

文章编号 1004-924X(2009)04-0732-06

## 薄膜反射镜的成形控制

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

(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; 3. 长春理工大学, 吉林 长春 130022)

**摘要:** 针对望远镜发射系统承载空间与承载质量的限制与大口径、高分辨率反射镜使用需求之间的矛盾, 开展了轻质柔性薄膜反射镜地基试验研究, 实现了静电拉伸式薄膜反射镜的精确成形控制。针对口径为 300 mm 的同心环分布式电极静电拉伸聚酰亚胺镀铝薄膜反射镜, 基于泊松方程的薄膜小变形近似求解, 并通过确定每环电极对面形的影响函数来确定分布式电极对反射镜薄膜成形的控制矩阵, 进而利用最小二乘法求得了分布式电极对面形精确控制所需的分布电压。用 ANSYS 有限元分析法对比结果, 分析相关误差并总结控制方法。结果显示, 在薄膜中心变形量超过 2.5 mm 以后, 基于泊松方程的理论求解和 ANSYS 有限元分析结果相差很大, 计算面形与理想面形偏差也很大; 认为只有综合运用数值计算和有限元分析, 通过确定分布式电极对面形的控制矩阵, 运用最小二乘法求解分布式电压, 才能准确地实现薄膜小变形面形的预知和控制。

**关键词:** 静电拉伸; 薄膜反射镜; 分布式电极; 控制矩阵; 最小二乘法

**中图分类号:** TH751; TH703 **文献标识码:** A

## Shaping control of membrane reflector

SHI Guang-feng<sup>1,2,3</sup>, JIN Guang<sup>1</sup>, LIU Chun-yu<sup>1,2</sup>, ZHANG Peng<sup>1,2</sup>

(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;*  
3. *Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China*)

**Abstract:** To reduce the contradiction between the system space and the load-carrying capacity of a launching system and with the demand of reflectors with large apertures and high resolutions, a light-weight and flexible membrane reflector was developed and the precise control of the electrostatic stretched membrane reflector was realized. For a  $\Phi 300$  mm electrostatic stretched polyimide membrane reflector coated with aluminium controlled by concentric annular electrodes, the control matrix for the reflector shape was determined by deducing the influence function of each electrode and the needed voltages on the distributed electrodes for the shape precise control were acquired by the least-square fitting on the basis of the approximate solution of the Poisson equation. The result by proposed method was compared with that obtained by ANSYS. It is shown that when the membrane center deflection is higher than 2.5 mm, the result is very different from that obtained by ANSYS, and the

收稿日期: 2008-06-13; 修订日期: 2008-08-22.

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

computed deflection deviates from an ideal deflection greatly. It comes to the conclusions that predicting and controlling the membrane shape of the small deflection exactly must use synthetically numerical computations and the least-square fitting, and also must find the membrane control matrix of the distributed electrode to solve the distributed voltages.

**Key words:** electrostatic stretching; membrane reflector; distributed electrode; control matrix; least-square fitting method

## 1 引言

作为空间观测的主要手段,采用反射式光学系统的空间望远镜是空间遥感光学系统的主要器件<sup>[1]</sup>。而传统的反射镜基底材料(如玻璃)面密度大、制作困难<sup>[2]</sup>,难以满足运载设备对光学系统有效载荷、使用空间的限制和对大口径、高分辨率反射镜的使用要求。目前,美国能源部圣地亚国家实验室与肯塔基大学合作,正在研制可展开超轻型大口径薄膜镜片技术,误差不超过  $2.5 \times 10^{-5}$  mm,质量不超过  $1 \text{ kg/m}^2$ ,是空间望远镜的未来<sup>[3]</sup>。所以,空间反射镜的大口径、高分辨率与轻量化是空间技术的主要发展方向之一。

