

文章编号 1004-924X(2009)12-2912-07

# 位相复原技术在光学成像质量测评中的应用

马冬梅<sup>1</sup>, 陈土泉<sup>1,2</sup>, 刘志祥<sup>3</sup>, 聂真威<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; 3. 中国科学院 光电技术研究所, 四川 成都 610209)

**摘要:** 光学系统波像差是表征光学系统成像质量的重要指标之一。基于信息光学基础理论, 采用傅里叶变换和迭代算法计算分析了光学成像系统的星点图像(光强点扩散函数, PSF), 实现了对光学成像系统位相的复原, 获得了波像差信息。论述了有关的理论依据和分析公式, 并研制了位相复原分析计算软件。通过计算机仿真与误差分析论证了研制的位相复原计算方法的正确性, 复原误差 $<5\%$ 。通过实际采集的光学系统星点图像的位相复原实验, 验证了位相复原分析软件的适用性。此方法为光学成像系统波相差的评估工作提供了新途径。

**关键词:** 信息光学; 傅里叶变换; 点扩散函数; 位相复原; 迭代算法; 波像差

**中图分类号:** TH703 **文献标识码:** A

## Application of phase retrieval technology in evaluation of optical imaging system

MA Dong-mei<sup>1</sup>, CHEN Tu-quan<sup>1,2</sup>, LIU Zhi-xiang<sup>1,2</sup>, NIE Zhen-wei<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;*

*3. Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China)*

**Abstract:** The wave front of an optical system is one of important parameters for evaluating imaging quality. On the basis of the fundamental theory of information optics, the Fourier transform and an iterative approach are used to calculate and analyze the point image of an optical imaging system (the Point Spread Function (PSF) of light intensity), to retrieve the phase of imaging system and then to obtain the wave front of the optical system. The related theory is discussed and a computing software for analysis of the phase retrieval is established. The validity of computing software is proved by the computer simulation and error analysis, in which the phase retrieval error is estimated to be less than 5%. A phase retrieval experiment for an actual acquired point image is undertaken, and obtained results verify that proposed computing software is efficacious. It is concluded that the proposed method is suitable to the retrieval of wave front of optical systems.

收稿日期: 2009-07-22; 修订日期: 2009-10-05.

基金项目: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所三期创新实验室改造项目

**Key words:** information optics; Fourier transform; point spread function; phase retrieval; iterative algorithm; wave front

## 1 引言

通常情况下,在光学成像系统的研制阶段,通过对光学成像系统波像差的测试即可对其成像质量进行评估,掌握光学系统所处状态,用于指导光学系统的加工与调试。在此过程中波像差的获得是在良好的实验室环境条件下,以自准方式由干涉仪、被测试光学系统和高精度平面反射镜组成测试回路,通过计算分析采集到的干涉图来获得光学成像系统的波像差(光瞳函数),从而了解光学成像系统的质量状况,以便判断是否达到研制技术指标要求。由于从测试方法到测试设备均为成熟技术,因此,在国内外实验室内光学成像系统波像差测试工作中得到了广泛的应用。但是这种技术的应用条件有一定的局限性,除了需要干涉仪外还要有相应口径面形良好的平面镜作为测试基准。

早在上个世纪,国外发达国家就已开始了位相复原技术的研究,通过位相复原技术获得光学系统的波像差的技术已经应用在大型空间望远镜的在轨调试中。典型应用是美国哈勃望远镜在轨像差诊断及校正以及美国正在研制的最新一代拼接式大型空间望远镜 JWST 的图像质量分析和系统运行调试,国内对该项目技术的研究目前还处于初始研究阶段<sup>[1-5]</sup>。

## 2 位相复原理论基础

光学系统的波像差和光学传递函数(OTF)是光学系统性能测评工作中的两个重要测评指标。

基于信息光学理论,可利用点扩散函数(PSF)的信息实现光学成像系统的位相复原获得波相差信息。光学系统的成像质量可以用光学系统的光瞳函数或光学传递函数表示。光学系统的光瞳函数即表述了光学系统的位相信息(波像差);而光学传递函数则反映了光学系统的空间频率传递特性。通过光瞳函数的自相关积分或两次傅里叶变换可获得光学传递函数;同时,光瞳函数的一次傅里叶变换可获得振幅点扩散函数

