测到的信息是待检光学元件的位相信息,即光学元件的表面轮廓高度偏差[8]:

$$h = \frac{\lambda}{2} \times \frac{\varphi}{2\pi}. \tag{1}$$

式中,h 表示待检的光学面形高度偏差,φ 表示位相,λ 表示测试波长。

因此,在利用菲索型干涉仪对光学元件检测的过程中,干涉仪的轴向分辨能力尤为重要,本文将对干涉仪的 ITF 的测评方法进行分析。

3 干涉仪 ITF 测试

3.1 ITF 定义

若把干涉仪近似地视为一个线性系统,则整体线性系统的响应是所有分系统响应的总和。若输入信号为 $g(x)$,经过干涉系统后的输出信号为 $g'(x)$,则[9]:

$$G'(f) = \mathrm{IFT}(f) \cdot G(f) , \tag{2}$$

式中,$G'(f)=\Im\{g'(x)\}$,$G(f)=\Im\{g(x)\}$,$\Im\{\}$表示傅里叶变换,$ITF(f)$ 为系统的仪器传递函数[10]。

干涉仪的 ITF 表示的是计算出的光学元件表面面形高度偏差与实际的光学元件表面面形高度的频谱的比值。因此,用干涉仪检测出的光学元件表面面形高度的值直接能反映出位相信息,干涉仪的 ITF 则可以表示为:

$$\mathrm{ITF}(f)=\frac{\Im\{\varphi_{\mathrm{mea}}\}}{\Im\{\varphi_{ide}\}}, \tag{3}$$

式中,φ_{mea}表示经干涉仪检测出的光学元件表面的位相,φ_{ide}表示光学元件理想位相。

因此,应用干涉仪的 ITF 有时也被称为干涉仪的高度传递函数(Height Transfer Function, HTF),这样可以更为直观地评价干涉仪的空间频率响应特性,即,

$$\mathrm{HTF}(f)=\frac{h_{\mathrm{mea}}}{h_{\mathrm{ide}}}. \tag{4}$$

式中,h_{mea}表示经干涉仪检测出的光学元件表面轮廓高度,h_{ida}表示光学元件理想轮廓高度。

3.2　干涉仪 ITF 理论推导

假设正弦位相光栅的最大高度为 h(2 倍振幅),空间调制频率为 f,在单色平面波垂直照射条件下,由于光波已经受到正弦位相表面高度之间的深度差而引起了位相调制,光波在经过正弦位相板后引入了由正弦板振幅高度引入的位相差:

$$\varphi=\frac{2\pi}{\lambda}\cdot H, \tag{5}$$

式中,H 表示光学元件表面的高度轮廓偏差。

由于在光学检测过程中,检测得到的信息是由待检物体表面反射的信息,因此检测得到的时间光程差为:

$$H=h\cdot\cos(2\pi fx), \tag{6}$$

式中,h 表示正弦光栅的最大高度。

用复振幅表示待检光学元件:

$$u=A\cdot e^{i\frac{2\pi}{\lambda}\cdot h\cdot\cos(2\pi fx)}, \tag{7}$$

实际影响光学传播的因素包括两个方面:照明光波的性质以及孔径的特点。物体的透过率直接反应了物体的结构特点。为了能够更直接地分析待检光学元件的性质,在推导过程中忽略了复杂照明光波的影响,采用单色平面波垂直照明物体进行分析。因此,假设上式中的 $A=1$,则:

$$u=e^{i\frac{2\pi}{\lambda}\cdot h\cdot\cos(2\pi fx)}=\sum_{n=-\infty}^{+\infty}i^nJ_n\left(\frac{2\pi}{\lambda}\cdot h\right)\cdot e^{i2\pi fx}. \tag{8}$$

式中,J_n为 n 阶第一类贝塞尔函数,f 是变化频率$(f\cdot\frac{2}{L})$。

通常情况下,正弦测试板的深度越深,衍射级次就越强,衍射效率也越高。因此,当 $h\cdot\frac{\lambda}{4}$时,由于正弦位相板反射的衍射级次则被限定在了 $-1,0,+1$ 的范围内,高次衍射则可以忽略不计。因此,干涉系统对于极小位相高度的物体的相干过程就相当于光学成像系统的成像过程,可以将干涉仪的 ITF 近似地视为干涉成像系统的光学传递函数。光波经正弦位相板反射后的复振幅为[11-12]:

$$u=e^{i\frac{2\pi}{\lambda}\cdot h\cdot\cos(2\pi fx)}\approx 1+\mathrm{i}\frac{2\pi}{\lambda}\cdot h\cdot\cos(2\pi fx). \tag{9}$$

