文章编号:1002-2082(2011)02-0282-05

多电极静电拉伸薄膜反射镜的光学检测

钟 兴¹, 金 光¹, 张 鹏^{1,2}, 张 元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:利用研制的 300 mm 口径多电极薄膜反射镜原理样机,开展了光学检测实验工作。利 用高斯光学原理对薄膜反射镜的基本光学参数进行了检测,获得了随电压变化的薄膜反射镜曲 率半径和最大变形值曲线,趋势与理论计算结果一致。对薄膜反射镜的面形特性和面形检测方 法进行了分析,采用激光干涉仪测试了无电压时中心区域的平面面形,RMS 值为 1.03 (= 632.8nm)。为检验薄膜反射镜的曲面面形,搭建了 Hartmann 光栏法测试光路并结合 Zernike 多项式拟合处理方法,对使用非均布电压优化前后的曲面的低频面形进行了测试,面形误差 RMS 值从 24.1 m 减小为 14.7 m,证明相对于单电极方案,多电极非均压对静电拉伸薄膜反射 镜的面形有明显的优化作用。本文使用的检测方法和结论可为相关领域的研究提供参考。 关键词:多电极;静电拉伸;薄膜反射镜;Hartmann 光栏法 中图分类号: TN206; 0484.4 文献标志码: A

Optical testing of multi-electrode electrostatic membrane mirror

ZHONG Xing¹, JIN Guang¹, ZHANG Peng^{1,2}, ZHANG Yuan¹ (1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, CAS, Changchun 130033, China; 2. Graduate School of CAS, Beijing 100039, China)

Abstract: A membrane mirror prototype of 300 mm diameter was developed and optically tested. Basic optical parameters of membrane mirror were tested by Gaussian optics. The results show that relations between basic parameters of membrane mirror and the applied voltages are consistent with shaping theory. The surface shape characteristics and optical testing methods of membrane mirror are discussed. Laser interferometer was used to test the plat surface when voltages were zero, and the RMS (root mean square) value of surface error was 1.03 (= 632.8 nm). Hartmann testing was used to test membrane mirror surface with radius, and the result shows that RMS value of surface error changes from 24.1 m to 14.7 m when different multi-electrode voltages are used for optimization. This validates that multiple electrodes with different voltages optimize the surface accuracy of membrane mirror. Key words: multi-electrode; electrostatic stretch; membrane mirror; Hartmann testing

引言

以有机薄膜作为基底的静电拉伸薄膜反射 镜,因其低密度和良好的柔韧性等,引起了人们的 广泛关注,成为空间光学领域研究的热点^[14]。作 为光学元件,薄膜反射镜的光学检测特别是面形 检测至关重要,但由于现阶段薄膜反射镜材料精 度不足等原因,造成光学检测困难,目前国内外对 薄膜反射镜的研究中,很少有全口径面形精度的

作者简介:钟兴(1982-),男,四川自贡人,副研究员,主要从事光学设计与检测方面的研究工作。

E-mail: ciomper@163.com © 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net 测试数据发表。如文献[5]和文献[6]的面形结果 只测试了无电压情况下中心区域的平面度情况, 还不足以为薄膜反射镜面形控制和优化提供证 据,因此,有必要深入研究现阶段的薄膜反射镜的 光学检测方法。

本研究室在 863 计划资助下开展了空间薄膜 反射镜的研究工作。通过对薄膜反射镜变形理论 和多电极面形优化控制方法的深入探索.研制了 多电极静电拉伸薄膜反射镜的原理样机,并开展 了薄膜反射镜的面形检测研究工作。实验得到薄 膜反射镜变形量与施加电压关系与理论的趋势一 致,使用 Hartmann 光栏法对其全口径的面形进行 了检测。表明多电极非均压对薄膜反射镜的面形 具有明显的优化作用。

薄膜反射镜原理介绍 1

薄膜反射镜变形理论如图1所示,对薄膜周边 进行夹持固定,薄膜表面与平面电极之间存在电 势,因此薄膜受静电力载荷作用产生变形。我们 以标准抛物面为研究目标,通过板壳大变形理论 研究了单电极情况下薄膜反射镜的变形机理^[78]. 分析薄膜面形的解析解得知,为了得到较好的面 形,有必要调整载荷分布和强度,对薄膜反射镜的 面形进行优化。也就是说,实际应用的薄膜反射 镜必须是多电极的。同时,在电压对面形控制的 研究中,必须对薄膜反射镜进行实时光学检测。



持作用的同时能够有效调节薄膜边界预应力而且 能够精密控制。此外膜极距定量可调、方便实验 分析。电极盘采用三环拱型分布式设计,第二环 和第三环电极细分,共10块分布式电极。根据理 论计算和有限元求解结果,加大了中心电极对薄 膜作用的覆盖率,以提高薄膜曲率变形量。



