

文章编号 1004-924X(2009)02-0267-07

## 薄膜反射镜静电成形机理研究

张 鹰<sup>1,2</sup>, 金 光<sup>1</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)

**摘要:**为了控制薄膜反射镜面形,建立了静电拉伸薄膜反射镜物理模型。根据静电力与薄膜变形载荷作用力之间的平衡关系和静电拉伸薄膜反射镜成形的复杂过程,介绍了薄膜反射镜静电成形的控制原理;以三等分环状电极为例,分析了静电场中空间电势分布特性,即从拉普拉斯方程推导出静态场势函数的表达式;然后,利用差分与电势方程结合的方法,对单电极电场力和三等分环状电极电场力进行了数值求解;最后,将计算面形与理想抛物面进行了比较,结果显示,单电极情况下得到的薄膜反射镜面形不是理想抛物面,若采用多电极控制可获得更高的控制精度。模拟结果和实验结果表明:多电极控制情况比单电极情况下受力更接近均布力分布,口径 180 mm 的薄膜反射镜在相同口径单电极控制下,施加 10 000 V 电压可得到反射镜最大变形为 0.001 094 8 mm。系统长时间工作安全稳定,薄膜变形的对称性较好。

**关键词:**空间光学;薄膜反射镜;静电拉伸;面形控制

**中图分类号:** TH743; O484.4 **文献标识码:** A

## Research on electrostatic deformation of membrane mirror

ZHANG Ying<sup>1,2</sup>, JIN Guang<sup>1</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)

**Abstract:** To control membrane mirror figure, the physical model of Stretched Membrane with Electrostatic Curvature (SMEC) was established. The control principle of electrostatic shaping was introduced according to the balance between electrostatic force and resulting force formed by membrane deformation and the complex shaping process of SMEC. Then, taking the trisection circularity electrode for an example, the distribution characteristic of electric potential in the electrostatic field was analyzed, namely, the expression of potential function in the electrostatic field was deduced by Laplacian equation. And then, by combining the difference equation with electric potential expression, the numerical solutions of electrostatic force in single electrode mode and trisection circularity electrode mode were disposed. Finally, the calculated figure was compared with the ideal paraboloid and comparison shows that more accuracy would be achieved by multi-electrode control. The simulation and experimental results indicate that the force distribution in multi-electrode mode is more even than that in single electrode mode, and membrane mirror of 180 mm in diameter can acquire the maximum

收稿日期:2008-01-21;修订日期:2008-04-03.

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

0.001 094 8 mm deformation controlled by a same size single electrode under voltage of 10 000 V. The system can work steadily and safely for a long time, while the symmetry of membrane mirror is preferably.

**Key words:** space optics; membrane mirror; electrostatic stretch; mirror figure control

## 1 引言

反射镜作为大多数航天器有效载荷的重要部件,主要用于空间望远镜成像系统和光能收集系统。随着高科技的发展和航天与国防建设的需要,对光学反射镜的要求越来越苛刻,质量轻、分辨率高是目前空间望远镜追求的重要性能技术指标<sup>[1-3]</sup>。因此,薄膜反射镜应用于太空将是未来发展方向,而其面形控制机理将成为研究的热点。

目前,薄膜反射镜的成形方法主要有:充气成形法、吊装成形法和静电成形法<sup>[4-5]</sup>。静电成形法最早由美国的 Martin Yellin 于 1976 年提出,与其他方法相比,它具有结构简单、反射镜面形易于控制等优点,是目前最具应用前景的成形方法之一<sup>[6-8]</sup>。90 年代初期, Wirth 等人<sup>[9]</sup>对 Martin Yellin 提出的方法进行了改进,制作了以聚脂薄膜为材料、口径 50 mm 的薄膜反射镜。随着薄膜制造技术的提高,薄膜的表面质量得到了很大的改善,使利用静电成形法制造大口径膜基反射镜成为可能,美国亚利桑那大学利用该方法已研制出口径达 1 m 的薄膜反射镜<sup>[10]</sup>。