(ASF);从振幅点扩散函数可获得光强点扩散函数(PSF),其傅里叶变换即为光学传递函数。在实际光学检验工作中可以方便、精确地获得光学系统的光强点扩散函数即星点图像,而通过对星点图像的采集、处理与计算可以得到光学系统的位相信息。

## 3 位相复原模型建立

光学系统的光瞳函数与振幅点扩散函数是傅里叶变换关系,一般用如下公式表示:

$$\text{ASF}(x, y) = \iint P(x', y') \exp[-2\pi i(xx' + yy')] dx' dy', \quad (1)$$

其中  $\text{ASF}(x, y)$  为振幅点扩散函数,  $P(x', y')$  为光瞳函数,而

$$P(x', y') = A(x', y') \exp[ikW(x', y')], \quad (2)$$

$A(x', y')$  为光瞳函数的振幅部分,是光瞳形状函数,在通光孔径内取 1,通光孔径外为 0;  $k = 2\pi/\lambda$ ,  $W(x', y')$  为光学系统的波像差。而

$$\text{PSF}(x, y) = |\text{ASF}(x, y)|^2, \quad (3)$$

因此,可以根据已知的  $\text{PSF}(x, y)$  即星点图和式(1)、(2)、(3),采用傅里叶变换方法和迭代计算方法实现,由:

$\text{PSF}(x, y) \rightarrow \text{ASF}(x, y) \rightarrow P(x', y') \rightarrow W(x', y')$  的数学分析与计算,使得光学系统的位相(波像差)  $W(x', y')$  得到复原<sup>[6-7]</sup>。

## 4 仿真试验

基于以上理论,本文研制了利用 PSF 信息进行光学系统位相复原的计算软件,主要功能包括星点图光强分布信息提取、傅里叶正逆变换计算、位相迭代计算与误差评估、位相展开、波面拟合、星点模拟图生成和干涉图生成<sup>[8-13]</sup>。软件编写采用了 MATLAB 科学计算软件。本文应用此分析计算软件对两个典型的星点图像进行了位相复原仿真分析。

### 4.1 带有彗差状态的星点图位相复原

对只带有慧差的星点图像进行位相复原仿

真,图 1 为带有彗差的星点图和波前图:

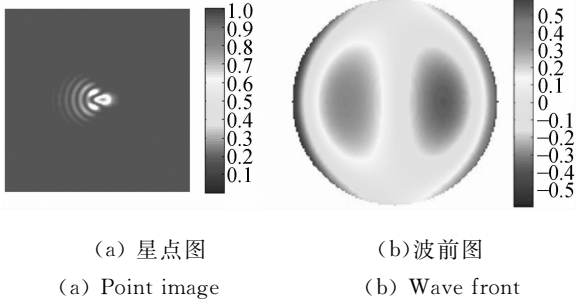


图 1 带有彗差的星点图与波前图(RMS=0.212λ)

Fig.1 Point image and wave front with coma (RMS=0.212λ)

以初始位相为 0 对图 1 所示的星点图像进行位相复原迭代计算,图 2 为迭代 300 次后得到的位相图、波前图及对应的星点图;