Fig. 2 Components of multi-electrode electrostatic membrane mirror prototype

基本光学参数检测 2

作为光学元件,薄膜反射镜的最基本的光学 参数是半径、焦距和表面矢高、边缘的表面矢高又 直接反映了受静电拉伸的薄膜最大变形量。但静 电拉伸模板反射镜在工作中表面带有高压静电, 无法通过传统反射光学元件的接触测量方法来检 测这些基本光学参数。

因此,利用高斯光学原理对薄膜反射镜的半 径和矢高进行测量。搭建测试光路如图 3 所示,采 用激光器通过显微镜产生理想点光源,照射到一 定距离外的薄膜反射镜上,薄膜反射镜的反射光 由接收屏接收。点光源距薄膜反射镜距离为。接 收屏中心与点光源成共轭关系。



图 3 薄膜反射镜基本光学参数测量光路

Fig. 3 Measurement setup of basic optical parameters



r

曲率半径:
$$r = \frac{2Ds}{2D-d}$$
 (1)

焦距:
$$f = \frac{r}{2} = \frac{Ds}{2D-d}$$
 (2)

最大变形值(即边缘矢高):

$$z = \frac{2Ds}{2D-d} - \sqrt{\frac{4D^2s^2}{(2D-d)^2} - \frac{D^2}{4}}$$
(3)

式中: *D* 为薄膜反射镜直径; *d* 为接收屏光斑 直径。

由于 *D* 和 *s* 均已知,因此,只要测量出 *d*,便可 根据(1)~(3)式求出薄膜反射镜的基本光学参数。

测试期间保持室内的恒温恒湿,避免环境影响。 图 4 中实线为理论计算出的薄膜反射镜焦距值与电 压关系曲线,虚线为实测曲线;图 5 中实线为理论计 算出的薄膜反射镜最大变形值与电压关系曲线,虚 线为实测曲线。可以看出薄膜反射镜的理论值与实 测值趋势一致,证明薄膜理论模型合理正确。



图 4 实测与理论焦距随电压变化曲线

Fig. 4 Tested and ideal focal lengths versus voltage



先从测试方法分析误差来源,设接收屏光斑 直径的测量误差为 d,则薄膜反射镜曲率半径的

$$= r - \frac{2Ds}{2D - d} \tag{4}$$

由(4) 式可知, 在 *d* 一定的情况下, *r* 取决于 *r*, 而 *r* 又与施加电压有关, 因此, 施加电压越小, *r* 越大, *r* 也越大, 这也造成了图 4 在低电压情况 下, 理论与实测曲线距离较远。

施加电压越大,曲率半径的计算误差应当越 小。在中间电压值 3 000 V~4 000 V 时,两条曲 线最为接近,但当电压继续增大,两条曲线又开始 远离。所以,应当考虑薄膜成形计算中引入的预 应力的值存在误差。经过以上分析,本节测试结 果可作为改进预应力测试的重要参考。

3 面形检测

3.1 薄膜反射镜面形特点

与传统光学元件不同,静电拉伸薄膜反射镜 面形有如下特点:

1) 薄膜面形容易受到环境(气流、振动等)影响而发生变化,影响面形测试结果;

 2) 在现有实验条件下,使用普通聚酰亚氨薄 膜,其镀铝表面的粗糙度较差,面形的高频成分影 响测试;

 3) 非球面面形不固定,随施加电压而改变, 无法使用干涉仪加补偿器零位检测方法检测曲面 面形。

上述特点决定了目前薄膜反射镜的面形检测 非常困难,必须合理选择检测方案。

3.2 干涉仪检测平面面形

利用 ZYGO 干涉仪对薄膜反射镜原理样机 在无电压情况下的平面面形(中心 100 mm 区 域)进行了测试,结果如图 6 所示, RMS 值 为1.03 (= 632.8 nm)。



图 6 干涉仪平面面形检测结果 Fig. 6 Flat surface test result by interferometer

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

从图 6 中可以看出,由于薄膜表面非常粗糙, 因此采集到的波前非常的不完整。对多种薄膜测 试显示,图 6 也代表了目前大部分薄膜材料的粗糙 度水平。因此,在后续的工作中,有必要发展光学 级别的光滑薄膜,以满足实际应用目的。

3.3 Hartmann 光栏法实时检测曲面面形

为了满足本阶段理论模型和面形控制算法的研究需要,通过对各种面形检测方法的对比,选择 Hartmann 光栏法作为本阶段静电拉伸薄膜反射 镜曲面面形的实时面形检测方法。

Hartmann 光栏法^[9] 可通过增加积分时间的 方法来平均环境影响,并且可通过改变光栏孔间 距的方法根据被测镜面形误差的大小调节精度和 量程,光路设置和使用较为灵活。