本文首先对静电拉伸薄膜反射镜成形条件进行了阐述,随后从理论上分析了静电场中空间电势分布特性,采用数值方法计算出静电力变化规律。对单电极静电场中薄膜反射镜的面形进行了数值计算,并与理想抛物面形进行了比较。通过实验验证了静电成形法控制薄膜反射镜面形的可行性和器件工作的稳定性,薄膜变形的对称性较好。

## 2 静电成形控制原理

静电拉伸薄膜反射镜面形控制主要是通过控制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,是由电流做功来完成的。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,空间静电势则主要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。成形控制过程包括两个方面内容:(1)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;(2)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,使薄膜曲面对变形前再做一定变形,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。

研究静电拉伸薄膜反射镜控制机理意在搞清静电力与薄膜变形的载荷作用力之间的平衡关系。对于复杂的变形中间过程可以从静电力平衡原理的基础上再做深入的研究。

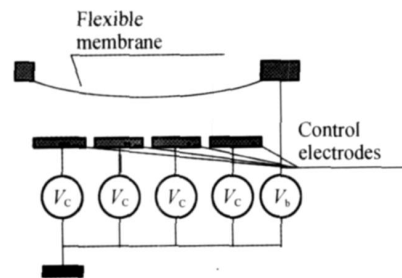


图 1 静电拉伸薄膜反射镜的物理模型

Fig. 1 Physical model of SEMC

如图 1 所示,在电极上加上各种高电压,让镀有金属物质的薄膜表面接一低电势,在薄膜与极板之间会形成一定的电场,由于电场间库仑力的作用会使薄膜的表面面形产生变形,控制电极间的电压会得到不同的薄膜面形,如果用得到的薄膜面形作为反射镜,那么就在静电作用下获得

了静电拉伸的薄膜反射镜。

简单的薄膜反射镜的作用模型可以简化为图 2 所示的情形,改变电极上的电势分布函数,则可获得一系列曲面面形。静电拉伸薄膜反射镜主要可控量为电极上的静电势,而真正产生静电库仑作用力却是由电荷引力所引起的。

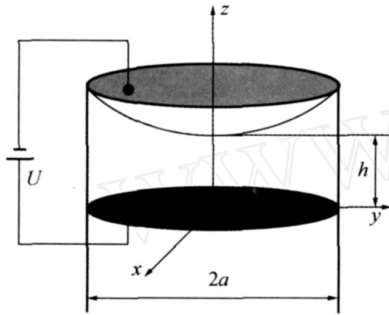


图 2 静电作用简化模型

Fig. 2 Simplified model under electrostatic action

图 3 中,  $D$  为平面电极,  $T$  为薄膜曲面,假设在一定的空间电势分布下,薄膜变形力与静电力达到平衡。

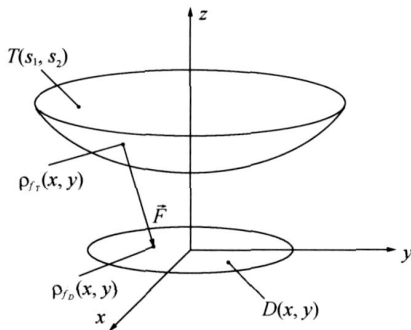


图 3 静电拉伸的作用力模型

Fig. 3 Force model of SMEC

在  $D$  上电荷密度分布函数为:

$$f_D = f_D(x, y), \quad (1)$$

在  $T$  上电荷密度分布函数为:

$$f_T = f_T(s_1, s_2), \quad (2)$$

则曲面  $T$  上任一点所受电场力为:

$$F = \iint_A \frac{f_D(x, y) f_T(s_1, s_2)}{r^2(x, y, s_1, s_2)} \rho dxdy, \quad (3)$$

显然静电场的大小不仅与极板上的电势有关,而且与最终的薄膜面形有关。这样来看就得出以下结论:电荷分布决定了薄膜面形的变化,而同时薄膜面形的变化又在产生新的电荷分布,整