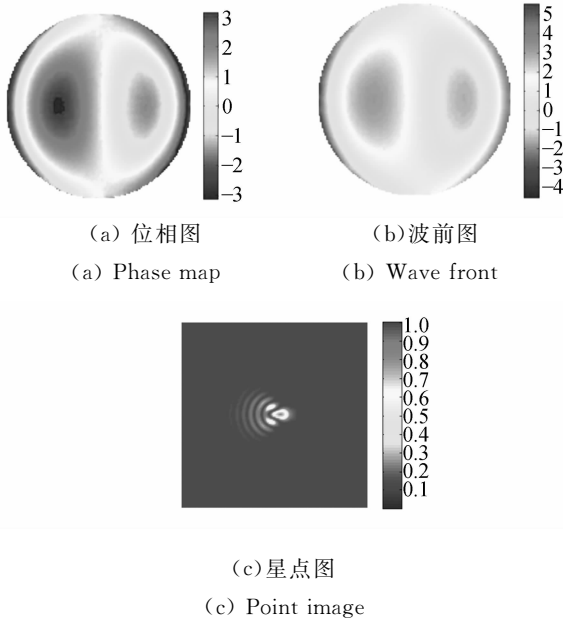


图 2 迭代 300 次的复原结果 Fig.2 Results after 300 iteration

为了比较迭代运算后的星点图、波前图与实际星点图、波前图的区别,将迭代后的图像与实际图像相减得到残差图像如图 3 所示。与星点图像误差对应的评价因子  $E=0.0041$  (详见第 5 节),波前复原误差均方根  $\Delta RMS=0.005\lambda$ 。

表 1 中列出了位相复原迭代的结果,包括迭代次数、图像误差  $E$  和拟合后波面的均方根误差 RMS。

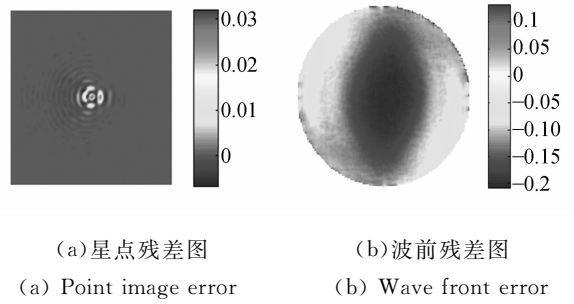


图 3 星点和波前残差图

Fig.3 Point image and wave front error

表 1 带有彗差的星点图位相复原结果

Tab.1 Results of phase retrieval with coma

次数	评价因子	拟合波面 RMS(λ)	备注
50	0.050 9		
100	0.037 5	0.195	原始 RMS=0.212λ
200	0.004 4	0.207	初始位相 RMS=0λ
300	0.004 1	0.207	

其中采用原始波前的泽尼克系数为:

Zernike coeff  $C_6=0.600$

Zernikepolynom  $= (3\rho^3 - 2\rho) \cos \theta;$

其余系数项为 0;

经过位相复原后的波前泽尼克系数:

Zernike coeff  $C_6=0.583$

其余系数项接近于 0。

### 4.2 带有彗差、像散和离焦的星点图位相复原

对带有彗差、像散和离焦的星点图像进行位相复原仿真,图 4 为对应的星点图和波前图:

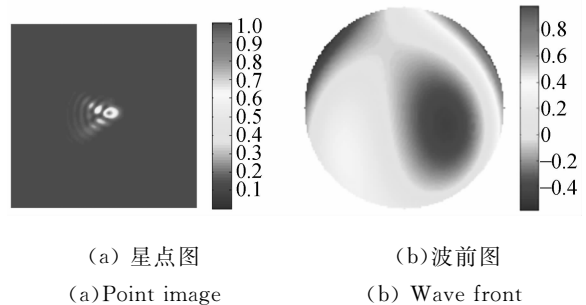


图 4 带有彗差、像散和离焦的图像(RMS=0.267λ)

Fig.4 Point image and wave front with coma, astigmatism and defocusing(RMS=0.267λ)