根据欧拉公式,并在 u 的基础上添加由参考光引入的复振幅 $e^{i\varphi}$:

$$u_1=1+e^{i\varphi}+i\frac{2\pi}{\lambda}h(e^{i2\pi fx}+e^{-\mathrm{i}2\pi fx}), \tag{10}$$

u_1携带了参考光和待检弦位相板反射后的光波信息。

对 u_1进行傅里叶变换,得:

$$U=(1+e^{i\varphi})\delta(f_x,f_y)+\mathrm{i}\frac{2\pi}{\lambda}\cdot\frac{h}{2}[\delta(f_x-f,f_y)+\delta(f_x+f,f_y)], \tag{11}$$

对于非相干光学系统而言,有:

$$\Im\{I'\}=[H*H][U*U], \tag{12}$$

式中,I' 为经过光学系统后的光强,H 为光瞳函数,U 为物方复振幅分布的频谱[13]。

对 $U(f_x,f_y)$进行自相关运算,并且乘以调制

传递函数(MTF):

$$\Im\{I'\} = U*U\times \mathrm{MTF}(f) = 2(1+\cos\varphi)\delta(f_x,f_y) + \frac{2\pi}{\lambda}h\cdot \mathrm{MTF}(f)\sin\varphi[\delta(f_x-f,f_y)^* + \delta(f_x+f,f_y)\ , \tag{13}$$

对上式进行傅里叶逆变换:

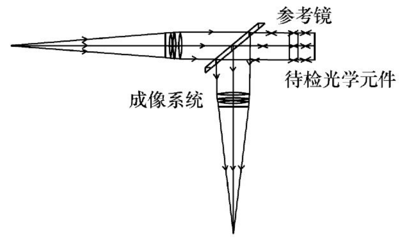
$$I'(x,y) = 2(1+\cos\varphi) + \frac{2\pi}{\lambda}h\cdot \mathrm{MTF}(f)\sin\varphi\cos 2\pi fx \approx 2+2\cos[\frac{2\pi}{\lambda}h\cdot \mathrm{MTF}(f)\cos(2\pi fx)-\varphi]\ , \tag{14}$$

由式(14)得出:当被检表面轮廓高度无限小,即 $h\cdot\frac{\lambda}{4}$时,待检镜利用干涉检验方法所得到的表面轮廓高度约为 $h\times \mathrm{OTF}(f)$。因此,可以近似地把采用非相干的干涉系统的 ITF 视为非相干成像系统的 OTF。而对于相干系统而言,可以视相干为多个点光源照明的集合。因此,利用相干的干涉系统的 ITF 就近似于相干成像系统的 OTF。

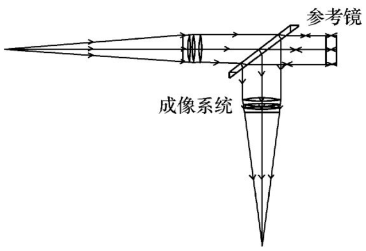
4 数据模拟

检测光学成像系统的 OTF 的方法有很多种,如狭缝法,刀口法等方法,然而应用这些方法很难检测出干涉仪的 ITF[14-15],因此本文将采用位相比较的方法,通过光学设计软件 Zemax 设计光学设计检测光路,采用本文第 3 章提及的正弦位相板对干涉系统的 ITF 进行仿真分析。

为了验证上述检测干涉系统的 ITF 方法的可行性,模拟了一套 φ100 mm 的菲索型干涉仪检测模型,基于干涉仪相干原理,利用 Zemax 光学设计软件中的多重结构模块分别对干涉仪的参考光路和测试光路进行仿真,图 2(a)为菲索型干涉仪的测试光路,图 2(b)为菲索型干涉仪的参考光路[16-17]。干涉仪成像镜的放大倍率为 1,测试光路中的待检光学元件即为特定空间频率的正弦位相板,测试波长为 632.8 nm。