个成形的过程是电荷变化与曲面变形交替变化的过程,最终结果是电荷作用力与变形载荷力达到平衡,则曲面变形电荷分布也趋于稳定。

### 3 静电场中空间电势分布特性

如前面所述,薄膜所受静电力的大小与极板上的电势和最终薄膜的面形有关,整个成形的过程是电荷变化与曲面变形交替变化的过程,对于这样复杂的过程,要想采用动态的方法对其进行研究通常是比较困难的。如果先将最终面形确定,再对该面形下的电势特性进行研究,进而求得薄膜表面上静电力的分布情况,便可使问题简化。事实上,在使用薄膜反射镜的过程中,也总是根据应用需要,首先确定反射镜面形需要满足的条件,然后再通过面形控制方法获得所需面形。这里针对近电场中的基本方程进行求解。

静态场的势函数满足拉普拉斯方程,由于薄膜与电极均采用了圆结构,可以肯定其电场中各个作用量将具对圆对称结构。相应的分析也应转入圆柱坐标下,相应的拉普拉斯方程表达式<sup>[11]</sup>为:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial \phi}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \phi}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0, \quad (4)$$

采用分离变量法对上式进行求解,设势函数为:

$$\phi(r, \theta, z) = R(r) \Theta(\theta) Z(z), \quad (5)$$

式中,  $R(r)$ 、 $\Theta(\theta)$  与  $Z(z)$  是分别只含  $r$ 、 $\theta$ 、 $z$  的函数,将上式代入方程后得到势函数  $\phi(r, \theta, z)$  的通解为:

$$\phi(r, \theta, z) = [C_1 J_n(kr) + C_2 N_n(kr)] [B_1 \cos(n\theta) + B_2 \sin(n\theta)] [A_1 \text{ch}(kz) + A_2 \text{sh}(kz)], \quad (6)$$

其中,

$$\frac{1}{Z} \frac{d^2 Z}{dz^2} = k^2, \quad (7)$$

$$\frac{1}{d} \frac{d^2}{d^2} = -n^2, \quad (8)$$

$A_1$ 、 $A_2$ 、 $B_1$ 、 $B_2$ 、 $C_1$ 、 $C_2$  为与  $r$ 、 $\theta$ 、 $z$  无关的系数。针对静电拉伸薄膜反射镜的工作情况,运用边界条件可确定式(6)中的待定系数。

单电极的情况比较简单,且可以看作多电极的特殊情况,作为特例,这里选取三等分环状电极情况进行求解。

按图 2 建立分析模型,设薄膜变形后的生成回转曲面方程为:  $z = f(r)$ , 薄膜接地,电极接高

压正极,薄膜与电极口径相同。以电极中心为原点,在边界  $z=0, r < a$  处,电势由函数  $g = h(r)$  分布形成环状电极分布;在膜上,电势为零,故取如下边界条件:

- (1)  $z=0, r < a, \phi = h(r)$ ,
- (2)  $z = f(r), r < a, \phi = 0$ ,
- (3)  $r=0, \phi = 0$ ,

考虑到静电加载时边界用绝缘材料隔离,并在外层接地处理,加入以下强边界条件:

- (4)  $r = a, \phi = 0$ ,

由于圆对称性则有:  $\frac{\partial \phi}{\partial r} = 0$ , 所以取以下势函数:

$$\begin{aligned} \phi(r, z) &= R(r) Z(z) = \\ &[C_1 J_0(kr) + C_2 N_0(kr)] \cdot \\ &[A_1 \operatorname{ch}(kz) + A_2 \operatorname{sh}(kz)], \end{aligned} \quad (9)$$

首先利用条件(3)得到  $C_2 = 0$ , 利用条件(4)可得到:

$$\phi(r, z) = \sum_{p=1} A_p J_0(x_p \frac{r}{a}) \left[ \operatorname{sh}\left(\frac{x_p z}{a}\right) + \operatorname{ch}\left(\frac{x_p z}{a}\right) \right], \quad (10)$$