随着先进材料技术的发展,被喻为“解决问题的能手”的聚酰亚胺薄膜材料得到广泛应用,其面密度能达到  $0.05 \text{ kg/m}^2$ ,且具有良好的物理性能,可应用于空间光学成像、观测系统,能够充分发挥其面密度低、体积小、便携可展、易于控制和成本低的特点,可望解决发射系统承载空间、承载质量的限制与大口径、高分辨率反射镜使用需求之间的矛盾。

静电拉伸式薄膜反射镜(EMR)和充气式薄膜反射镜是薄膜反射镜的两种主要成形方式。EMR是通过分布式高压静电电极对镀金属的树脂薄膜进行静电拉伸变形来实现光学成像的,相对充气式薄膜反射镜来说,能够实现精确控制成形<sup>[4]</sup>。大口径EMR的研究始于上世纪70年代末<sup>[5]</sup>,世界上很多研究单位都已开展了对EMR的研究,包括美国NASA、亚利桑那大学、欧空局、英国苏格兰大学等等。国外相关报道只停留在上世纪80年代,目前则很少,由于技术保密,详细信息很难获得。国内只有长春光机所和苏州大学正在进行薄膜反射镜研究,但尚处于薄膜成形机理摸索阶段<sup>[6-7]</sup>。长春光机所已率先进行了口径为  $\Phi 180 \text{ mm}$  的单电极EMR实验和相关理论

分析,为  $\Phi 300 \text{ mm}$  或更大口径多电极EMR的精确成形控制研究奠定了基础。可见,深入开展EMR的研究具有重要意义。

## 2 理论计算

EMR面形控制的中心问题是找到使薄膜变形达到理想面形所需的分布电极电压,也就是找到薄膜若干点的薄膜所受横向力与面形变形量之间的关系,以及将薄膜所受横向力转换成电极电压。

相对于目前广泛研究的薄膜大变形求解问题来说,薄膜的小变形问题<sup>[8]</sup>是指薄膜变形的挠度角比较小,薄膜的预应力在横向力的作用下不受薄膜变形影响,而且各向相同。当然,这依赖于膜材的弹性极限、弹性模量和薄膜边界预应力调节。

薄膜的小变形问题可通过求解泊松方程来解决<sup>[9]</sup>。薄膜的小变形可表示成薄膜所受静电拉伸横向力的线性关系,然后再利用最小二乘法拟合成理想面形<sup>[8]</sup>。为了求解薄膜的变形问题,下面用泊松方程来描述薄膜变形与薄膜所受横向力之间的关系:

$$\nabla^2 z = -P/T, \quad (1)$$

其中, $z$ 为薄膜变形, $P$ 为薄膜所受横向力, $T$ 为薄膜预张力。为了方便计算将半径归一化,即 $r/R=1$ 时, $z=0$ 。根据文献[8],泊松方程在极坐标 $(r, \phi)$ 下的近似解析解为:

$$z(r, \phi) = \frac{a^2}{2\pi T} \int_0^{2\pi} d\phi' \times \left( \int_0^r r' dr' \{ \ln(1/r) - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} [(rr')^n - (r'/r)^n] \times \cos n(\phi' - \phi) \} P(r', \phi') + \int_r^1 r' dr' \{ \ln(1/r'') - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} [(rr')^n - (r/r')^n] \times \cos n(\phi' - \phi) \} P(r', \phi') \right), \quad (2)$$

有:

$$z_i = \frac{a^2}{T} \sum_{j=1}^{N_e} A_{ij} P_j, \quad (3)$$

式(3)可写成  $z_i = \sum_{j=1}^{N_e} A_{ij}' P_j$ , 即薄膜的小变形量可表示成与作用电极电压变化的线性关系, 其中  $A_{ij}' = \frac{a^2}{T} A_{ij}$ , 为面形的影响函数<sup>[8]</sup>。系数  $A_{ij}$  由泊松方程求解得出,  $z_i$  是面形上的第  $i$  点(极坐标位置为  $(r_i, \phi_i)$ ) 变形量,  $P_j$  是第  $j$  个电极作用在面形上的压力,  $N_e$  是电极数目。

