

文章编号 1004-924X(2011)06-1185-07

应用条纹投影法测量薄膜反射镜的成形

张 鹏^{1,2*}, 张 元¹, 金 光¹, 钟 兴¹, 张 雷¹, 姚劲松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 研究生院, 北京 100039)

摘要:针对国内外现有薄膜反射镜面形检测方法存在动态测量不便, 测量面形单一等问题, 提出了基于正弦条纹投影的反射镜面形测量方法。基于此方法搭建了测量平台, 分析推导显示, 该方法的测量不确定度 $<0.385\ \mu\text{m}$, 该平台的测量不确定度 $<4.25\ \mu\text{m}$ 。在此平台上对标准球面镜进行了测量, 验证了此平台的适用性。最后, 对优化控制下的 $\Phi 300\ \text{mm}$ 静电拉伸薄膜反射镜的面形进行了多次测量, 结果表明, 中心矢高测量值与理论值基本一致, 优化后最佳镜面面形 RMS 值为 $5\ \mu\text{m}$, PV 值为 $39\ \mu\text{m}$, 相对于优化前 RMS 值减少了 34.17% , PV 值减少了 26.4% , 显示所搭建的基于正弦条纹投影方法的测量平台满足了现阶段薄膜反射镜面形测量的需要; 而提出的面形控制算法可控制薄膜反射镜得到所需面形, 并有效地提高面形精度。

关 键 词:薄膜反射镜; 面形测量; 正弦条纹投影; 优化控制

中图分类号: TH751; TH703 文献标识码: A doi: 10.3788/OPE.20111906.1185

Measurement of space membrane mirror shaping based on fringe projection

ZHANG Peng^{1,2*}, ZHANG Yuan¹, JIN Guang¹, ZHONG Xing¹, ZHANG Lei¹, YAO Jin-song¹

(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)*

* *Corresponding author, E-mail: zpjg1021.student@sina.com*

Abstract: In consideration of the inconvenience of dynamic measurement and the measuring limitation for surface shapes of mirrors in existing measuring method, a shape measurement method based on sinusoidal fringe projection was proposed, and a test platform was built. Analysis and deduction indicates that the measurement uncertainty of the method is less than $0.385\ \mu\text{m}$ and that of the platform is less than $4.25\ \mu\text{m}$. A standard spherical mirror was measured on this test platform to verify the feasibility of the platform. Finally, surface figures and surface figure errors of a $\Phi 300\ \text{mm}$ electrostatic stretching membrane mirror were measured with the proposed method and surface shape control algorithm. Results show that the measured values of center sag are consistent with theoretical ones. Furthermore, the RMS and PV values of shape surface are $5.214\ \mu\text{m}$ and $39.327\ \mu\text{m}$, which has reduced

收稿日期: 2010-06-23; 修订日期: 2010-09-03.

基金项目: 国家 863 高技术研究发展计划资助项目 (No. 2007AA12Z113)

about 30.17% and 23.7%, respectively. The results display that the shape measurement platform based on sinusoidal fringe projection meets the need of membrane mirrors for shape measurement and the membrane mirror surface shape control algorithm can control the membrane mirror to obtain the required surface shape and improve the surface accuracy.

Key words: membrane mirror; figure measurement; sinusoidal fringe projection; optimization control

1 引言

近年来,以柔性薄膜为基底材料的新概念反射镜受到了国内外相关学者的极大关注。与其他的传统大口径反射镜相比,薄膜反射镜应用于空间领域具有加工周期短、成本低、收藏体积小、展开可靠性高、重量轻等十分明显的优点^[1-2]。因此,研究薄膜反射镜在空间光学领域的应用有着巨大的潜质。