(其中,  $A_p = \frac{A_1}{A_2}$ ),

由条件(1)得:

$$\phi(r, 0) = \sum_{p=1} A_p J_0(x_p \frac{r}{a}) = h(r), \quad (11)$$

对  $h(r)$  做贝塞尔-傅里叶展开得:

$$h(r) = \sum_{p=1} M_p J_0(x_p \frac{r}{a}), \quad (12)$$

其中,

$$M_p = \frac{2}{\{a J_1(x_p)\}^2} \int_0^a r h(r) J_0(x_p \frac{r}{a}) dr, \quad (13)$$

比较式(11)与式(12)可得

$$A_p = M_p, \quad (14)$$

在膜上,  $\phi = 0$ , 故有:

$$\begin{aligned} \phi(r, f(r)) &= \sum_{p=1} A_p J_0\left(\frac{r x_p}{a}\right) \\ &\left[ \operatorname{sh}\left(\frac{f(r) x_p}{a}\right) + \operatorname{ch}\left(\frac{f(r) x_p}{a}\right) \right] = 0, \end{aligned}$$

故

$$= - \frac{\operatorname{sh}\left(\frac{f(r) x_p}{a}\right)}{\operatorname{ch}\left(\frac{f(r) x_p}{a}\right)}, \quad (15)$$

对于三等分环状电极的情况,

$$h(r) = \begin{cases} U_1 & r \in [0, a/3) \\ U_2 & r \in [a/3, 2a/3) \\ U_3 & r \in [2a/3, a) \end{cases}, \quad (16)$$

则对式(13)进行分段积分得:

$$M_p = \frac{2}{x_p [J_1(x_p)]^2} \times Q, \quad (17)$$

其中,

$$Q = \frac{1}{3} J_1\left(\frac{x_p}{3}\right) (u_1 - u_2) + \frac{2}{3} J_1\left(\frac{2x_p}{3}\right) (u_2 - u_3) + J_1(x_p) u_3,$$

代入式(14)可求出  $A_p$ , 最终得到:

$$\phi(r, z) = \sum_{p=1} \frac{2 J_0(x_p \frac{r}{a}) \times Q}{x_p [J_1(x_p)]^2} \cdot \frac{\operatorname{sh}[x_p \cdot (f(r) - z)/a]}{\operatorname{sh}(f(r) x_p/a)}. \quad (18)$$

## 4 电场力的数值计算及实验

由于薄膜表面的电势值一定,根据等势体的概念,电场强度与电场力的方向总是与这一等势面垂直,因此可利用差分与电势方程结合的方法求解电场力。

设表面面形方程为  $f(r) = r^2 + h$ , 求得等势面的切矢为  $\mathbf{e} = (1, 2r)$ , 则场强单位矢量方向为  $\mathbf{e} = \frac{(2r, -1)}{\sqrt{4r^2 + 1}}$ 。

设薄膜表面任一点  $T_0 = (r, z)$  的电势为  $\phi(T_0)$ ,  $T_0$  点的场强可以表示为:

$$E_0 = \lim_{\mathbf{e}} \frac{[\phi(T_0 + \mathbf{e}) - \phi(T_0)]}{|\mathbf{e}|}, \quad (19)$$

现取某一小  $\Delta$  值,场强可以近似表示为:

$$E = \frac{[\phi(T) - \phi(T_0)]}{\Delta}, \quad (20)$$

选择足够小的  $\Delta$ , 则场强就可以接近实际值。设在薄膜表面上存电荷分布的面密度函数为:

$$\rho = \rho(r, z), \quad (21)$$

根据静电平衡下高斯公式有:

$$E = \frac{\rho}{\epsilon_0}, \quad (22)$$

其中,  $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ C}^2 \text{ N}^{-1} \text{ m}^{-2}$  为真空介电常数,实际空气介电常数用此值代替。因为反射镜结构中的电场由两个电量相等,分别带正负电荷的带电体产生,薄膜表面不再是一个独立的带电体,考虑到成形薄膜曲面曲率较小,可近似认为正负电荷分布相同,所以其电荷密度近似为高斯公

