

文章编号 1004-924X(2012)03-0492-07

# Shack-Hartmann 波前传感器检测大口径圆对称非球面反射镜

张金平<sup>1,2\*</sup>, 张学军<sup>1</sup>, 张忠玉<sup>1</sup>, 郑立功<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 中国科学院光学系统先进制造技术重点实验室, 吉林 长春 130033; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

**摘要:**针对大口径非球面反射镜在研磨阶段后期其面形与理想面形存在较大偏差,且表面粗糙度较大、反射率较低,采用轮廓仪和普通干涉仪检测无法满足测试要求等问题,提出采用动态范围大且精度高的 Shack-Hartmann 波前传感器来检测大口径非球面反射镜。研究分析了 Shack-Hartmann 波前传感器检测系统的原理及系统误差并编写了相应的数据处理软件。为了验证该方法的可行性,对已经加工完成的 350 mm 口径旋转对称双曲面面形进行了检测,测量得到的面形误差 PV 值、RMS 值分别为  $0.388\lambda$ 、 $0.043\lambda$  ( $\lambda=632.8$  nm); 与干涉测量的标准结果进行了对比,得到的面形偏差 PV 值、RMS 值分别为  $0.014\lambda$  和  $0.001\lambda$ 。对比结果表明, Shack-Hartmann 波前传感器的测量结果正确可靠,从而验证了 Shack-Hartmann 波前传感器检测大口径非球面反射镜的可行性。

**关键词:** Shack-Hartmann 波前传感器; 轮廓仪; 非球面反射镜; 大口径反射镜; 相对测量

**中图分类号:** TQ171.65; O439 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20122003.0492

## Test of rotationally symmetric aspheric surface using Shack-Hartmann wavefront sensor

ZHANG Jin-ping<sup>1,2\*</sup>, ZHANG Xue-jun<sup>1</sup>, ZHANG Zhong-yu<sup>1</sup>, ZHENG Li-gong<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Optical System Advanced Manufacturing Technology, 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)

\* Corresponding author, E-mail: blueapple7758@163.com

**Abstract:** As the surface shape of a reflection mirror is different from the target shape at the end stage of the grinding process, and the profilometers and common interferometers can not measure the surface error exactly, this paper proposed a method to measure the large aperture aspheric surface by using a Shack-Hartmann Wavefront Sensor (SHWS) with a large dynamic range and high precision. The principle of the measuring system for SHWS was researched, its measuring errors were analyzed and a corresponding data processing software was compiled. Using a simulation reference file, a hyperboloid reflection mirror with a diameter of 350 mm was tested by the SHWS. Results indicate that

收稿日期: 2010-09-25; 修订日期: 2011-03-24.

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (No. 61036015)

the PV and RMS of the surface error are  $0.388\lambda$  and  $0.043\lambda$ , respectively ( $\lambda=632.8\text{ nm}$ ). In order to testify the measurement result, the mirror is also measured by an interferometer with a null compensator. Comparing the two testing results, the PV and RMS of the deviation are  $0.014\lambda$  and  $0.001\lambda$ , respectively, which proves the feasibility of measuring large aperture aspheric surfaces by SHWSs.

**Key words:** Shack-Hartmann wavefront sensor; profilometer; aspheric mirror; large aperture mirror relative measurement

## 1 引言

随着非球面光学元件在空间项目中的广泛应用,不同种类的非球面反射镜相继产生,同时也增加了非球面反射镜加工和检测的难度,特别是检测的难度。目前,国内外各个光学制造中心采用的大口径非球面反射镜的检测方法随加工阶段的不同而不同:在研磨阶段多采用轮廓仪、扫描五棱镜等仪器,在抛光阶段多采用干涉仪与补偿器相结合的零位检测;但在研磨阶段后期、抛光阶段初期,轮廓仪的测量误差对测量结果的影响较大,其测量精度在  $1\sim 10\ \mu\text{m}$ ,不能满足加工要求,造成加工效率降低,而此时反射镜面形与理想面形还存在较大偏差,且表面光洁度较低,采用普通干涉仪检测时部分光线不能返回而无法进行全口径检测。一些单位采用红外干涉仪对此阶段的大口径非球面反射镜进行面形检测,但红外干涉仪价格昂贵、操作复杂且检测时间长。因此,需要寻找一种新的检测方法来解决此过渡阶段大口径非球面镜的面形检测问题。