其中,

$$A_{ij} = \frac{1}{2\pi} \left\{ \Delta\phi_j [\ln(1/r_i)] \int_0^{r_i} r' dr' + \int_{r_i}^1 r' dr' \ln(1/r') - \int_0^{r_i} r' dr' \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} [(r_i r')^n - (r'/r_i)^n] \times [\sin n(\phi_{2j} - \phi_j) - \sin n(\phi_{1j} - \phi_j)] - \int_{r_i}^1 r' dr' \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} [(r_i r')^n - (r_i/r')^n] \times [\sin n(\phi_{2j} - \phi_j) - \sin n(\phi_{1j} - \phi_j)] \right\}, \quad (4)$$

式(4)依据  $r_i$  和第  $j$  个电极的径向边界值  $r_{1j}$  和  $r_{2j}$  分解成五种解析表达式<sup>[8]</sup>:

第一种:  $r_i = 0, r_{1j} = 0$ , 中心电极对面形中心的影响系数:

$$A_{ij} = \frac{1}{2\pi} \Delta\phi_j r_{2j}^2 \left( \frac{1}{2} - \ln r_{2j} \right) / 2, \quad (5)$$

第二种:  $r_i = 0, r_{1j} > 0$ , 非中心电极对面形中心的影响系数:

$$A_{ij} = \frac{1}{2\pi} \Delta\phi_j \left[ r_{2j}^2 \left( \frac{1}{2} - \ln r_{2j} \right) - r_{1j}^2 \left( \frac{1}{2} - \ln r_{1j} \right) \right] / 2, \quad (6)$$

第三种:  $r_{2j} \leq r_i$ , 电极对外围面形的影响系数:

$$A_{ij} = \frac{1}{2\pi} \left\{ \Delta\phi_j [-\ln(r_i)] [r_{2j}^2 - r_{1j}^2] / 2 - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{r_i^{2n}}{n^2(n+2)} [r_i^{2n} - 1] \times \left[ \left( \frac{r_{2j}}{r_i} \right)^{n+2} - \left( \frac{r_{1j}}{r_i} \right)^{n+2} \right] \times [\sin n(\phi_{2j} - \phi_j) - \sin n(\phi_{1j} - \phi_j)] \right\}, \quad (7)$$

第四种:  $r_i \leq r_{1j}$ , 非中心电极对内围面形的影响系数:

$$A_{ij} = \frac{1}{2\pi} \left\{ \Delta\phi_j \left[ r_{2j}^2 \left( \frac{1}{2} - \ln r_{2j} \right) - r_{1j}^2 \left( \frac{1}{2} - \ln r_{1j} \right) \right] / 2 - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} [r_i^n (r_{2j}^{n+2} - r_{1j}^{n+2}) / (n+2) + \alpha] \times [\sin n(\phi_{2j} - \phi_j) - \sin n(\phi_{1j} - \phi_j)] \right\}, \quad (8)$$

第五种:  $r_{1j} < r_i < r_{2j}$ , 电极对电极所对面形的影响系数:

$$A_{ij} = \frac{1}{2\pi} \left\{ \Delta\phi_j [-\ln(r_i)] [r_i^2 - r_{1j}^2] / 2 - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{r_i^{2n}}{n^2(n+2)} [r_i^{2n} - 1] \times \left[ 1 - \left( \frac{r_{1j}}{r_i} \right)^{n+2} \right] \times [-\sin n(\phi_{1j} - \phi_i)] \right\} + \frac{1}{2\pi} \left\{ \Delta\phi_j \left[ r_{2j}^2 \left( \frac{1}{2} - \ln r_{2j} \right) - r_i^2 \left( \frac{1}{2} - \ln r_i \right) \right] / 2 - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} [r_i^n (r_{2j}^{n+2} - r_{1j}^{n+2}) / (n+2) + \alpha] \times [\sin n(\phi_{2j} - \phi_i)] \right\}, \quad (9)$$