式下的一半。

$$(r, z) = \frac{1}{2} \epsilon_0 E(r, z), \quad (23)$$

薄膜上任一点所受作用力为:

$$F = E(r, z) = \frac{1}{2} \epsilon_0 E^2 \frac{E}{|E|}, \quad (24)$$

力的方向与  $e = \frac{(2r-1)}{\sqrt{4r^2+1}}$  同向,这样就可用

这种近似差分的办法来求解实际上电场力。

### 4.1 单电极电场力模拟

在式(16)中取  $U_1 = U_2 = U_3 = U$  即为单电极情况,通过 matlab 编程,假设薄膜反射镜的面形方程为  $f(r) = r^2 + h$ ,尺寸参数如下:

- 反射镜半径:  $r = 0.15 \text{ m}$ ,  $\alpha = 0.125$ ,
- 电极半径:  $r = 0.15 \text{ m}$ ,
- 极间距:  $h = 0.01 \text{ m}$ ,
- 电压:  $U = 10\,000 \text{ V}$ ,
- 取  $\epsilon = 0.0005$ 。

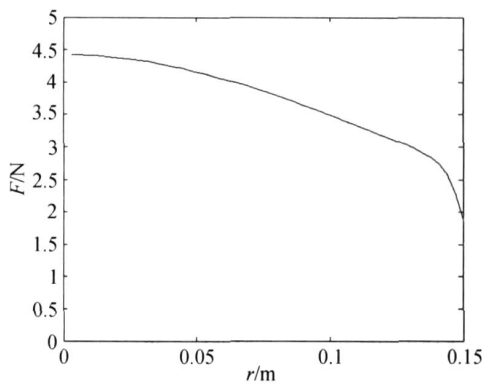


图 4 单电极静电场的静电力分布

Fig. 4 Electrostatic force distribution in single electrode field

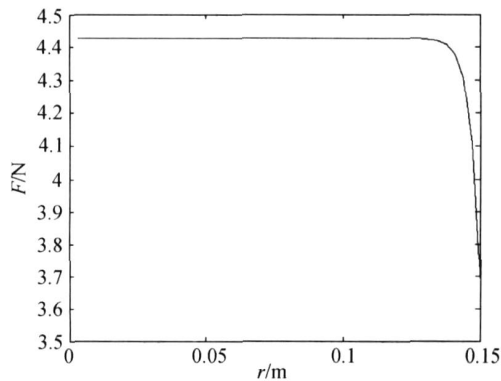


图 5 单电极  $\alpha=0$  的静电力分布

Fig. 5 Electrostatic force distribution when  $\alpha=0$

图 4 反应了薄膜面形上的受力情况,随着半径  $r$  向边缘的接近,静电力显著下降。在单电极情况下薄膜受到的力是由中心向边缘逐渐减小的变化密度力,单电极静电力随半径的变化可用方程(19)来表示:

$$F = 301.4r^3 - 127.1r^2 + 0.3666r + 4.392, \quad (25)$$

如果取  $\alpha = 0$ ,即为平行平板的情况,如图 5 所示。图中电场力为一条直线,近似匀强电场,这与平板电容实际模型的情况完全相符,进一步证明了以上计算方法的正确性。

### 4.2 多电极电场力模拟

多电极情况下,以上述三等分环状电极进行了电场力的模拟。取  $r = 0.15 \text{ m}$ ;  $h = 0.008 \text{ m}$ ;  $\alpha = 0.05$ ;  $U_1 = 7\,000 \text{ V}$ ;  $U_2 = 7\,300 \text{ V}$ ;  $U_3 = 7\,800 \text{ V}$ ,得到电场力变化如图 6 所示,并将之与相同条件下  $U = 7\,000 \text{ V}$  的单电极情况做比较。

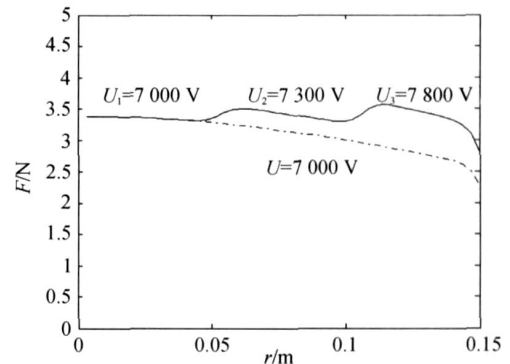


图 6 三等分环状电极的静电力分布

Fig. 6 Electrostatic force distribution in trisection circularity electrode field