以初始位相为 0 对图 4 所示的星点图像进行位相复原迭代计算,图 5 为迭代 300 次后得到的位相图、波前图及对应的星点图。

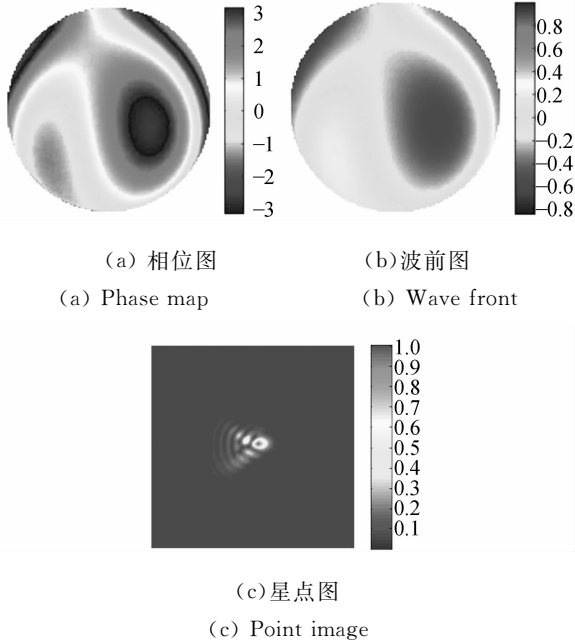


图 5 迭代 300 次的复原结果

Fig. 5 Results after 300 iteration

图 6 为迭代 300 次后的星点和波前残差,与星点图像误差对应的评价因子  $E=0.0032$ ,波前复原误差均方根误差表示  $\Delta\text{RMS}=0.016\lambda$ 。

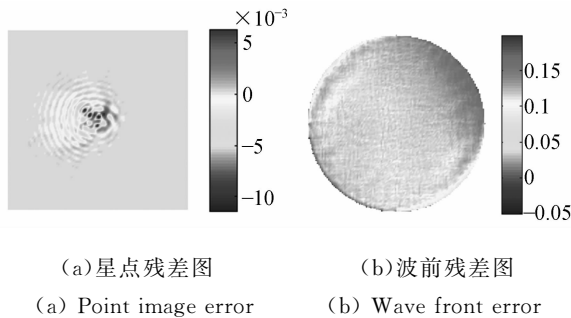


图 6 星点和波前残差图

Fig. 6 Point image and wave front error

表 2 为位相复原迭代的结果。开始迭代的时候评价因子下降速度较快,但随着迭代次数的增加,下降速度变缓,最终趋于收敛。

表 2 带有彗差、像散和离焦的星点图位相复原结果  
Tab. 2 Results of phase retrieval with coma, astigmatism and defocusing

次数	评价因子	拟合波面 RMS( $\lambda$ )	备注
50	0.028 5		
100	0.005 2	0.250	原始 RMS=0.267 $\lambda$
200	0.003 2	0.251	初始位相 RMS = 0 $\lambda$
300	0.003 2	0.251	

其中采用原始波前的泽尼克系数:

$$\text{Zernike coeff } C_3 = 0.200$$

$$\text{Zernikepolynom} = 2\rho^2 - 1;$$

$$\text{Zernike coeff } C_5 = 0.400$$

$$\text{Zernikepolynom} = \rho^2 \sin(2\theta);$$

$$\text{Zernike coeff } C_6 = 0.500$$

$$\text{Zernikepolynom} = (3\rho^3 - 2\rho) \cos \theta;$$

其余系数项为 0。

经过位相复原后的波前泽尼克系数:

$$\text{Zernike coeff } C_3 = 0.178$$

$$\text{Zernike coeff } C_5 = 0.366$$

$$\text{Zernike coeff } C_6 = 0.486$$

其余系数项接近于 0。

### 5 位相复原误差分析

上节提到的评价因子  $E$  采用方差法进行计算,以此作为位相复原精度的评价<sup>[9]</sup>。

$$E = \frac{\iint_{-\infty}^{\infty} [ |G(u)| - |F(u)| ]^2 du}{\iint_{-\infty}^{\infty} |F(u)|^2 du}, \quad (4)$$

其中, $G(u)$ 为位相复原后的 PSF 振幅。 $F(u)$ 为目标的 PSF 的振幅, $E$ 无量纲。

经过位相迭代复原计算,可以看出随着迭代次数的增加,评价因子逐渐减小,波面拟合后的 RMS(均方差)与像差系数接近实际值。在多次迭代计算后评价因子基本趋于稳定。在位相差单一或中小像差情况下,复原误差基本 < 5%;在位相差情况复杂且大像差情况下,复原误差增大。在计算机仿真试验分析时发现,对于复杂的 PSF 图像进行位相复原迭代计算时,如果初始位相根据实际 PSF 图像给出一定初始值时,可以减少迭代次数,提高迭代精度。因此,在用此方法测试光学系统波像差,调试光学系统时,若光学系统波像差偏大,应针对像差系数相对大的像差项进行调试使其减小,进而使光学系统波像差变小,通过多次重复光学系统调试与位相复原计算过程,逐渐使光学系统趋于最佳状态。以此种方式应用上述位相复原方法可以最大限度地提高复原精度,满足实际需要。

