

# 静电薄膜反射镜聚光系统设计

石广丰<sup>1,2,3</sup>, 金光<sup>2</sup>, 张鹏<sup>2,3</sup>, 谷松<sup>2</sup>

(1.长春理工大学 机电工程学院, 长春 130022; 2.中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033;  
3.中国科学院 研究生院, 北京 100039)

**摘要:**采用单面镀铝聚酯薄膜作为基底,设计了一种通过控制静电力分布来拉伸薄膜成形的三环多电极300mm有效口径的反射镜聚光系统。通过计算所需施加分布电势,能够有效控制圆薄膜面形变化实现不同焦距的聚光。并进行了面形成形模拟和聚光模拟,效果良好。为静电薄膜反射镜影响因素的定量研究和面形控制提供了切实可行的平台。

**关键词:**静电;聚光;薄膜反射镜;多电极;分布电势

中图分类号:TH751, TH704

文献标识码:A

文章编号:1672-9870(2010)02-0022-03

## The Concentrating System Design for An Electrostatic Stretched Membrane Reflector

SHI Guangfeng<sup>1,2,3</sup>, JIN Guang<sup>2</sup>, ZHANG Peng<sup>2,3</sup>, Gu Song<sup>2</sup>

(1.School of Photo-Electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022;  
2.Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033;  
3.Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039)

**Abstract:** A Membrane concentrating system is designed, in which a 300mm circular polymer coated by aluminium of one side is stretched to deflect by three annulus electrodes below. The membrane deflection can be effectively controlled for concentrating by computed potentials exerted on the electrodes. The membrane shape forming and its effect of concentrating are simulated, and the results are accepted. The designed system has laid a foundation for thorough study in electrostatic membrane reflector.

**Key words:** electrostatic; concentrating; membrane reflector; electrodes; distributed potentials.

薄膜反射镜技术是一种新兴的反射镜技术,相对于传统的反射镜基底材料重量大、加工难、成本高的缺点,它具有质量轻、便于控制、可折叠和成本低的优点,充分适应火箭运载空间和重量的制约。静电薄膜反射镜是薄膜反射镜技术的主要成形方法之一,它是利用电压差,通过分布高压静电轴向拉伸圆形单面镀铝薄膜而精确成形的。和充气、真空等成形方式的薄膜反射镜技术相比,它具有成型精确的特点而受到广泛研究。目前世界上相关研究国家很多<sup>[1]</sup>,而国内只有长春光机所和苏州大学正在进行相关理论分析和验证研究<sup>[2,3]</sup>,所做的薄

膜反射镜实验装置口径分别是0.18m(一个中心电极)和0.2m(两环电极),实验结果并不理想<sup>[4]</sup>,因此有必要研究多电极更大口径的薄膜反射镜系统。

### 1 工作原理

静电薄膜反射镜成形面面形控制主要是通过控制多电极上电势的大小及分布来实现的。所谓的静电拉伸是指静电力作用下薄膜反射镜的面形保持,在反射镜的成形过程中是动态的,是由静电力做功

收稿日期:2009-12-11

基金项目:国家863高技术研究发展计划资助项目(2007AA12Z113)

作者简介:石广丰(1981-),男,讲师,主要从事薄膜反射镜技术的研究, E-mail: shiguangfeng@cust.edu.cn。

来完成的。对于整个薄膜反射镜的工作状态而言,静电力的作用是保持薄膜的面形,空间静电势主要完成对薄膜表面与电极表面的电荷以及电荷分布形成束缚作用,保证静电力的持续稳定。

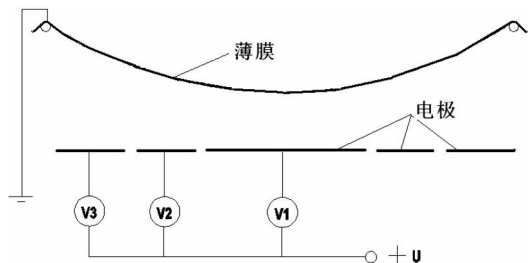


图1 静电薄膜反射镜成形原理图

Fig.1 Sketch of electrostatic membrane mirror forming

成形控制过程包括两个方面内容：一、反射镜面形的初始成形，这一过程从平面面形开始，最终达到薄膜面形的静态稳定。给平面薄膜反射镜施加电势场，使薄膜产生变形，当电势的大小及分布达到一定条件时，薄膜从初始的平面变形成为一定的曲面，保持作用电势，薄膜面形将最终保持某一曲面模型；二、对薄膜面形调整，这一过程从已具有一定的曲面面形的薄膜开始，改变电极上电势的大小与分布，使薄膜曲面相对变形前再作一定变形，最后通过电势及其外部条件的调节使面形达到所要求的结果，最终仍需要达到静态平衡。