(a) 测试光路
(a) Testing beam path



(b) 参考光路
(b) Reference beam path

图 2 菲索干涉仪测试光路和参考光路图

Fig. 2 Fizeau interferometer structure of testing beam path and Fizeau interferometer structure of reference beam path

在模拟仿真中采用如图 3 所示的光学元件作为测试干涉仪的 ITF 的标准测试镜。测试镜的有效口径为 100 mm,正弦位相振幅高度为 35 m ($h\cdot\frac{\lambda}{4}$),λ=632.8 nm。在实际的光学检测过程中,对于成像倍率在 1 倍的干涉系统而言,干涉仪的空间截止频率在 2 mm^{-1}左右,超过2 mm^{-1}空间频率的光学元件的面形信息将超过干涉仪 CCD 的奈奎斯特频率将无法被探测,因此本文拟采用空间频率分别为 0.5,1,2 mm^{-1}的正弦测试镜进行模拟仿真。根据式(4)可知,通过对经过干涉系统后测试镜的正弦位相高度与理想正弦位相高度作对比,可以计算出特定空间频率点下的干涉仪的 ITF。

待检光学元件的相位,即面形轮廓信息是通过不同的相移步数和不同的相移量通过求解多元方程求解得到的,这一过程也叫做相位提取过程。当干涉模型中参考光和测试光发生干涉时,干涉图中的光强可以表达为:

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1I_2}\cos(\varphi+\delta)\ , \tag{15}$$

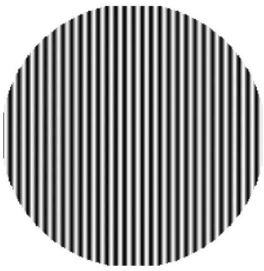


图 3　1 mm^{-1}正弦位相板

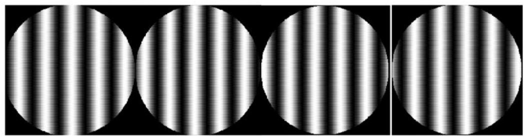
Fig. 3　1 mm^{-1} sine phase lens

式中,I 表示第 n 幅干涉图中某一点的光强,I_1 和 I_2 表示同一点参考光和测试光的背景光强,φ 表示被测相位,δ 为附加的相位调制项。当采用四步相移法进行相位调制时,$\delta_1 = 0°$,$\delta_2 = 90°$,$\delta_3 = 180°$,$\delta_4 = 270°$,因此获得待检光学元件的相位:

$$\varphi = \arctan\left(\frac{I_4 - I_2}{I_1 - I_3}\right) , \tag{16}$$

本文将应用 Zemax 光学设计软件通过移动标准参考镜达到模拟压电陶瓷(PZT)相移的效果,得到四幅干涉图,由 4 幅干涉图通过四步相移算法求解,再进行解包裹运算,进而得到待测光学元件的面形信息。