基于波前斜率测量的 Shack-Hartmann 传感器 (Shack-Hartmann Wavefront Sensor, SHWS),由于其抗环境干扰能力强,动态范围大且精度较高而得到普遍应用<sup>[1-7]</sup>。鉴于此,本文提出采用 SHWS 对大口径非球面镜研磨阶段到抛光阶段之间过渡期的面形进行非零位检测。所谓非零位检测是指对光学元件进行检测时不加入补偿器等其它辅助元件,探测器接收到的波前相位未得到补偿。这样做不需要在硬件上进行相位补偿,而是在后端的数据处理中对检测结果进行补偿,从而降低了对检测系统硬件的要求,便于检测。本文研究了 SHWS 检测系统的原理并分析了其系统误差,通过对已加工完成的  $350\text{ mm}$  口径圆对称双曲面进行检测,验证了理论分析的正确性和检测过程的可行性,从而证明了利用 SHWS 对

大口径非球面反射镜进行非零位检测的有效性。

## 2 Shack-Hartmann 波前传感器原理

SHWS 的原理基于波前斜率检测,其结构主要由微透镜阵列和 CCD/CMOS 组成<sup>[8]</sup>,如图 1 所示。探测波前经微透镜阵列分光后聚焦到探测器的接收面上,形成一个光斑阵列。各个光斑质心位置相对各自孔径中心的偏移量与当前孔径内的波前平均斜率相关,如下式所示:

$$\frac{f}{S_{\text{sub}}}\iint\frac{\partial W(x,y)}{\partial x}dxdy=\Delta x,$$

$$\frac{f}{S_{\text{sub}}}\iint\frac{\partial W(x,y)}{\partial y}dxdy=\Delta y,$$
(1)

其中,  $W(x,y)$  为探测波前相位;  $\Delta x, \Delta y$  为光斑相对于中心位置的偏离量;  $f$  为微透镜焦距;  $S$  为子孔径面积。

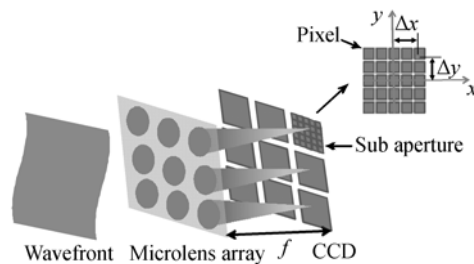


图1 SHWS 传感器原理示意图

Fig. 1 Principle of SHWS

首先利用质心算法求出每个光斑质心相对中心位置的偏离量,再根据波前重构算法重构出探测波前<sup>[9-11]</sup>。波前重构的方法主要有区域法和模式法。在光学元件检测中,由于模式法波前重构在像差分析、模式控制方面优于区域法,所以本文选择模式法进行波前重构,即波前相位可用正交的 Zernike 多项式展开为如下表示形式:

$$W(x,y)=\sum_{k=1}^N C_k Z_k(x,y),$$
(2)

其中,  $C_k$  为 Zernike 多项式的系数。把式(2)代入

式(1)可以得到:

$$\frac{f}{S} \sum_{k=1}^N C_k \iint_{\text{sub}} \frac{\partial Z_k(x, y)}{\partial x} dx dy = \Delta x,$$

$$\frac{f}{S} \sum_{k=1}^N C_k \iint_{\text{sub}} \frac{\partial Z_k(x, y)}{\partial y} dx dy = \Delta y. \quad (3)$$