进一步研究薄膜反射镜的成形控制方法需要反射镜的面形测量值作为回馈和验证。目前美国国家航空航天局(NASA)马歇尔空间飞行中心和 SRS 科学学会采用朗奇法测量了 $\Phi 410$ mm 口径薄膜反射镜的球面面形^[3]。美国空军研究实验室用哈德曼法测量了 $\Phi 279.4$ mm (11 in) 口径薄膜反射镜的球面面形^[4]。SRS 科学学会采用了网格成像法测量 $\Phi 1$ m 口径静电薄膜反射镜曲面面形,定性分析了薄膜成形过程和单电极影响^[5]。亚利桑那大学提出使用补偿检验的方法测量 $\Phi 152.4$ mm (6 in) 口径薄膜反射镜的抛物面面形^[6]。国内齐迎春提出了用传统零位检验的方法来测量薄膜反射镜的抛物面面形^[7]。

实验显示,朗奇法和哈德曼法测量时需要不断寻找光汇聚点,而且在薄膜变小形,焦距长的情况下无法进行测量;网格成像法只适用于定性分析,无法实现面形定量测量;而传统的零位检验法无法对焦距不固定的薄膜反射镜进行面形测量。所以原有的薄膜反射镜面形测量方法存在局限性,不适合作为现阶段薄膜反射镜面形测量的方法。

基于上述原因,本文提出了基于正弦条纹投影的反射镜面形测量方法,搭建了测量平台,并在此平台上对优化控制下的 $\Phi 300$ mm 静电拉伸薄膜反射镜面形进行了多次测量,给出并分析了测试结果。

2 薄膜反射镜初步测量

首先,通过分析薄膜表面粗糙度和测量通电前薄膜反射镜的平面面形来确定薄膜反射镜面形精度范围,用于确定薄膜反射镜面形测量的方法。

采用 WYKO 光学轮廓仪测量薄膜的表面粗糙度,表面粗糙度实验结果如图 1 所示: R_a (Surface Roughness Average) 为 153.74 nm, R_q (RMS Surface Roughness) 为 230.01 nm。另外利用 Zygo 干涉仪测量通电前薄膜反射镜平面的面形质量如图 2 所示, PV 值为 9.795λ , RMS 值为 1.026λ ($\lambda = 632.8$ nm)。

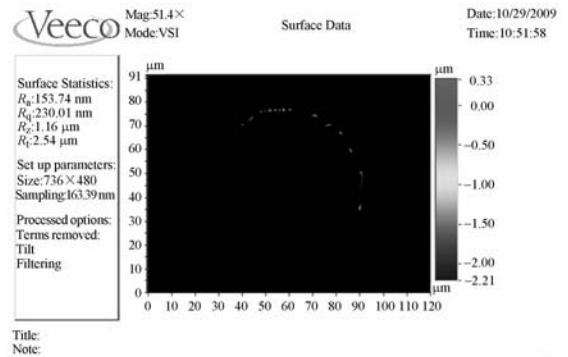


图 1 薄膜表面粗糙度测量结果

Fig. 1 Surface roughness measurement of membrane samples

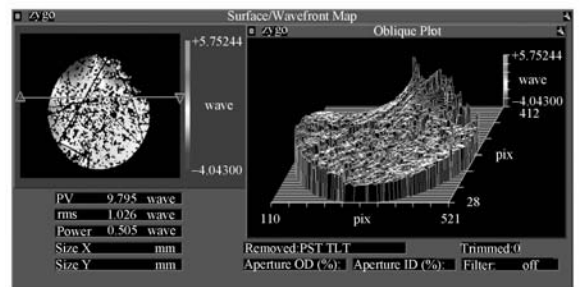


图 2 薄膜反射镜中心 $\Phi 100$ mm 口径内平面面形测量结果
Fig. 2 Flat film testing of $\Phi 100$ mm aperture in membrane mirror

从图1看到,薄膜表面粗糙度在 $1/4\lambda$ 左右,直接限制了薄膜反射镜的最高面形精度。另外图2面形测量中有些没有干涉条纹的区域,这是由薄膜材料本身的表面粗糙超度出了干涉仪的量程,而且存在小褶皱致使薄膜表面相应区域反射的光无法回到干涉仪的入瞳造成的。这从一个侧面反映了现有的镀铝聚酰亚胺薄膜材料的质量还达不到用干涉仪测量其面形的水平,因此要测量这种材料薄膜反射镜的面形精度需要求助于其他的测量方法;换言之,要使薄膜反射镜最终达到高质量成像水平,需要进一步改善薄膜材料的质量。