当  $n=1$  时,  $\alpha = -r_i(r_{2j} - r_{1j})$ ;

当  $n=2$  时,  $\alpha = -r_i^2(\ln r_{2j} - \ln r_{1j})$ ;

当  $n \geq 3$  时,  $\alpha = r_i^2 \left[ \left( \frac{r_i}{2r_{2j}} \right)^{n-2} - \left( \frac{r_i}{2r_{1j}} \right)^{n-2} \right] / (n-2)$ ;

在面形单一径向有效区域内等间距取  $m$  个采样控制点, 设置  $n$  环分布式电极, 则有:

$$\begin{cases} Z_1 = A_{11} P_1 + A_{12} P_2 + \dots + A_{1n} P_n \\ Z_2 = A_{21} P_1 + A_{22} P_2 + \dots + A_{2n} P_n \\ Z_3 = A_{31} P_1 + A_{32} P_2 + \dots + A_{3n} P_n \\ \dots \\ Z_m = A_{m1} P_1 + A_{m2} P_2 + \dots + A_{mn} P_n \end{cases}, \quad (10)$$

以理想面形为目标, 则各个电极所施加电压变化量  $\{P_n\}$  可依据最小二乘法求解线性方程组  $\{Z_m\} = \mathbf{A}_{m \times n} \{P_n\}$  得出, 其中面形控制矩阵是由各影响函数离散后线性组成的。

$$\mathbf{A}_{m \times n} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & \dots & A_{1n} \\ A_{21} & A_{22} & \dots & A_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ A_{m1} & A_{m2} & \dots & A_{mn} \end{bmatrix}, \quad (11)$$

电压变化可表示成:  $\{P\} = \mathbf{B}\{Z\}$ , (12)

其中,  $\mathbf{B} = [\mathbf{A}^T \mathbf{A}]^{-1} \mathbf{A}^T$ ,  $\mathbf{A}^T$  为  $\mathbf{A}$  的转置矩阵。

由于对薄膜反射镜的直接输入参数是电极电压  $V$ , 而<sup>[8]</sup>:

$$V = \sqrt{\frac{d^2 P}{\epsilon_0}}, \quad (13)$$

则有:

$$\{V^2\} = \frac{d^2}{\epsilon_0} \mathbf{B}\{Z\}, \quad (14)$$

其中,  $d$  为所测量点到电极面的距离,  $\epsilon_0$  为真空介电常数。这样当给定指定点的薄膜变形值时, 所施加的电极电压就可求。

表 1 选取的 EMR 及聚酰亚胺薄膜相关参数

Tab.1 Relative parameters of chosen EMR and polyimide membrane

相关参数	
有效口径 $a$	0.30 m
厚度 $h$	$2.50 \times 10^{-6}$ m
弹性模量 $E$	$2.17 \times 10^9$ Pa
泊松比 $\mu$	0.34
热膨胀系数 $\alpha$	$2.90 \times 10^{-5}$ /K
密度 $\rho$	1 434 kg/m <sup>3</sup>
膜-极距 $d$	0.01 m

由表 1 参数,取  $m=6, n=3$ , 在薄膜径向上按 0.025 m 步长均布采点,由公式(4)~(9)有:

$$A_{3 \times 3} = 0.001 \times \begin{bmatrix} 0.312 5 & 0.689 6 & 0.926 4 \\ 0.301 3 & 0.689 6 & 0.926 4 \\ 0.267 8 & 0.689 6 & 0.926 4 \\ 0.231 5 & 0.669 9 & 0.926 4 \\ 0.205 8 & 0.617 4 & 0.926 4 \\ 0.185 9 & 0.557 6 & 0.905 6 \end{bmatrix}, \quad (15)$$

$$B_{3 \times 3} = \begin{bmatrix} 10 142 & 6 322 & -5 135 & -11 533 & -4 295 & 4 602 \\ -6 195 & -2 784 & 7 450 & 11 536 & 718 & -10 972 \\ 1 803 & 430 & -3 690 & -4 839 & 842 & 6 684 \end{bmatrix}, \quad (16)$$