由于采样是离散化的,式(3)可改写成矩阵形式:

$$\mathbf{G} = \nabla \mathbf{Z} \cdot \mathbf{C}. \quad (4)$$

其中,  $\mathbf{G}$  为  $2M \times 1$  的斜率向量,  $\nabla \mathbf{Z}$  为  $2M \times N$  矩阵,  $\mathbf{C}$  为  $N \times 1$  系数列向量,  $M$  为采集点数目,  $N$  为多项式项数。通过求解最小二乘意义下  $\nabla \mathbf{Z}$  的广义逆矩阵  $(\nabla \mathbf{Z})^{-}$  求出 Zernike 多项式的系数向量  $\mathbf{C}$ , 代入式(2)便可得到探测波前。

### 3 检测装置选取

根据光斑位置参考点的不同, SHWS 分为绝对检测和相对检测。若光斑偏移量以子孔径中心作为参考点来计算, 此种测量方式为绝对检测。若光斑平移量以某一次检测所得到的光斑位置为参考点来计算, 则为相对检测。据此可知, SHWS 对非球面的检测采用相对检测。

SHWS 对大口径非球面进行非零位检测时因波前相位没有得到补偿, 因而探测到的波前含有很大的非球面偏差和系统误差, 必须通过虚拟波前来去除上述误差, 此虚拟波前即作为相对测量时的参考波前。首先, 通过光线追迹软件对理想检测系统进行光线追迹, 得到理论检测波前, 此波前即为非球面与球面之间的偏差引起的波前相位。然后对实际测量系统进行误差标定, 所得结果与理论检测波前相加得到相对检测所用的参考波前。最后, 通过实际检测装置对待检镜进行检测, 所得结果与参考波前相减即可得到反射镜的面形误差。检测流程图如图 2 所示。

本文的检测对象是已经加工完成的口径为 350 mm、 $R=4\ 188.04\ \text{mm}$ 、 $k=-2.816\ 915$  的旋转对称双曲面, 检测装置如图 3 所示。

经光纤发出的激光可看作点光源, 经过两次准直系统后转变为标准球面波, 此球面波经过反射镜反射回来再次经过准直系统后转变为近平面波。传感器检测到的是包含反射镜表面误差的近平面波。

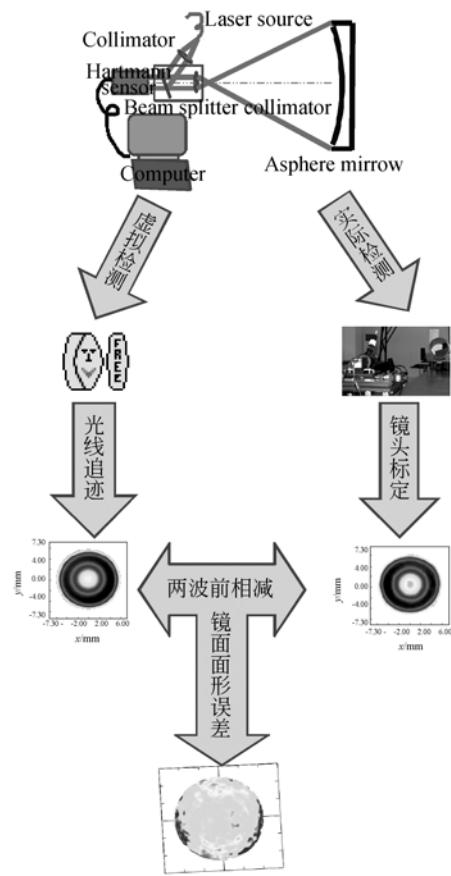


图 2 SHWS 检测非球面的流程图  
Fig. 2 Flow chart of test with SHWS

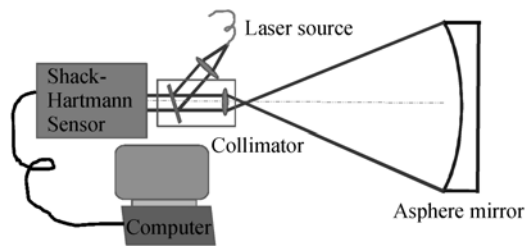


图 3 测量装置示意图  
Fig. 3 Sketch map of testing setup

## 4 系统误差分析

### 4.1 误差来源

图 3 所示理想检测系统的误差来源可分为非球面与顶点球面之间的波前偏差  $A$ , 准直系统设计本身的误差  $D$  和光线返回时的非共路误差  $N_{\text{asphere}}$  [12-14]:

$$W_{\text{ideal}} = A + D + N_{\text{asphere}}. \quad (5)$$

在实际检测系统中,还包括传感器本身的制造组装误差  $F$ ,准直系统制造组装误差  $C$ ,反射镜的调整误差  $M$ ,以及反射镜面形误差  $\Sigma$ ,可表示为:

$$W_m - W_{ideal} = M + F + C + 2\Sigma, \quad (6)$$

其中,  $W_m$  为实际检测波前像差。通过上述分析,反射镜面形误差  $\Sigma$  与其它误差实现了分离。

#### 4.2 系统误差的去除

分离出镜面误差  $\Sigma$  后,需要对其它误差进行处理。在实际测量时,反射镜位置可调,可以认为  $M=0$ ;而传感器本身经过精密装调和校准,其检测误差优于  $\lambda/100$ ,在此认为  $F=0$ 。

将检测系统模型导入 Zemax 等光学设计软件,并借助光线追迹方法对系统进行光线追迹,所得波前像差即为  $W_{ideal}$ 。

准直系统制造组装误差  $C$  是系统误差的一部分,需要对准直系统进行标定。对于给定  $F$  数的非球面反射镜,要合理地选择传感器准直系统的  $F$  数,两者需满足下列关系式:

$$F_{\text{mirror}}^{\#} > F_{\text{collimation}}^{\#}.$$

为了最大程度地利用传感器,通常准直系统的  $F$  数应略小于反射镜的  $F$  数。本文检测的反射镜  $F$  数为 11.9,所以选择  $F$  数为 10 的准直系统,组装好传感器后,用一面形误差 RMS 优于  $\lambda/50$  的标准镜对仪器进行标定,此时标定结果包含的误差项为:

$$W_{\text{sphere-p}} = D + N_{\text{sphere-p}} + C, \quad (7)$$

其中  $W_{\text{sphere-p}}$  为检测球面镜时的实际系统误差,  $N_{\text{sphere-p}}$  表示实际球面镜的非共路误差。至此,检

测系统的误差源均已找到并给出其去除办法。

#### 4.3 参考波前的产生

由上面的分析可知,检测非球面反射镜需要采用相对检测,即在实际测量中需要一个参考波前来去除实际检测系统的系统波前像差  $W_{\text{sphere-p}}$ 。而经 4.1 分析可知,实际检测系统的误差为  $A$ ,  $D$ ,  $N_{\text{asphere-p}}$ ,  $C$  四项,即:

$$W_{\text{reference}} = A + D + N_{\text{asphere-p}} + C, \quad (8)$$

其中  $N_{\text{asphere-p}}$  为实际非球面反射镜的非共路误差。而在 4.1、4.2 中,又分别得到误差项式(5)和式(7),两式相加可得误差项:

$$W = A + D + N_{\text{asphere}} + D + N_{\text{asphere-p}} + C. \quad (9)$$

需要说明的是,准直系统的制造误差和装配误差对非共路误差的影响很小,而检测球面镜的非共路误差则几乎等于 0,可以认为

$N_{\text{asphere}} = N_{\text{asphere-p}}$ ,  $N_{\text{sphere}} = N_{\text{sphere-p}} = 0$ ,则式(9)可改写为:

$$W = (A + D + N_{\text{asphere-p}} + C) + D, \quad (10)$$

将式(8)代入式(10)可得:

$$W_{\text{reference}} = W - D. \quad (11)$$

而上式中的  $D$  刚好为准直系统设计本身的误差。因此只需将光学设计软件中的理想系统检测非球面改为检测球面镜并进行光线追迹,得到的误差即为  $D$ 。通过以上误差组合就得到了检测非球面反射镜的系统误差,而此组合所表示的波前像差正是 SHWS 相对检测中用到的参考波前所代表的像差。文中用于检测大口径圆对称非球面参考波前的合成过程如图 5 所示。