目前静电拉伸薄膜反射镜正处于面形控制实验研究阶段,要求薄膜反射镜面形控制方法能对以抛物面为目标的不同焦距曲面成形。所以从初步实验结果和实验需求的基础上可以归纳出薄膜反射镜面形测量有如下特点:

(1)在现有实验条件下,使用普通聚酰亚胺薄膜其镀铝表面的粗糙度较差;

(2)面形不固定,随施加电压而改变;

(3)焦距变化范围大,小变形长焦距情况下,传统的测量方法由于空间的限制使用不方便;

(4)由于薄膜本身柔性、刚度小,薄膜面形容易受到环境(气流、振动等)影响,影响面形测试结果。

以上特点决定了薄膜反射镜无论是在平面状态还是曲面状态,都无法通过干涉仪等对测试环境和被测镜都要求较高的常用手段来测量其面形。对各种光学测量方法的研究表明,与传统的面形测量方法相比,条纹投影法具有结构简单、成本低、灵活性高等优点,另外,该方法无需寻找汇聚点就可以直接测量面形,特别适合用于焦距不固定,波前变化范围较大的非球面反射镜。所以,本文选择条纹投影法作为本阶段静电拉伸薄膜反射镜的面形测量方法。

3 条纹投影法

3.1 条纹投影法测量系统及不确定度分析

文献[8]给出基于条纹投影的反射镜面形测量法基本原理,并验证了方法的可行性。依照此原理建立测量系统,测量系统示意图如图3所示,这里对具体测量原理和数据处理过程不做重复论述。

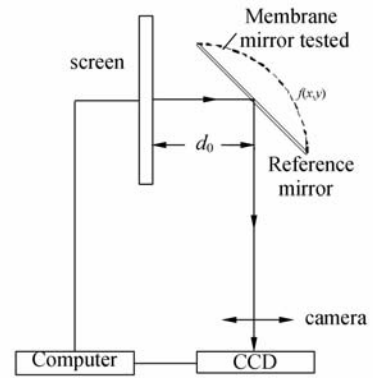


图3 薄膜反射镜面形测量示意图^[8]

Fig. 3 Schematic of test setup for membrane mirror

假设测量的面形为中心挠度值为1 mm的抛物面,令 $f=1, c=0$,根据文献[8]算法公式可知:

$$\phi_x = \frac{2\pi}{p} \left[\left(d_0 + \frac{\sqrt{2}}{2}x \right) \tan(\pi - 2\theta_x) + \frac{\sqrt{2}}{2} \right], \quad (1)$$

$$\phi_y = \frac{2\pi}{p} \left[\left(d_0 + \frac{\sqrt{2}}{2}x - 1 \right) \tan(\pi - 2\theta_x) \right], \quad (2)$$

对式(1)微分得到 $\delta\theta_x$ 引起的相位不确定度如下:

$$\tan \delta\theta_x = \frac{\delta\phi_x p}{-4\pi \left(d_0 + \frac{\sqrt{2}}{2}x \right)}. \quad (3)$$

同理有:

$$\tan \delta\theta_y = \frac{\delta\phi_y p}{-4\pi \left(d_0 + \frac{\sqrt{2}}{2}x - 1 \right)}, \quad (4)$$

所以待测薄膜反射镜表面高度不确定度表示为:

$$\begin{aligned} \delta z = & \delta x \tan \delta\theta_x + \delta y \tan \delta\theta_y = \\ & \delta x \frac{\delta\phi_x p}{-4\pi \left(d_0 + \frac{\sqrt{2}}{2}x \right)} + \delta y \frac{\delta\phi_y p}{-4\pi \left(d_0 + \frac{\sqrt{2}}{2}x - 1 \right)}. \end{aligned} \quad (5)$$