上述光学元件经过干涉成像系统后得到的四步相移干涉图如图 4 所示。

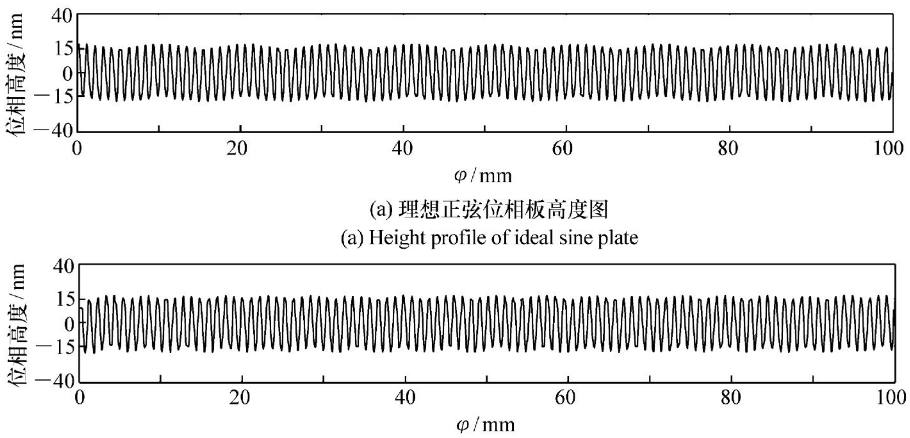


(a) $\delta = 0°$　(b) $\delta = 90°$　(c) $\delta = 180°$　(d) $\delta = 270°$

图 4　四步相移干涉图

Fig. 4　4 steps phase shifting Interferograms

应用四步移相算法对上述干涉图进行相位提取,可以得到待检光学元件的面型轮廓信息。在得到的面型轮廓的基础上,去除 Zernike 多项式前 36 项的低频信息,并且提取光学元件中心的有效数据对光学元件的中心面形高度进行处理分析,如图 5 所示。



(a) 理想正弦位相板高度图

(a) Height profile of ideal sine plate

(b) 空间频率为 mm^{-1} 正弦位相板经过干涉系统后的位相高度

(b) Height of 1 mm^{-1} sine plate via interferometer

图 5　正弦相位板的面形高度与经过干涉仪成像系统获得的面形高度

Fig. 5　Height profile of sine plate and plate via interferometer

图 5(a)为正弦位相测试板的实际面形高度,图 5(b)为经过干涉仪的成像系统后得到的面形高度偏差。通过对经过干涉仪的成像系统后的位相高度与理想位相高度进行比对,求得 0.5,1,2 mm^{-1}等空间频率点的干涉仪的仪器传递函数,并与以上仿真的干涉系统模型的干涉仪的仪器传递函数进行比对,得到的结果如图 6 所示。

图 6 中的曲线表示干涉仪成像系统的调制传

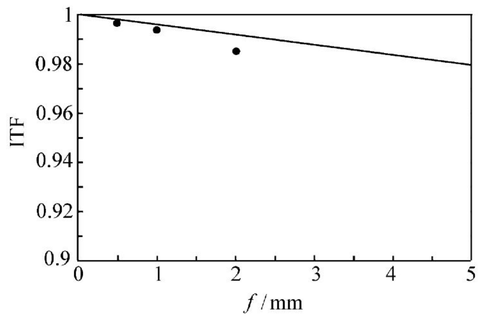


图6 ITF与正弦位相板测试结果比较

Fig. 6 Contrast to ITF and the result of sine phase plate

递函数,由此可以看出,利用0.5,1,2 mm^{-1}等空间频率的正弦位相板检测出以上特征频率点处的干涉仪成像系统的ITF与理论干涉仪的ITF的最大偏差在不超过0.6%,因此,验证了运用正弦位相板对干涉仪成像系统的ITF检测方法的正确性。

5 结 论

本文通过标量衍射理论对干涉仪的ITF做了理论分析并且进行了数学建模,仿真了由正弦位相板检测干涉仪成像系统的仪器传递函数的模型,基于相位比较的方法,对干涉仪的仪器传递函数的检测开展了模拟仿真的工作,与理论值行进行比对,最大偏差不超过0.6%,仿真结果验证了该测试方法的正确性。本文只对干涉仪成像系统的仪器传递函数进行了分析验证,而干涉仪的传递函数可以反映干涉仪的整体性能,它与干涉仪的光学成像系统、CCD探测器的传递函数、光学元件质量、相移算法的精度,环境等因素有关,这一部分的工作将在后续论文进行 研究。本文只是为进一步检测干涉仪的仪器传递函数工作提供理论支持。

参考文献:

[1] NOVAK E,WYANT J C. Optical resolution of phase measurements of a laser Fizeau interferometer[J]. *SPIE*,1996,2870:545-552.

[2] NOVAK E,WYANT J C. Transfer function characterization of laser Fizeau interferometer for high spatial frequency phase measurements[J]. *SPIE*,2007,3134:113-121.

[3] DINGER U,EISERT F H,*et al.*. Mirror substrates for EUV-lithography:progress in metrology and optical fabrication technology[J]. *SPIE*,2000,4146:35-46.

[4] PETER Z T,MICHELLE X O L,*et al.*. A step-height standard for surface profiler calibration[J]. *SPIE*,1995,1993:65-74.