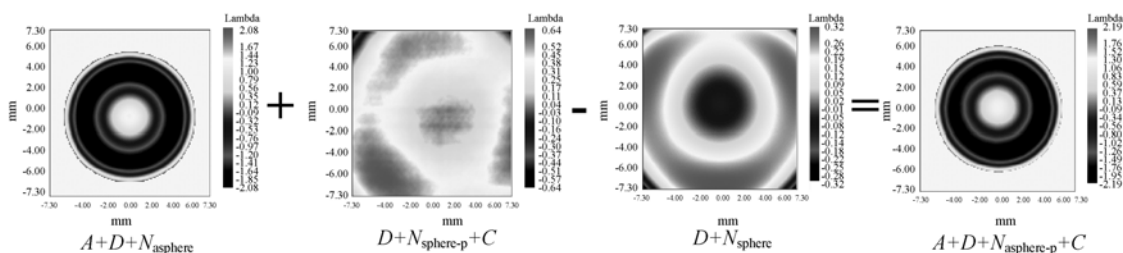


图 5 参考波前的合成

Fig. 5 Combination of reference wavefront using existence wavefronts

## 5 实验结果及分析

检测装置如图 3 所示。检测时要保证反射镜

的旋转对称轴与 SHWS 出射球面波的旋转对称轴重合。SHWS 固定在三维平动调整架上,将反射镜安装在二维精密转台上,可以精确调整反射镜的俯仰和扭摆。所有检测装置都固定在防振气

浮平台上,以减少外界影响。检测系统实际装置如图 6 所示。

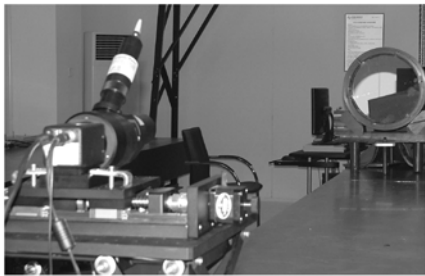


图 6 测量装置实物图  
Fig. 6 Photo of testing setup

由于是相对检测,要求检测波前与参考波前位置要一致,否则会引入额外误差。所以在检测过程中,SHWS 与反射镜的实际相对位置必须与光学设计软件中理想系统的 SHWS 与反射镜的相对位置严格一致。因此,在检测过程中需要反复调整反射镜的俯仰和扭摆、传感器的平移,直至探测到的波前与参考波前的有效区域重叠且不出现彗差。两者严格重合后探测波前与参考波前相减,得到的波前误差即为反射镜的面形误差,其结果如图 7 所示。

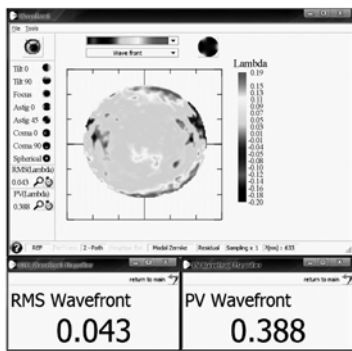


图 7 测量结果  
Fig. 7 Result of test

镜面坐标经反射镜反射后,光轴方向与传感器光轴方向相反,导致测量结果与实际镜面面形误差数值相反,上下对置,经自行编写的程序处理后,结果如图 8 所示。

为了验证 SHWS 检测结果的正确性,将它与零位补偿干涉测量结果进行对比。零位补偿干涉测量中补偿器的设计满足公差要求,并经过严格的装配和标定,其前后 2 个面的面形 RMS 分别优于  $\lambda/60$ 、 $\lambda/100$ ,因此可以认为该补