由式(5)可知测量系统高度不确定度 $\delta\theta_x$ 与光栅周期 p ,屏幕到待测面的距离 d_0 ,系统的分辨力 $\delta x, \delta y$,横坐标 x ,以及相位测量的分辨力 $\delta\Phi_x, \delta\Phi_y$ 有关。

从文献[9-10]可知,确定系统的所有参量后,系统的测量不确定度由相位测量不确定度决定,相位理论测量不确定度可达几百分之一波长,但对于实际测量的薄膜反射镜表面部分漫反射和散射导致正弦像模糊,相位测量不确定度 $\delta\Phi_x, \delta\Phi_y$ 经过实测只能达到 $1/25$ 等效波长(周期为25 pixel),在本实验系统中横向和纵向分辨力均为0.294 mm,距离 d_0 为225 mm。

因此,通过式(5)可知 $x=0$ 时,不确定度最大,高度不确定度为 $0.385\mu\text{m}$ 。所以建立的测量平台可以实现亚微米测量,满足静电拉伸薄膜反射镜的现阶段的测量要求。

3.2 测量系统实验验证

采用 matlab 编写测量程序,搭建测量平台。选用分辨率为 $1\,280\times 1\,024$ 的液晶显示屏显示具有 256 灰阶的光栅图样(其物理点距为 0.294 mm ,光栅周期为 25 pixel),图像接收端为连接电脑的 Canon EOS400D 相机,利用电脑实时接受相机拍摄的图像,并做数据处理得到面形测量结果。

为了验证测量程序的可行性和精度,实验室使用条纹投影法测量已知中心矢高值和面形偏差的 $\Phi 60\text{ mm}$ 标准球面镜,该球面镜有效反射镜部分为 $\Phi 54\text{ mm}$,实际曲率半径为 $1\,600\text{ mm}$,中心矢高为 0.228 mm 。测量装置如图 4 所示,测量结果如图 5 和表 1 所示。



图 4 标准球面反射镜面形测量

Fig. 4 Test setup of stand sphere reflector

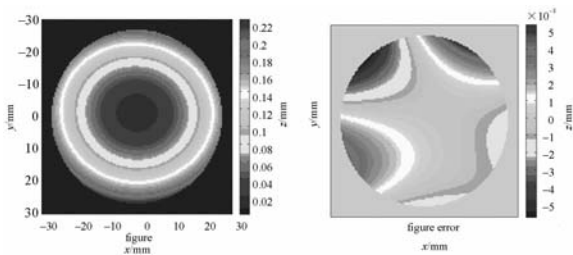


图 5 标准球面反射镜面形及与面形偏差

Fig. 5 Figure and figure error of stand sphere reflector

表 1 标准球面反射镜面形及与面形偏差

Tab. 1 Figures and figure errors of stand sphere reflectors

测量方法	中心矢高 /mm	面形偏差/mm	
		PV	RMS
干涉仪	0.228	小于 $\lambda(\lambda=0.000\,632\,8)$	
条纹投影法	0.222	0.014 04	0.001 093 3

从实验结果可知,测量的中心矢高与干涉仪测量值接近,偏差 $<3\%$,满足现在需要的测量精度要求。面形偏差 RMS 值为 $1.09\mu\text{m}$,PV 值为 $14.04\mu\text{m}$,此测量值与标准镜的干涉仪测量值差别较大。

实验验证结果未能得到应有测量精度,原因在于数据处理的误差。为了保证薄膜反射镜面形测量的实时性,算法实施的过程中,采集后图像被压缩后才进行数据处理。针对试验常用的 307×217 的图像,根据计算,式(5)中的分辨率 δ_x, δ_y 在实际测试系统中为 0.977 mm ,所以中心高度不确定度为 $4.25\mu\text{m}$ 。其次测试系统参数标定,显示器与薄膜反射镜定位误差,扫描引入的光栅误差,也是影响测量精度的原因。

但是因为此标准球面为光学元件,且经过精加工,而根据前文中初步测量结果知道薄膜反射镜的所用的聚酰亚胺膜在平面状态下表面 PV 值就达到了 9.795λ ,和实验平台的测量精度近似,所以此平台适合于现阶段薄膜反射镜的面形测量。