## 2 结构设计

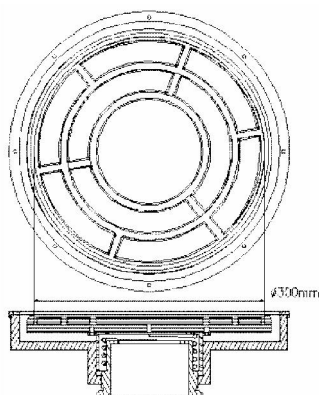


图2 静电薄膜反射镜结构设计

Fig.2 Structure design of electrostatic membrane reflector

柔性聚酯薄膜本身没有刚度,要想使它理想成形需要借助一定的夹持结构,起到施加载荷和面形调节的作用。设计了一种薄膜边界随动调节机构的三环(每环细分,共10个)多电极薄膜反射镜结构,能够有效调节薄膜边界预应力进行面形调整<sup>[2,4]</sup>。

此外膜-极距定量可调,方便实验分析。单面镀铝薄膜镀铝层朝外并且接地,通过高压直流多路电压可调供电装置对圆环电极板供电,从而形成电势差对圆薄膜进行拉伸成形。

## 3 控制方法

薄膜的变形分为小变形和大变形,其中小变形求解可通过解析法求解泊松方程来确定薄膜面形影响函数 $\frac{dZ}{dP}$ (单位载荷  $dP$  作用下薄膜变形增量  $dZ$ ),再转换为面形控制矩阵来求解给定面形所需静电分布载荷和分布电压<sup>[2,5]</sup>。薄膜大变形求解,往往带有一定非线性,需采用数值法求解。有限元模拟可以很好实现。

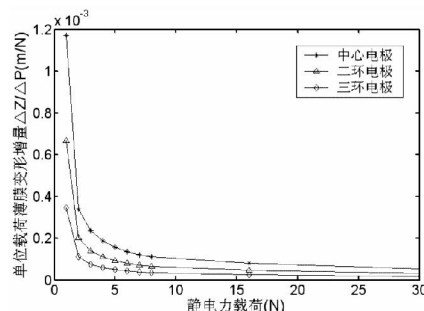


图3 电极对薄膜面形的影响关系

Fig.3 Relation of electrodes' effect on membrane deflection

薄膜反射镜往往需要一定的焦距工作,即一定的薄膜工作变形。如图3可知,随着薄膜所受电场力增大,薄膜变形逐渐增大,在小变形区薄膜变形增量下降幅度较大,而在大变形区薄膜变形增量下降幅度较小,可近似线性求解<sup>[6]</sup>。可通过有限元数值模拟出此变形工作点处各电极对薄膜面形的影响函数来量化每个电极控制薄膜在单位电压下变形量的权因子,在给定所求面形的情况下,便可通过求解面形控制矩阵求得此工作点处所需的电极分布电压,如式(1)-(2)。

$$Z = \frac{dZ}{dP} \frac{dP}{dV} V \quad (1)$$

$$V^2 = \frac{d^2 P}{\epsilon_0} \quad (2)$$

其中 $Z$ 为薄膜取样点变形, $P$ 为等效电场载荷, $\epsilon_0$ 为真空介电常数, $V$ 为电极等效施加电压, $d$ 为膜-极距。当选定静电薄膜反射镜聚光装置的工作参数<sup>[3]</sup>时,给定薄膜面形的分布电压基量可求。此外还可以以一定面形精度为目标进行分布电压优化<sup>[7]</sup>,从而得到最佳面形。

表 1 按最大变形量为 1.946mm 的抛物面计算所得的载荷和等效电压<sup>[2]</sup>

Tab.1 Computed pressures and equivalent potentials for the 1.946mm center deflection of the ideal paraboloid