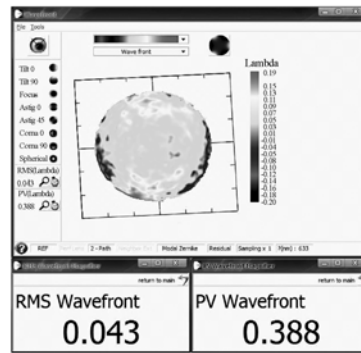


图 8 处理后的测量结果  
Fig. 8 Wavefront after processing

偿检测结果是准确可靠的。图 9 所示即为零位补偿干涉测量的结果,其面形误差的 PV 值和 RMS 值分别为  $0.374\lambda$ 、 $0.042\lambda$ 。由图 8 可知 SHWS 测量的面形误差的 PV 值和 RMS 值分别为  $0.388\lambda$ 、 $0.043\lambda$ 。两种方法所测得的 PV 值和 RMS 值之差仅为  $0.014\lambda$  和  $0.001\lambda$ ,且从图 8 和图 9 可看出 SHWS 检测得到的面形误差分布与零位补偿检测得到的面形误差分布几乎是一致的,从而证明了 SHWS 检测非球面反射镜的结果是准确的,对其检测系统的原理和误差分析是正确的。

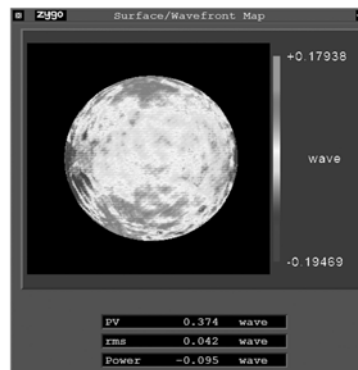


图 9 零位补偿的干涉测量结果  
Fig. 9 Measurement result using interferometer with null compensation

但图 8 与图 9 所示的面形细节处还略有差别,这是因为 SHWS 的采样点频率较干涉仪小很多,无法提供与干涉仪相比的细节,不能有效地检测高频误差。这说明 SHWS 适用于研磨后期、粗抛光加工阶段的中低频镜面的面形检测,而对于精抛光过程,镜面的面形检测主要还是由干涉仪与补偿器相结合的零位补偿干涉测量来完成。

## 6 结 论

本文提出了应用 SHWS 对大口径非球面反射镜进行非零位检测的方法。为了验证该方法的可行性,对已加工完成的口径为 350 mm 旋转对称双曲面进行了测量,并对测量结果与零位补偿干涉测量的标准结果进行了对比。结果表明,SHWS 的测量结果是正确的,可以采用 SHWS 对大口径非球面反射镜的面形进行非零位

检测。该方法适用于反射镜从研磨阶段后期到粗抛光阶段的面形检测,从而解决了此阶段轮廓仪测量精度的不足及普通干涉仪无法进行全口径检测的问题,并提高了此阶段的加工效率。

文中检测的是回转对称非球面,而对离轴非球面,原理上是可以检测的,但是由于检测时的像差项与回转对称非球面不同,因此出现的问题会有所不同。下一步将研究 SHWS 对离轴非球面的检测,以扩大 SHWS 的应用范围。