由式(12)~(16),以一定面形(抛物面、球面等)为目标时,就可计算相应横向载荷和分布电压。因此,控制方法大致可归纳为 4 步:

- (1)在需要理想成形的薄膜面形上选择适当间距和数量的采样控制点;
- (2)确定面形取样点上的影响函数矩阵;
- (3)通过最小二乘法求解分布电极最优作用横向力从而使薄膜理想成形;
- (4)将所求作用横向力转变为分布电极上所施加的电压。

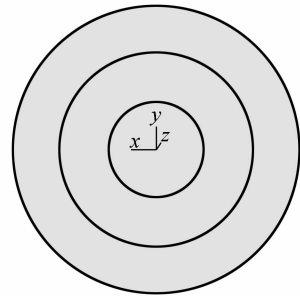


图 1 三环分布式电极(忽略绝缘间隔)

Fig. 1 Three annular electrode (ignoring insulated distances)

### 3 验证分析

通过有限元仿真验证分析了提出的控制方法。

首先,通过施加温差  $\Delta T$  来模拟外腔对薄膜的预张力调节<sup>[6]</sup>。根据薄膜热膨胀系数与热应力的关系,薄膜预应力为  $S = Eah(\Delta T)$  (N/m)。降温,则薄膜预张力提高。在 ANSYS 中建立薄膜有限元模型,采用三角形膜单元 shell41 划分,结点数为 300,单元数为 566,取  $\Delta T = -0.2$  °C。针对薄膜中心不同变形量的理想抛物面,将由公式(15)~(16)计算所得横向力值分别施加于图 1 分布式电极所对应面形,进行对比分析(见图 2)。

由图 2 可知,随着中心电极所加电压的增大,薄膜中心变形量增大,当变形量  $< 2.5$  mm 时理论计算变形值和有限元分析变形值接近,变形量在 1.946 mm 时计算变形值和有限元分析变形值重合。当  $Z_m = 1.946$  mm 时,以理想抛物面为目

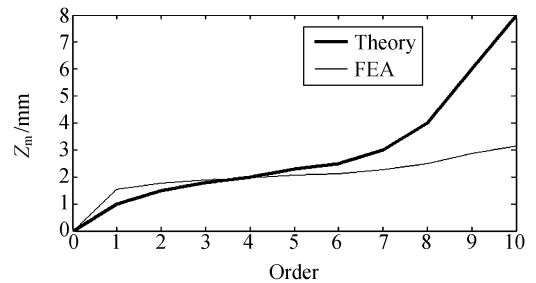


图 2 薄膜中心变形量随中心电极所加电压增大序数变化关系的理论分析和有限元模拟

Fig. 2 Contrast between theoretical analysis and finite element analysis on central deflection with increasing voltage ordinal of central electrode

标,三环分别施加的横向载荷由式(15)、(16)通过最小二乘法计算得 1.730 4、4.953 4、2.181 2 N/m<sup>2</sup>,相应电极电压为 4.421 8、7.481 3、4.964 5 kV,

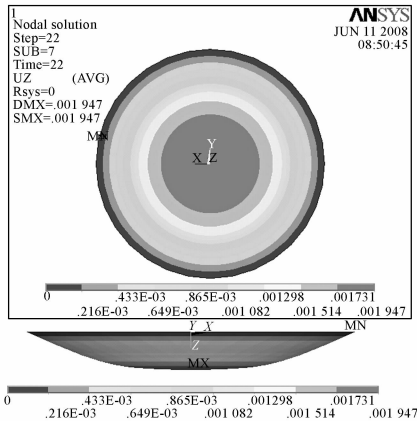


图 3 施加三环电极计算所得作用力后的薄膜变形  
Fig. 3 Final membrane deflection under computed side pressure caused by distributed annular electrode

