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 $< 0.385 \mu$ m,该平台的测量 不确定度 $< 4.25 \mu$ 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 Φ300 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 μ m,PV 值为 39 μ 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 exciting 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 μ m and that of the platform is less than 4.25 μ 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 Φ 300 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 μ m and 39.327 μ 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 Φ 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 Φ 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 Φ 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 Φ 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 Ø300 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 9.795 λ , RMS 值为 1.026 $\lambda(\lambda = 632.8$ nm)。



图 1 薄膜表面粗糙度测量结果 ig.1 Surface roughness measurement of membrane samples



图 2 薄膜反射镜中心 Φ100 mm 口径内平面面形测量结果
 Fig. 2 Flat film testing of Φ100 mm aperture in membrane mirror

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

从图 1 看到,薄膜表面粗糙度在 1/4λ 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:

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

同理有:

$$\tan \delta\theta_{y} = \frac{\delta\phi_{y}p}{-4\pi \left(d_{0} + \frac{\sqrt{2}}{2}x - 1\right)} , \qquad (4)$$

所以待测薄膜反射镜表面高度不确定度表示为: $\delta z = \delta x \tan \delta \theta_x + \delta y \tan \delta \theta_y =$

$$\delta x \frac{\delta \phi_x p}{-4\pi \left(d_0 + \frac{\sqrt{2}}{2}x\right)} + \delta y \frac{\delta \phi_y p}{-4\pi \left(d_0 + \frac{\sqrt{2}}{2}x - 1\right)}.$$
(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 δx , δy ,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 μ 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1280×1024 的液晶显示屏幕显示 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 ϕ 60 mm标准球面镜,该球面镜有效反射镜部 分为 ϕ 54 mm,实际曲率半径为1600 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





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 | 面形偏差/mm | | |
|-------|-------|---------------------------|--------------|--|
| | /mm | $_{\rm PV}$ | RMS | |
| 干涉仪 | 0.228 | 小于 $\lambda(\lambda = 0)$ | 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 μ m,PV 值为 14.04 μ 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 $307 \times$ 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 μ 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 Φ 300 mm,待测镜面中心距 CCD 相机大约为 2 800 mm。图 6 为被测的 Φ 300 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



第6期

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

| | 施加电压/V | | 面形偏差 RMS/mm | | |
|----|--------|---------|-------------|-----------|--|
| 厅与 | 优化前 | 优化后 | 优化前 | 优化后 | |
| | 4000 | 4 011.4 | | | |
| 1 | 4000 | 3 922.3 | 0.002 539 | 0.000 400 | |
| | 4000 | 3911.9 | | | |
| 2 | 5000 | 5 050.3 | | | |
| 2 | 5000 | 4891.4 | 0.005 386 | 0.000 872 | |
| | 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 |





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 $<0.385 \mu$ m,平 台的测量不确定度 $<4.25 \mu$ 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 Φ300 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 μ m, PV 值为 39 μ 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

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 ex-

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。

tremely 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.. Highresolution 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。Email: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



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。Email:ciomper@163.com



张 雷(1982一),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



姚劲松(1962一),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,尤其适合用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。