### 参考文献:

- [1] 饶学军,凌宁,王成,等. 哈特曼-夏克传感器在非球面加工中的应用[J]. 光学学报,2002(4):491-494.  
RAO X J, LING N, WANG CH, *et al.*. Application of Hartmann-Shack sensor in aspheric process[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002(4):491-484. (in Chinese)
- [2] 程少园,曹召良,胡立发,等. 用夏克-哈特曼探测器测量人眼波前像差[J]. 光学精密工程,2010,18(5):1060-1067.  
CHENG SH Y, CAO ZH L, HU L F, *et al.*. Measurement of wavefront aberrations of human eyes with Shack-Hartmann wavefront sensor[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(5): 1060-1067. (in Chinese)
- [3] YANG H S, LEE Y W, SONG J B, *et al.*. Null Hartmann test for the fabrication of large aspheric surfaces [J]. *Opt. Exp.*, 2005:1839-1847.
- [4] PFUND J, LINDLEIN N, SCHWIDER J, *et al.*. Absolute sphericity measurement: a comparative study of the use of interferometry and a Shack-Hartmann sensor[J]. *Opt. Lett.*, 1998, 23:742-744.
- [5] NOVAK J, NOVAK P, MIKS A, *et al.*. Application of Shack-Hartmann wavefront sensor for testing optical systems[J]. *SPIE*, 2007, 6609(15): 1-11.
- [6] 刘春阳,朱秋东. 自准直哈特曼波前测量装置的研制[J]. 光学技术,2008,38(1):98-104.  
LIU CH Y, ZHU Q D. The development of self-referenced Hartmann wavefront sensor [J]. *Optical Technique*, 2008, 38(1):98-104. (in Chinese)
- [7] 夏明亮,李抄,刘肇南,等. Shack-Hartmann 波前传感器图像自适应阈值的选择[J]. 光学精密工程,2010,18(2): 334-340.  
XIA M L, LI CH, LIU ZH N, *et al.*. Adaptive threshold selection method for Shack-Hartmann wavefront sensors[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(2):334-340. (in Chinese)
- [8] MALACARA D. *Optical Shop Testing*[M]. New York:Wiley,2007.
- [9] SOUTHWELL W H. Wavefront estimation from wave-front slope measurements [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1980, 70:998-1006.
- [10] 曹正林,廖文和,沈建新,等. Zernike 多项式拟合人眼波前像差的一种新算法[J]. 光学精密工程,2006,14(2):308-314.  
CHAO ZH L, LIAO W H, SHEN J X. A new algorithm for human eye's wave-front aberration fitting with Zernike polynomial [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(2):308-314. (in Chinese)
- [11] 李华强,宋贺伦,饶长辉,等. 增大夏克-哈特曼波前传感器动态测量范围的方法[J]. 光学精密工程,2008,16(7):1203-1207  
LI H Q, SONG H L, RAO CH H, *et al.*. Extrapolation method to extend dynamic range of Shack-Hartmann wave-front sensor [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(7):1203-1207. (in Chinese)
- [12] PFUND J, LINDLEIN N, SCHWIDER J. Misalignment effects of the Shack-Hartmann sensor [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1998, 37(1):22-27.
- [13] NEAL D R, ARMSTRONG D J, TURNER W T. Wavefront sensors for control and process monitoring in optics manufacture[J]. *SPIE*, 1997, 2993: 211-220.
- [14] PFUND J, LINDLEIN N, SCHWIDER J. Non-null testing of rotationally symmetric aspheres: a systematic error assessment[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 2001, 40(4):439-446.

## 作者简介:



张金平(1984—),男,山东沂水人,博士研究生,2007年于聊城大学获学士学位,主要从事光学加工与检测方面的工作。E-mail: blueapple7758@163.com



张忠玉(1964—),男,吉林集安人,研究员,1988年于武汉测绘科技大学获学士学位,主要研究方向为光学超精密加工与检测。E-mail: zhangzy5598@yahoo.com.cn



郑立功(1969—),男,吉林长春人,研究员,1992年于吉林工业大学获得工学学士学位,2003年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得理学博士学位,主要从事非球面加工及检验技术的研究。E-mail: ligongz@yahoo.com



张学军(1968—),男,吉林开通人,博士生导师,研究员,中科院百人计划获得者,1990年于吉林工业大学获得学士学位,1997年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得理学博士学位,主要从事空间光学系统超精加工与检测方面的研究工作。E-mail: zxj@ciomp.ac.cn

## ● 下期预告

## 基于小波包特征提取及支持向量回归机的 FBG 冲击定位

芦吉云\*, 王帮峰, 梁大开  
(南京航空航天大学, 江苏 南京 210016)

以光纤布拉格光栅(FBG)作为传感网络,构建了复合材料冲击载荷实时在线监测系统,研究了基于小波包特征提取及支持向量回归机的光纤-碳纤维复合材料结构冲击定位方法。针对同一冲击点,不同传感信号进行分析,获得冲击响应信号小波包能量谱,数据分析结果表明小波包能量谱中特定阶数对冲击敏感。改变冲击点位置研究小波包能量谱与冲击位置之间的关系,提出将第6阶小波包能量值作为冲击定位的特征向量。采用支持向量回归机建立样本数据的回归模型预测冲击载荷位置,对支持向量机的相关调整参数进行了优化,实验表明:支持向量机的网络测试误差为4.81%。研究结果将为碳纤维复合材料(CFRP)层状结构的冲击性能评估提供一个切实可行的实验方法。