4 薄膜反射镜面形测量与分析

在所搭建的试验平台上对静电薄膜反射镜的面形控制方法进行了验证,被测静电拉伸薄膜反射镜中心与屏幕距离为 225 mm ,测量区域为 $\Phi 300\text{ mm}$,待测镜面中心距 CCD 相机大约为 $2\,800\text{ mm}$ 。图 6 为被测的 $\Phi 300\text{ mm}$ 口径静电拉伸薄膜反射镜及薄膜反射镜中条纹图。

面形控制方法选用有限元数值优化控制法,通过优化薄膜反射镜各部分的载荷达到面形优化的目的。借助优化结果调整各环电压,优化前后的电压值和面形偏差如表 2。在测试平台上采集光栅移相图。经过计算处理获得了三环电极控制所得的面形,并通过去除边界影响得到面形三维轮廓,进一步通过 Zernike 多项式拟合,去除了离

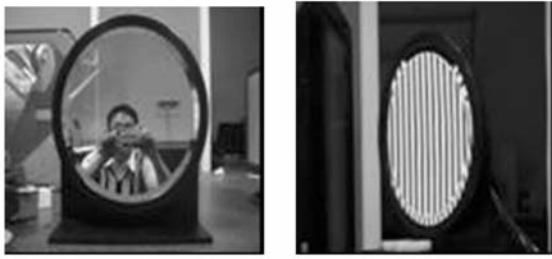


图 6 薄膜反射镜装置和条纹图
Fig. 6 Membrane mirror and fringe

焦、倾斜等影响,得到面形及与标准抛物面的偏差 PV 和 RMS 值,测量数据如表 3,图 7 所示。

表 2 优化前后电压值和面形偏差

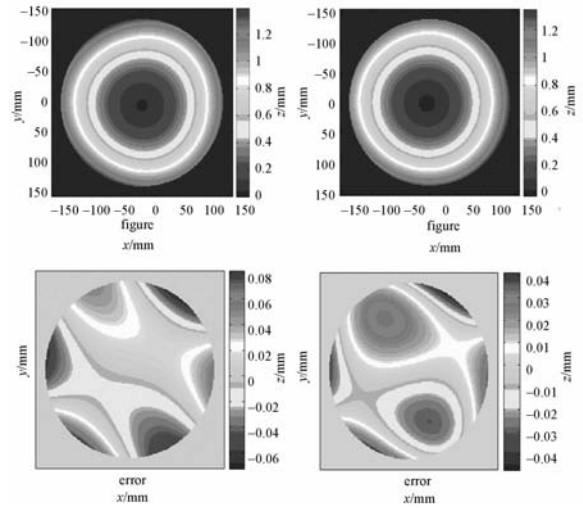
Tab. 2 Voltages and figure errors before and after optimizations

序号	施加电压/V		面形偏差 RMS/mm	
	优化前	优化后	优化前	优化后
1	4000	4 011. 4	0. 002 539	0. 000 400
	4000	3 922. 3		
	4000	3911. 9		
2	5000	5 050. 3	0. 005 386	0. 000 872
	5000	4891. 4		
	5000	4 788. 3		

表 3 优化前后的面形测量数据

Tab. 3 Figure data before and after optimizations

序号		中心矢高/mm		面形偏差/mm	
		实测	理论	PV	RMS
1	优化前	0. 812	0. 820	0. 053	0. 008
	优化后	0. 825	0. 817	0. 039	0. 005
2	优化前	1. 370	1. 209	0. 150	0. 025
	优化后	1. 370	1. 218	0. 089	0. 017