从图中可以看出,单电极情况下获得的电场力控制比较单一,而对多电极情况,不同区间所受电场力可灵活调节,且受力曲线更接近均布力分布<sup>[12]</sup>,更有利于应用有限元分析后与理论分析进行比较。

目前,针对上述薄膜成形的复杂过程及其面形控制在理论分析上仍未有定量的结果,本文采用的方法是,先通过数值计算的方法求出静电场中薄膜反射镜镜面上的受力情况,再运用有限元求解的方式得到该受力情况下的反射镜面形。

实验中搭建的薄膜反射镜平台的反射镜口径是 180 mm,仍采用上述静电力计算方法,用有限元软件进行了计算,并将计算面形与理想面形进

行了比较(图 7),其中计算面形是直接由有限元软件提取的曲线,所以不存在拟合误差。由图 7 可以看到,计算面形与理想抛物面形存在一定的误差,即单电极情况下得到的薄膜反射镜面形不是理想抛物面。

反射镜半径:  $r = 0.09 \text{ m}$ ,

薄膜厚度:  $t = 25 \mu\text{m}$ ,

极间距:  $h = 0.01 \text{ m}$ ,

电压:  $U = 10\,000 \text{ V}$ ,

反射镜最大变形:  $Z_{\max} = 0.001\,094\,8 \text{ mm}$ 。

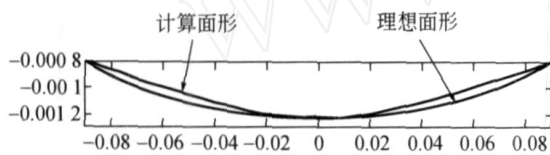


图 7 计算面形与理想抛物面形的比较

Fig. 7 Comparison between calculated figure and ideal paraboloid

#### 4.3 实验结果

为了验证控制薄膜反射镜的可行性和上述分析所得到的结论,现阶段已经搭建完成了单电极静电拉伸薄膜反射镜平台,反射镜实物图及其主要参数分别由图 8 和表 1 给出。

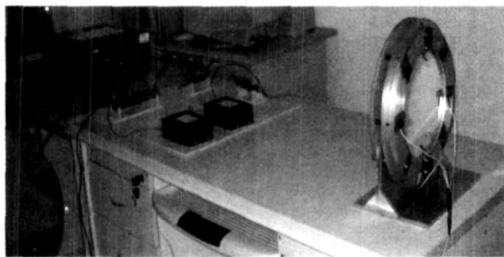


图 8 静电拉伸薄膜反射镜试验

Fig. 8 Experiment of SMEC

实验过程中分别在 1 000、2 000、4 000、6 000、10 000 V 5 个工作点进行了检测,系统长时间工作安全稳定,证明了所设计系统的相对合理性;实验最终测得在电压为 10 000 V 时的反射镜焦距大约为 2.1 m,反射镜中心光斑尺寸大约为半径 0.5 mm,在现有的条件下,能够说明本文所测的焦距基本准确;随着电压的升高,薄膜反射

镜形成的光斑向镜面方向移动,说明镜面曲率逐渐变大;当电压保持稳定时,光斑静止不动,说明此时薄膜面形保持不变,证明了用高压实时控制反射镜面形是可行的;同一电压下,在径向和周向对薄膜面形进行扫描检测,证明薄膜变形的对称性较好。

表 1 单电极静电拉伸薄膜反射镜主要参数

Tab. 1 Main parameters of SMEC under single electrode

参数	单位	值
薄膜半径 ( $R$ )	mm	90
薄膜面积 ( $A$ )	$\text{m}^2$	0.025 43
极间距 ( $d$ )	mm	12
最大电压 ( $U$ )	V	10 000
电容 ( $C$ )	pF	22.509
最大电量 ( $Q$ )	C	$0.22 \times 10^{-6}$
最大静电力 ( $F$ )	N	0.112 5
最大平均面力 ( $P$ )	Pa	4.425