## 6 实际图像采集与分析

应用上述位相复原分析计算软件对在实验室内采集的光学成像系统星点图像进行了位相复原实验。采用现有的高精度测试设备搭建了测试实验光路(如图 9)。主要组成部分为离轴反射式平行光管、星点目标板、高精度光学信号接收与图像采集系统及气浮平台。实验用光学系统为可见光光学成像镜头。由光学镜头对平行光管焦点上的星点成像,然后采集光学镜头焦面上所成的星点图像(见图 7),最后经信号处理获得 PSF 图像。采用上述位相复原软件对此图像进行了位相复原计算,并以初始位相为 0 对图 7 所示的星点图像进行了位相复原迭代计算。

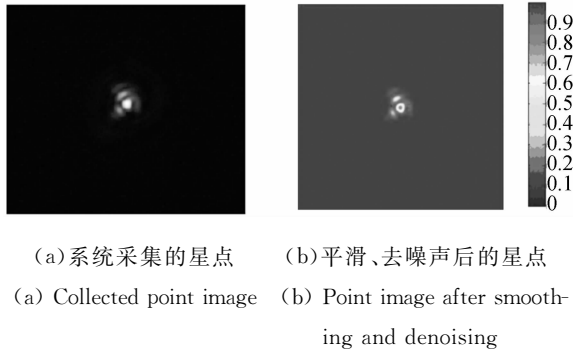


图 7 采集和处理后的星点

Fig.7 Collected point image and corrected point image

图 8 为迭代 300 次后的结果,图 8(a)为复原的位相,图 8(b)为位相展开的波前,图 8(c)和图 8(d)分别为与图 8(b)波前对应的星点和干涉图。

表 3 中列出了位相复原迭代的结果,图像误差  $E$  最后稳定在 0.056,拟合后波面的均方根误差 RMS 为  $0.141\lambda$ 。

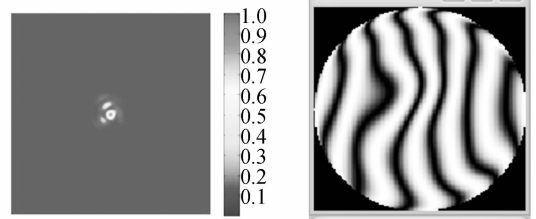
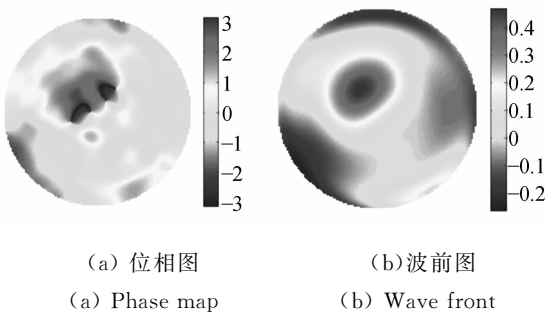


图 8 迭代 300 次的复原结果  
Fig.8 Results after 300 iteration

表 3 位相复原实验结果

Tab.3 Results of phase retrieval experiment

次数	评价因子	拟合波面 RMS( $\lambda$ )	备注
50	0.057 6	0.139	初始位相 RMS = 0 $\lambda$
100	0.057 0	0.140	采用 $\lambda = 0.55 \mu\text{m}$ 波段的滤光片
200	0.056 5	0.142	
300	0.0562	0.141	