[5] UDO D,G NTHER S,*et al.*. Fabrication and metrology of diffraction of diffraction limited soft X-ray optics for the EUV microlithography[J]. *SPIE*,2004,5193:18-28.

[6] 许乔,顾元元,柴林,等.大口径干涉仪系统传递函数校准[J].强激光与粒子束,2001,13(3):321-324.
XU Q,GU Y Y,CHAI L,*et al.*. Calibration for transfer function of large interferometer[J]. ,2001,13(3),321-324.(in Chinese)

[7] 苏志德,史振广,彭吉,等.菲索干涉仪中精确移相的实现[J].中国光学,2013,6(2):244-250.
SU ZH D,SHI ZH G,PENG J,*et al.*. Implementation of accurate phase shift in Fizeau interferometer[J]. *Chinese Optics*,2013,6(2):244:250.(in Chinese)

[8] JAMES E. HARVEY,ANITA K. Scattering effects from residual optical fabrication errors[J]. *SPIE*,2576:155-174.

[9] JIYOUNG C,QUANDOU W,*et al.*. Measuring the phase transfer function of a phase-shifting interferometer[J]. *SPIE*,2008,7064:C.

[10] PETER de G,XAVIER C de L. Interpreting interferometric height measurements using the instrument transfer function [J]. in Proc. 5th Int. Workshop on Automatic Processing of Fringe Patterns,2005:30-37.

[11] XAVIER C de L,PETER de G. Lateral resolution and instrument transfer function as riteria for selecting surface metrology instruments[J]. *Imaging and Appl. Optics Technical Digest*,2012,OTu1D.4.

[12] JIYOUNG C,QUANDOU W,*et al.*. Spatially resolved height response of phase-shifting interferometers measured using a

patterned mirror with varying spatial frequency[J]. *Opt. Eng.*,2010,49(9)095601:1-7.

[13] GOODMAN J W. *Introduction to Fourier Optics*[M]. 2^{nd} Edition. New York:the McGRAW-HILL companies,INC. 1996.

[14] 赵慧洁,秦宝龙,贾国瑞. 高光谱遥感系统调制传递函数的在轨测试[J]. 光学 精密工程,2011,19(6):1235-1243.
ZHAO H J,QIN B L,JIA G R. On-orbit detection for modulation transfer function of hyperspectral remote sensing system [J]. *Opt. Precision Eng.*,2011,19(6):1235-1243. (in Chinese)

[15] 郭汉洲,吕恒毅,曲利新. 遥感相机动态调制传递函数与时间延迟积分 CCD 行周期误差的关系[J]. 光学 精密工程,2013,21(8):2195-2200.
GUO H ZH,LV H Y,QU L X. Relation of line transfer period error and dynamic MTF of TDICCD in remote sensing camera[J]. *Opt. Precision Eng.*,2013,21(8):2195-2200. (in Chinese)

[16] 杨鹏,伍凡,侯溪,等. 基于 ZEMAX 的菲索干涉仪模型[J]. 光电工程,2010,37(11): 98-102.
YANG P,WU F,HOU X,WU G. Fizeau Interferometer Model Base on ZEMAX[J]. *Opto-Electronic Eng.*,2010,37(11):98-102. (in Chinese)

[17] 王路佳. 环形光源在 Fizeau 干涉系统中的设计与研究[D]. 南京:南京理工大学,2012.
WANG L J. Design and research on Ring of Fire in Fizeau interferometer system[D]. Nanjing:Nanjing University of science and technology,2012. (in Chinese)

作者简介:

孙　鸽(1987—),女,吉林长春人,硕士研究生,2011 年于长春理工大学获得学士学位,主要从事光学检测方面的研究。E-mail:dovesun@126.com

张海涛(1987—),男,山东荷泽人,硕士,助理研究员,2007 年于山东大学获得学士学位,2009 年于北京理工大学获得硕士学位,主要从事光学检测方面的研究。E-mail:heisencheung@gmail.com

马冬梅(1963—),女,吉林人,研究员,博士生导师,1986 年于天津大学获得学士学位,1994 年、2006 年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所分别获得硕士、博士学位,主要从事光学检测、光电成像系统的性能测评研究。E-mail:dongmei_ma2013@163.com