所得面形如图 3 所示。有限元模拟面形与理想抛物面形在 6 个采样点的均方根误差  $rms = 0.215\ 94\ \text{mm}$ 。由于拉伸过大时理论计算值不满足泊松方程小变形条件,故理论计算变形值和有限元分析变形值大约在  $2.5\ \text{mm}$  以后偏差较大。

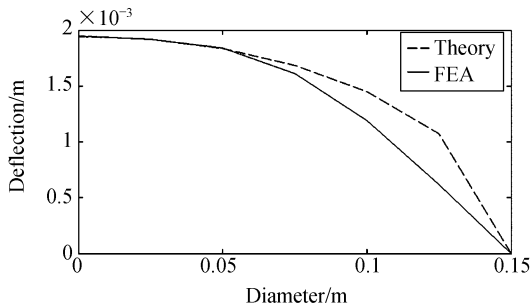


图 4  $Z_m = 1.946\ \text{mm}, m = 6, n = 3$  时, ANSYS 有限元分析所得薄膜变形量与理想薄膜变形量对比  
Fig. 4 Contrast of ANSYS FEA membrane deflection with ideal paraboloid deflection when  $Z_m = 1.946\ \text{mm}, m = 6, n = 3$

通过有限元仿真分析(图 4)可知,中心电极对应的薄膜面形控制较好,第二、三环电极对应的薄膜面形控制不理想。可见薄膜表面预应力一定的情况下通过三环分布式电极精确控制面形精度是远远不够的,它的精度依赖于计算面形影响函数的精度,而且也膜材弹性属性等有关。由于这里只取单一径向上 6 个采样点,忽略绝缘间隔的条件下针对环电极进行的计算,势必会造成控

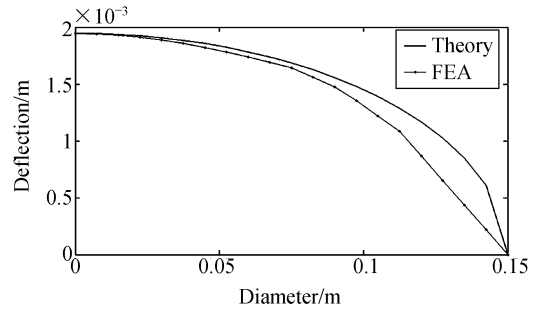


图 5  $Z_m = 1.946\ \text{mm}, m = 8, n = 4$  时, ANSYS 有限元分析所得薄膜变形量与理想薄膜变形量对比  
Fig. 5 Contrasts of ANSYS FEA membrane deflection with ideal paraboloid deflection when  $Z_m = 1.946\ \text{mm}, m = 8, n = 4$

制矩阵计算、拟合的误差,从而直接影响计算面形与理想面形或实际面形的偏差。沿单一径向将电极均匀划分为  $n = 4$  部分,在面形上按步长  $0.018\ 75\ \text{mm}$  均分采样控制点,即  $m = 8$ 。当  $Z_m = 1.946\ \text{mm}$  时,同理求得四环分别施加的横向载荷为  $2.839\ 0, 1.978\ 1, 6.035\ 1, 5.703\ 1\ \text{N/m}^2$ , 相应电极电压为  $5.663\ 8, 4.727\ 7, 8.257\ 9, 8.027\ 6\ \text{kV}$ , 有限元模拟面形与理想抛物面形在 8 个采样点的均方根误差  $rms = 0.164\ 30\ \text{mm}$ (图 5), 明显优于  $m = 6, n = 3$  情况。如果只增加采样控制点数,而保持电极环数不变,则求得的面形均方根误差过大。因此,只有在一定范围内增加薄膜外围区域的采样控制点数量和相应的环电极数量,方可有效提高面形精度。另外,也可以扩展到每一环上周向细分的分布式电极,针对每一个细分电极求影响函数,通过取多点来进行拟合计算,减小面形误差。所取采样控制点应尽量布满整个面形,以获得最佳拟合效果,实现面形控制的准确性。