经过位相复原后的波前泽尼克系数:

$$\text{Zernike coeff } C_3 = -0.138$$

$$\text{Zernikepolynom} = (2\rho^2 - 1);$$

$$\text{Zernike coeff } C_5 = -0.139$$

$$\text{Zernikepolynom} = \rho^2 \sin(2\theta);$$

$$\text{Zernike coeff } C_6 = 0.114$$

$$\text{Zernikepolynom} = (3\rho^3 - 2\rho) \cos \theta;$$

$$\text{Zernike coeff } C_7 = -0.162$$

$$\text{Zernikepolynom} = (3\rho^3 - 2\rho) \sin \theta;$$

其余系数项接近于 0。

分析位相复原实验结果,可以看出评价因子基本稳定在 0.056,与计算机仿真结果相比偏大,

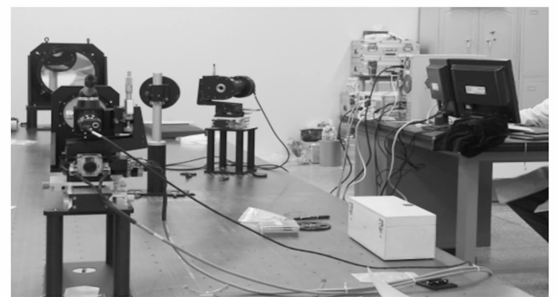


图 9 星点图像采集实验现场(平行光管和被测试光学系统)

Fig.9 Placement of point image collected experiment (collimator and tested optical system)

这主要是由傅里叶变换计算中探测器像元数匹配误差和光电信号采集系统噪声等因素造成的。因此,在实际应用中需要注意信号采集系统的技术指标选择,以满足采样点数和信噪比的要求。如 CCD 采样不足还可以采用亚像元几何超分辨处理方法使图像满足采样率要求<sup>[14]</sup>。上述实验验证了位相复原分析计算软件的适用性。

## 7 结 论

本文通过理论分析与测试实验,提出了一种把位相复原技术用于光学测试与检验的研究方法。该方法采用光学系统的星点图实现光学系统的位相复原,从而获得波像差信息。由于在实验室条件下,可以选择具有良好信噪比、采样点数足够高的图像采集系统,而且各种类型(口径、焦距

与测试波段)质量良好的平行光管与稳定的实验室环境(低气流、低振动)也可为精确获得光学系统的星点图提供保证,因此可以通过此方法对光学系统的星点图像进行位相复原以获得光学系统的波像差,在光学系统的设计、研制阶段实现对光学系统的加工、安装与调试状态的技术支持。另外,在获得光学系统波相差的同时也可利用测试设备同时测试出光学系统的分辨率、传递函数、焦距等主要技术参数,为位相复原效果评判提供更多可参考依据,实现一机多用,降低研制成本,提高检测效率。

目前,此项研究工作在进一步开展,包括位相复原的分析、计算软件的完善和复原精度的提高<sup>[15]</sup>,同时对位相复原的初始位相选定、复原结果评判标准的确立以及星点图像信号的准确提取进行了更深入的研究,以便更加符合工程要求。

## 参考文献:

- [1] FIENUP J R. Phase retrieval for the Hubble Space Telescope using iterative propagation algorithms [J]. *SPIE*, 1991, 1567: 327-332.
- [2] FIENUP J R, MARRON J C, SCHULZ T J, *et al.*. Hubble Space Telescope characterized by using phase-retrieval algorithms [J]. *Applied Optics*, 1993, 32(10): 1747-1767.
- [3] BRUCE H D, DAVID L A, SCOTT J S, *et al.*. Phase retrieval algorithm for JWST flight and test-bed telescope [J]. *SPIE*, 2006, 6265: 1-11.
- [4] ADAM R C, SCOTT D A, PAUL D A, *et al.*. Aligning and maintaining the optics for the James Webb Space Telescope (JWST) on-orbit: the wave front sensing and control concept of operations [J]. *SPIE*, 2006, 6265: 1-16.
- [5] MILLANE R P. Recent advances in phase retrieval [J]. *SPIE*, 2006, 6316: 1-11.
- [6] 韩昌元. 空间光学的发展与波前传感技术[J]. *中国光学与应用光学*, 2008, 1(1): 13-24.  
HANG CH Y. Progress in space optics and wave front sensing technique [J]. *Chinese Journal of Optics and Applied Optics*, 2008, 1(1): 13-24. (in Chinese)
- [7] 韩昌元. 信息光学基础理论及其应用[M]. 长春: 长春出版社, 1989.  
HANG CH Y. *Fundamental Theory And Application of Information Optics* [M]. Changchun: Changchun Publishing House, 1989. (in Chinese)
- [8] GERCHBERG R W, SAXTON W O. A practical algorithm for the determination of phase from image and diffraction phase pictures [J]. *Optik*, 1972, 35(2): 237-246.
- [9] FIENUP J R. Reconstruction of an object from modulus of its Fourier transform [J]. *Optics Letters*, 1978, 3(1): 27-29.
- [10] SICAIROS M G, FIENUP J R. Phase retrieval with Fourier-weighted projections [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2008, 25: 701-709.
- [11] 元波, 陈洪斌, 刘顺发. Zernike 多项式波面拟合的回归分析方法[J]. *光学精密工程*, 2007, 15(3): 396-400.  
YUAN B, CHEN H B, LIU SH F. Regression analysis of wavefront fitting using Zernike polynomial [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(3): 396-400. (in Chinese)
- [12] 刘志祥. 大口径光学系统波前分析技术研究[D]. 长春: 长春精密光学机械与物理研究所, 2008.  
LIU ZH X. *Study on the wavefront analysis of large aperture optical system* [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, 2008. (in Chinese)
- [13] JEAN J D, PAUL M, DAVID M, *et al.*. Advanced image processing and wavefront sensing with real-time phase diversity [J]. *Applied Op-*