Hartmann 光栏法原理如图 7 所示, 波前与横 向像差 *TA* 和 *TA* ,的关系^[10] 为

$$\frac{W(x,y)}{x} = \frac{TA_x(x,y)}{r} = x(x,y)$$
(5)

$$\frac{W(x,y)}{y} = \frac{TA_y(x,y)}{r} = y(x,y)$$
(6)



图 7 Hatmann 光阑法原理 Fig. 7 Principle of Hartmann testing

式中: r 为待测波前出瞳与接收屏的距离; 和 , 为波前传递方向离开理想球面波传递方向的角 度,因此,通过测量横向像差,便可得知波前差的 大小。为了确保检验精度能真实反映被检镜面的 误差,需要对同一镜面多次测量,经数据处理求得 平均值。数据结果使用前 9 项 Zernike 多项式进 行拟合,以便考察镜面面形的低频成分。去掉相 位因子、倾斜和离焦后的面形测试结果如图 8 所 示。被测波前的像散较大,是像差的最主要来源。

200

0 x坐标/mm

RMS=24.0935 µm PV=176.9615 µm





0.

-0.1

200

义坐标/mm

-200

-200



图 8 薄膜反射镜面形测试结果

Fig. 8 Surface test results of membrane mirror

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

均压测试结果在所有电极均为 5 500 V 情况 下获得, 如图 8(a) 所示, 面形 RMS 值为 24.1 m。 这种情况下, 由于所有电极电压一致, 相当于文献 [6] 中单电极的情况。

根据面形优化计算结果,改变各电极电压值 为第一环 6 384 V;第二环 5 000 V;第三环 5 800 V。面形测试结果如图 8(b)所示,面形 RMS 值减 小为 14.7 m。表明多电极非均压对静电拉伸薄 膜反射镜的面形具有明显的优化作用。

4 结论

薄膜反射镜作为一种新型光学元件,具有巨大的应用潜力,但从目前面形 RMS值 14.7 m的结果来看,薄膜反射镜达到光学成像要求还有相 当长的一段路要走,在薄膜预应力测试、高精度薄 膜材料的制备、机械夹持方式等几个方面都还有 许多工作要做。

本文提供了在目前情况下多电极薄膜反射镜 的一套可行的光学检测方案,为薄膜反射镜的研 究提供了手段和参考。光学检测结果证明了薄膜 反射镜变形理论的正确性,并证明了与单电极方 案相比,多电极非均压对薄膜反射镜的面形有明 显的优化作用。后续工作的重点是将成形理论、 光学检测与面形控制三者有机结合,以获得高精 度面形为目标,继续深入开展多电极薄膜反射镜 的研究工作。

参考文献:

- STAHL H P. Development of lightweight mirrors technology for the next generation space telescope
 SPIE, 2001, 4451: 1-4.
- [2] ANSBRO E. A new membrane mirror for infrared telescopes[J]. SPIE, 2004, 5489: 1173-1177.
- [3] GORINEVSKY D, HYDET T. A daptive membrane for large lightweight space telescopes [J]. SPIE, 2002, 4849: 330-338.

- [4] SHIGuang feng, ZHONG Xing, JIN Guang, et al. Configuring an electrostatic membrane reflector with potentials exerted on distributed electrodes [C]// Proceedings of the 2009 IEEE, International Conference on Mechatronics and Automation. Changchun: IEEE Robotics and Automation Society, 2009: 5089-5093.
- [5] 齐迎春.空间薄膜反射镜成像机理研究[D].长春:中科院长春光机所,2007.

QI Ying-chun. Research of imaging theory of space based membrane mirror[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2007. (in Chinese)

- [6] 安源,金光.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):1969-1974.
 AN Yuan, JIN Guang. Control of membrane mirror shape by single electrode[J]. Optics and Precision Engineering, 2009, 17(8): 1969-1974. (in Chinese with an English abstract)
- [7] 孙小伟,齐迎春,金光.静电拉伸薄膜反射镜成形机 理研究[J].半导体光电,2007,28(4):490-493.
 SUN Xiao-wei, QI Ying-chun, JIN Guang. Research on shaping stretched membrane with electrostatic curvature mirrors[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2007, 28 (4):490-493. (in Chinese with an English abstract)
- [8] 齐迎春,金光.空间薄膜反射镜面形设计及优化
 [J].光学精密工程,2007,15(6):818-823.
 QI Ying-chun, JIN Guang. The design and optimize about the shape of the space membrane mirrors[J].
 Optics and Precision Engineering, 2007, 15(6):818-823. (in Chinese with an English abstract)
- [9] 马拉卡拉.光学车间检验[M].北京:机械工业出版 社,1983.
 MALACARA. Optical shop test[M]. Beijing: China Machine Press, 1983. (in Chinese)
- [10] SALAS D P, MALACARA D. Wave front retrieval from Hartmann test data [J]. Applied Optics, 2005, 44(20): 42284238.