## 5 结 论

本文给出了一种控制薄膜反射镜面形的方法,并对薄膜反射镜成形原理、空间电势分布特性和薄膜受力分布进行了详细的理论分析和数值模拟。计算结果表明,多电极控制情况比单电极情况下受力更接近均布力分布,口径 180 mm 的薄膜反射镜在相同口径单电极控制下,施加 10 000 V 电压可得到反射镜最大变形为 0.001 094 8 mm。单电极控制下的薄膜反射镜,在电压为 10 000 V 时的反射镜焦距大约为 2.1 m,反射镜中心光斑尺寸大约为半径 0.5 mm,系统长时间工作安全稳定,薄膜变形的对称性较好。

单电极模式是静电拉伸薄反射镜最简单的工作模式。由于仅采用单一电势的控制方案,薄膜表面受力分布函数被局限于某一单调变化过程中,所形成曲面通常不能达到空间光学使用的要求,如果采用增加电极的方式对不同区域的薄膜镜面进行调整,可大大增加面形精度。

## 参考文献:

- [1] 高明辉,刘磊,任建岳. 空间相机反射镜碳化硅材料性能测试[J]. 光学精密工程,2007,15(8):1170-1174.  
GAO M H, LIU L, REN J Y. Characteristic test of SiC for space camera's mirror[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007,15(8):1170-1174. (in Chinese)
- [2] 张舸,赵文兴. 轻型反射镜镜体结构参数的分析[J]. 光学精密工程,2006,14(1):48-53.  
ZHANG G,ZHAO W X. Analysis on structural parameters of light-weighted mirror[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006,14(1):48-53. (in Chinese)
- [3] 陈亚,宋淑梅. 大口径轻质反射镜坯的制造[J]. 光学精密工程,2004,12(4):402-405.  
CHEN Y, SONG S M. Manufacturing of a big aperture lightweight mirror[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004,12(4):402-405. (in Chinese)
- [4] PALISOC A, VEAL G, CASSAPAKIS C, et al.. Geometry attained by pressurized membranes [J]. *SPIE*, 1998,3356:747-757.
- [5] ANDERSON G P, KNIZE R J. Large-aperture holographically corrected membrane telescope[J]. *Opt. Eng.*, 2002,41(7):1603-1607.
- [6] ANGEL R, BURGEJ, HEGE K, et al.. Stretched membrane with electrostatic curvature (SMEC): a new technology for ultra-lightweight space telescope[J]. *SPIE*,2000,4013:699-705.
- [7] MOORE J D, PATRICK B, GIEROW P A, et al.. Design, test, and evaluation of an electrostatically figured membrane mirror [J]. *SPIE*, 2004, 5166:188-195.
- [8] BURLEY G S, STILBURN J R, WALKER G A H. Membrane mirror and bias electronics [J]. *Applied Optics*, 1998,37(21):4649-4655.
- [9] CENTAMORE R M, WIRTH A. High-bias membrane mirror [J]. *SPIE*, 1991, 1543:128-132.
- [10] ERRICO S, ANGEL R, STAMPER B, et al.. Stretched membrane with electronic curvature (SMEC) mirrors: a new technology for large lightweight space telescopes [J]. *SPIE*, 2002, 4849:356-364.
- [11] 解广润. 高压静电场[M]. 上海:上海科学技术出版社, 1987:222-231.  
XIE G R. *High Voltage Electrostatic Field*[M]. Shanghai: Shanghai Scientific and Technical Publishers, 1987:222-231. (in Chinese)
- [12] 齐迎春,金光,等. 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 Y CH, JIN G, et al.. Design and optimization for shape of space membrane mirror [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007,15(6):818-823. (in Chinese)

## 作者简介:



张 鹰(1978-),男,吉林长春人,博士研究生,主要从事光波导器件、光开关及光学设计等方面的研究。E-mail:eagle1978@sina.com

## 导师简介:

金 光(1958-),男,吉林长春人,博士生导师,主要研究方向为天基空间光学成像技术。E-mail:jing@ciomp.ac.cn