tics, 2009, 48(1): 30-34.

- [14] 徐正平, 翟林培, 葛文奇, 等. 亚像元的 CCD 几何超分辨方法[J]. 光学 精密工程, 2008, 16(12): 2447-2453.  
XU ZH P, ZHAI L P, GE W Q, *et al.*. CCD geometric superresolution method based on subpixel

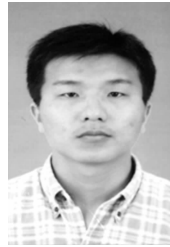
[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(12): 2447-2453. (in Chinese)

- [15] DAVIA A C, BRISN J T, RICHSRD G P, *et al.*. Aberration correction of segmented-aperture telescopes by using phase diversity[J]. *SPIE*, 2000, 4123: 56-63.

#### 作者简介:



**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 年在中科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, 主要从事光学检测和光电成像系统性能测评的研究。E-mail: dongmei\_ma2002@yahoo. com. cn



**刘志祥**(1982—), 男, 湖北大冶人, 主要研究方向为光学检测。E-mail: liuzx82@126. com



**陈土泉**(1984—), 男, 广东湛江人, 硕士研究生, 2008 年于南京理工大学获得学士学位, 主要从事光学检测和光电成像系统性能测评的研究。E-mail: myctq@163. com



**聂真威**(1982—), 男, 辽宁鞍山人, 2005 年于大连理工大学获学士学位, 主要从事光学系统像质评价与检测的研究。E-mail: niezhw@ciomp. ac. cn

#### ●下期预告

## CR 扫描仪激光扫描光学系统设计

郑 猛<sup>1</sup>, 冯其波<sup>1</sup>, 邵双运<sup>1</sup>, 丁克勤<sup>2</sup>

(1. 北京交通大学 理学院, 北京 100044; 2. 中国特种设备检测研究院, 北京 100013)

设计了一种适合于计算机 X 射线扫描仪的新型激光扫描系统, 系统空间分辨率为 10 lp/mm。在分析常用扫描结构的基础上, 用五角棱镜和聚焦物镜组成扫描臂以取代传统的  $F\theta$  镜头, 利用成像板的柔性制成圆弧形进片。同时扫描臂又用作接收器件来收集激发出的荧光, 使得系统性能提高, 结构简单。利用所设计光学系统, 实验验证了激光光点大小对分辨率的影响。分析了系统中影响激光光点大小的因素, 对关键部件扫描臂进行了在高转速条件下的有限元仿真, 计算了当入射光与五角棱镜入射面不垂直及五角棱镜存在安置误差时对激光光点大小影响。结果显示所设计的激光扫描光学系统具有一定的容差性和实用性。实验验证了所设计制造的扫描仪的性能, 表明图像具有良好的视觉效果, 能够满足工业检测要求。