此外,较高的薄膜表面预应力可有效调节薄膜面形精度<sup>[6]</sup>,但往往会造成过高的电压施加,因此合理选择薄膜表面预应力也是薄膜精确成形控制的关键,这里不详细分析。

## 4 结 论

通过 ANSYS 有限元分析软件定量分析了口径  $\Phi 300\ \text{mm}$  的同心环分布式电极静电拉伸聚酰亚胺镀铝薄膜反射镜基于泊松方程小变形求解

的有效范围。当薄膜中心变形量大约 $<2.5$  mm时,基于泊松方程的理论求解和 ANSY 有限元分析结果基本吻合。当其它条件一定时,增加薄膜外围区域的采样控制点数量和相应的环电极数量,对于提高面形精度是可行的。只有综合运用

数值计算、有限元分析和实验的方法,通过确定分布式电极对面形的控制矩阵,运用最小二乘法求解分布式电压,才能准确地实现薄膜小变形面形的预知和控制。该方法是对薄膜大变形求解问题的有力补充。

## 参考文献:

- [1] 金光,张亮,胡福生. 大 F 数高分辨率空间望远镜光学系统[J]. 光学精密工程, 2007, 15(2):155-159.  
JIN G, ZHANG L, HU F SH. Investigation on space optical of high F number and high resolution [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(2):155-159. (in Chinese)
- [2] 谢晋,阮兆武. 光学自由曲面反射镜模芯的镜面成型磨削[J]. 光学精密工程, 2007, 15(3):344-349.  
XIE J, RUAN ZH W. Mirror form grinding of free-form surface of reflector mould core [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(3):344-349. (in Chinese)
- [3] BEKEY I. Very large yet extremely light weight space imaging systems [J]. *SPIE*, 2002, 4849:17-27.
- [4] ANGEL R, BURGE J, HEGE K, *et al.*. Stretched membrane with electrostatic curvature (SMEC): A new technology for ultra-lightweight space tele-

scopes [J]. *SPIE*, 2000, 4013:699-705.

- [5] MIHORIA D J. *Test Progress on the Electrostatic Membrane Reflector* [R]. Virginia: NASA, Langley Research Center, 1981.
- [6] 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(8):818-823.  
QI Y CH, JIN G, XU Y J. The design and optimize about the shape of the space membrane mirror [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(8):818-823. (in Chinese)
- [7] CHEN X H, TANG M X, SHEN W M. Membrane mirror deformed by electrostatic pressure [J]. *SPIE*, 2007, 6721:67210K1-67210K8.
- [8] CLAFLIN E S, BAREKET N. Configuring an electrostatic membrane mirror by least squares fitting with analytically derived influence functions [J]. *Opt. Soc. Am.*, 1986, 3(11):1833-1839.
- [9] GROSSO R P, YELLIN M J. The membrane mirror as an adaptive optical element [J]. *Opt. Soc. Am.*, 1977, 67:399-406.

## 作者简介:



石广丰(1981—),男,辽宁建昌人,博士研究生,主要研究方向为薄膜反射镜技术。E-mail:shigf-1981@tom.com



刘春雨(1982—),女,满族,吉林四平人,博士研究生,主要研究方向:光学检测技术;E-mail:Liucy.ciomp@tom.com



金光(1958—),男,吉林长春人,研究员,主要研究方向为星载一体化的研究。E-mail:jing@ciomp.ac.cn



张鹏(1985—),男,汉族,福建龙岩人,博士研究生,主要研究方向:空间光学技术;E-mail:zpjg1021.student@sina.com