(a) 优化前 (b) 优化后
(a) Before optimization (b) After optimization

图 7 薄膜反射镜面形及面形偏差值

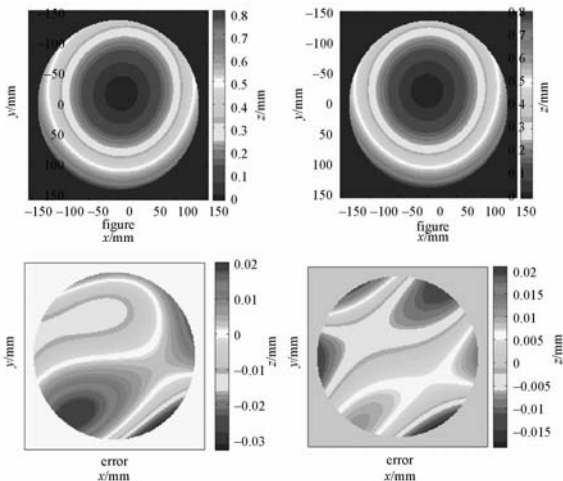
Fig. 7 Figures and figure errors of membrane mirror

从表 3 可知,中心矢高测量值与理论值基本一致,证明了薄膜面形控制方法的正确性。第一组实验结果面形误差优化后 RMS 值相对于优化前减少了 34. 17%,PV 值减少了 26. 37%;第二组实验结果面形误差优化后 RMS 值相对于优化前减少了 40. 93%,PV 值减少了 29. 67%,优化后加载面形明显好于均布加载面形,验证了有限元数值优化载荷分布的面形优化作用,有效提高了薄膜反射镜的面形精度。实验结果面形 RMS 值大于理论值,主要原因是实验中机械结构等硬件引入的误差影响了面形精度的提高。

5 结 论

本文提出了基于正弦条纹投影的反射镜面形测量方法,搭建了测量平台用所搭建的基于正弦条纹投影方法的测量平台测量薄膜反射镜面形,满足了现阶段薄膜反射镜面形测量的需要。分析推导表明,该方法测量不确定度 $<0. 385 \mu\text{m}$,平台的测量不确定度 $<4. 25 \mu\text{m}$,实验验证结果未能得到应有的测量精度原因在于数据处理的误差,另外考虑存在显示器的平面性、定位精度、扫描引入光栅的误差有关。

通过测量平台对 $\Phi 300 \text{ mm}$ 静电拉伸薄膜反射镜的曲面面形进行了测量,中心矢高测量值与



理论基本一致,验证了有限元数值面形优化控制法的有效性,认为该方法可控制薄膜反射镜得到所需面形。优化后,最佳镜面面形 RMS 值为 $5\ \mu\text{m}$, PV 值为 $39\ \mu\text{m}$, RMS 值相对于优化前减少了 34.17%, PV 值减少了 26.4%, 表明优化控制方法可有效提高面形精度;结果也表明薄膜反射

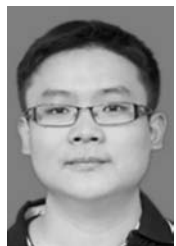
镜机械结构等硬件引入的误差对面形精度也有影响。

实验显示,所搭建的测量系统填补了现阶段薄膜反射镜面形测量的空缺,为进一步研究薄膜反射镜成形控制和提高薄膜反射镜面形精度打下了基础。

参考文献:

- [1] 石广丰,金光,刘春雨,等. 薄膜反射镜的成形控制[J]. 光学精密工程, 2009, 17(4): 732-737.
SHI G F, JIN G, LIU C Y, *et al.*. Shaping control of membrane reflector [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(4): 732-737. (in Chinese)
- [2] 安源,金光,齐迎春,等. 薄膜反射镜的单电极控制静电成形[J]. 光学精密工程, 2009, 17(8): 1964-1970.
AN Y, JIN G, QI Y CH, *et al.*. Control of membrane mirror shape by single electrode [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(8): 1964-1970 (in Chinese)
- [3] PATRICK B G, MOORE J D, BRANTLEY W, *et al.*. Manufacturing and evaluation of membrane optical elements for ultra-lightweight optics [J]. *SPIE*, 2001, 4451: 96-104.
- [4] WILKES J M, JENKINS C H, MARKER D K, *et al.*. Concave membrane mirrors from aspheric to near-parabolic [J]. *SPIE*, 1999, 3760: 213-223.
- [5] MOORE J D, PATRICK J B, GIEROW P A, *et al.*. Design, test, and evaluation of an electrostatically figured membrane mirror [J]. *SPIE*, 2004, 5166: 188-196.
- [6] STAMPER B, ANGEL R. Stretched membrane with electrostatic curvature(SMEC)mirrors for extremely large space telescope [J]. *SPIE*, 2001, 4451: 105-113.
- [7] 齐迎春. 空间薄膜反射镜成像机理研究[D]. 长春: 中科院长春光学精密机械与物理研究所, 2007: 92-96.
QI Y CH. *The research about the imaging principle of the space membrane mirror* [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics Chinese Academy of Sciences. (in Chinese)
- [8] 刘云坤, 苏显渝, 姜美花, 等. 基于相移和非相干成像的反射镜面形测量方法[J]. 光电子激光, 2006, 17(4): 458-463.
LIU Y K, SU X Y, JIANG M H, *et al.*. Shape measurement for reflector based on phase-shift and incoherent imaging [J]. *Journal of Optoelectronics Laser*, 2006, 17(4): 458-463. (in Chinese)
- [9] 刘云坤, 苏显渝, 吴庆阳, 等. 基于条纹反射的类镜面三维面形测量方法[J]. 光学学报, 2006, 26(11): 1636-1640.
LIU Y K, SU X Y, WU Q Y, *et al.*. Three-dimensional shape measurement for specular surface based on fringe reflection [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, 26(11): 1636-1640. (in Chinese)
- [10] BOTHE T, LI W, KOPYLOW C V, *et al.*. High-resolution 3D shape measurement on specular surfaces by fringe reflection [J]. *SPIE*, 2003, 5457: 411-422.

作者简介:



张鹏(1985—),男,福建龙岩人,博士研究生,2007年于长春理工大学获得学士学位,主要从事空间光学技术应用的研究。E-mail: zpjg1021. student@sina.com



张元(1985—),男,吉林省吉林市人,研究实习员,2007年、2009年于哈尔滨工业大学分别获得学士和硕士学位,主要从事空间光学技术应用的研究。E-mail: zhangyuanfresh@126.com



金光(1958—),男,吉林长春人,研究员,博士生导师,中科院长春光学精密机械与物理研究所新技术研究室主任,主要从事空间遥感相机总体设计的研究。E-mail: jing@ciomp. ac. cn



张雷(1982—),男,山东菏泽人,助理研究员,2008年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,研究方向为光学仪器设计与分析。E-mail: zhangleisong@tom. com



钟兴(1982—),男,四川自贡人,助理研究员,2004年于吉林大学获得学士学位,2009年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事空间光学遥感器设计的研究。E-mail: ciomper@163. com



姚劲松(1962—),男,吉林洮南人,高级工程师,主要从事空间光学仪器机械与机构的研究工作。E-mail: yaoniuyjs@yahoo. com. cn

●下期预告

斜入射干涉检测大口径碳化硅平面反射镜

刘兆栋¹,陈磊¹,韩志刚¹,严庆伟²,朱日宏¹

(1. 南京理工大学 电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094;

2. 南京中科天文仪器有限公司, 江苏 南京 210042)

为了实现大口径碳化硅(SiC)平面反射镜的高精度检测,采用自行研制的口径为600 mm近红外相移平面干涉仪在斜入射条件下对其进行了绝对测量。首先在一个标准的斐索干涉测试结构中测出空腔波面数据,然后将被测平面置于干涉光路中,使被测件光轴与干涉仪光轴成 α 角,测得第二组波面数据。最后,对两组波面数据进行处理得到SiC平面反射镜中心垂线方向的绝对面形分布。测量了口径为630 mm的SiC反射镜多条垂线方向的绝对面形,结果显示,中心垂线处的PV值为 0.061λ ,RMS为 0.014λ 。实验结果表明,该测量装置可以实现比干涉仪有效口径大的光学平面垂线方向的绝对面形检测,尤其适合于镀有高反膜的光学表面或者金属表面等面形的绝对测量。