电极	E1	E2	E3
电场力载荷 (N/m <sup>2</sup> )	1.7304	4.9534	2.1812
电压 (kv)	4.4218	7.4813	4.9645

## 4 面形求解

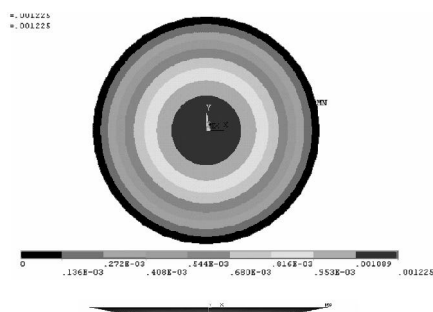


图 4 ANSYS 模拟出的薄膜面形

Fig.4 Membrane deflection simulated in ANSYS

按照所选薄膜参数在有限元分析软件中建立薄膜的三维有限元模型,将表 1 所得载荷分区施加于薄膜表面进行面形模拟。所得面形结果和理想抛物面有一定偏差,分析是由于非均布静电力在薄膜上简化为均布力加载所致,可通过优化方法提高面形精度。提取面形变形量和坐标,通过数据的预处理,带入光机接口程序,得到 36 项 zernike 多项式<sup>[7]</sup>,从而可在光学软件中分析聚光质量。

使用聚光模拟分析软件来模拟焦平面上能量情况,分析出能量分布(包括均匀性,能量峰值等),光斑区域大小,中心位置。如图可知 3 环电极模拟的结果为:误差 1.19%,能量峰值 298.37744w/mm<sup>2</sup>,能量中心位置坐标为  $x=0.000074\text{mm}$ ,  $y=0.00001\text{mm}$ ,焦距为 3021.06138mm,聚光能量密度之比为 2053.95。由此看出电极拉伸的面形聚光效果良好。

## 5 结论

设计了一种有效口径为 300mm 的静电薄膜反

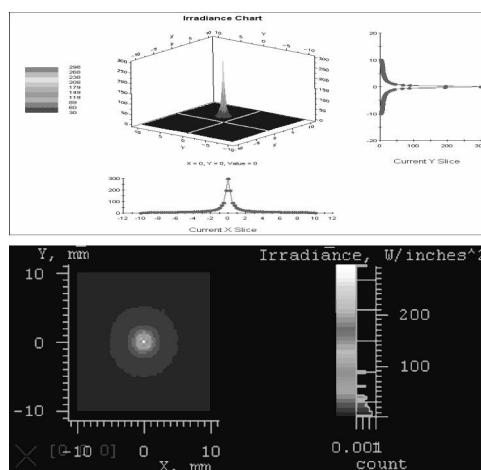


图 5 聚光模拟焦平面照度图

Fig.5 Concentrating luminance on the focal plane by simulation

射镜聚光系统,采用三环多电极电压连续可调电源装置供电。经过薄膜小变形和和大变形的数值求解,可确定薄膜变形的控制矩阵以确定一定面形所需载荷和等效电压。进行了面形模拟和聚光模拟,聚光能量密度之比为 2053.95,能量峰值 298.37744w/mm<sup>2</sup>,焦距为 3021.06138mm 的聚光效果。为薄膜反射镜系统的深入研究奠定基础。

## 参考文献

- [1] 张鹏,金光,石广丰,等.空间薄膜反射镜的研究发展现状[J].中国光学与应用光学,2009,2(2):91-101.
- [2] 石广丰,金光,刘春雨,等.薄膜反射镜成形控制[J].光学精密工程,2009,17(4):732-737.
- [3] 高平,唐敏学.柔性膜基反射镜成形理论研究[J].苏州大学学报,2008,24(4):69-74.
- [4] 石广丰,金光,张鹏,等.静电薄膜反射镜的关键技术研究[J].长春理工大学学报,2009,32(4):592-594.
- [5] Shi G F, Zhong X, Jin G et.al..Configuring an electrostatic membrane reflector with potentials exerted on distributed electrodes[J]. IEEE, 2009, 8(6):5089-8093.
- [6] MIHORIA D J. Test Progress on the Electrostatic Membrane Reflector[R]. Virginia :NASA Langley Research Center, 1981.
- [7] 齐迎春,金光,许艳军.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.