

文章编号 1004-924X(2012)02-0344-08

静电拉伸薄膜反射镜的多电极成形控制

张 鹏^{1,2*}, 金 光¹, 张 元¹, 钟 兴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:针对现有薄膜反射镜成形控制方法存在求解复杂,工程实用性差等问题,提出了基于反演求解的半解析成形控制方法。首先,基于 Karman 方程和静电场理论推导了所要拉伸的抛物面面形与施加压强分布的关系及实验所需的离散电极环电压值;其次,利用有限元软件建模和分析,验证所推导的压强分布;最后,在口径为 300 mm 的三环电极的静电拉伸反射镜实验平台上进行了验证实验。实验显示,拉伸面形最大变形量与理论值基本吻合,面形误差与传统均匀压强下的相比有所减少,最好的实验结果得到的 PV 值和 RMS 值较均匀压强下的值分别减少了 9.76% 和 15.38%。仿真及实验结果表明:所描述的方法可以控制面形并提高面形精度,与传统的成形控制方法相比较具有简单实用等优点。

关键词:静电拉伸薄膜;薄膜反射镜;成形控制;反演求解

中图分类号:TH751;TH703 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20122002.0344

Surface shape control of electrostatic stretching membrane mirror by multi-electrodes

ZHANG Peng^{1,2*}, JIN Guang¹, ZHANG Yuan¹, ZHONG Xing¹

(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: For the complex control and unpractical calculation of the surface shape control method for an electrostatic stretching membrane mirror in engineering, a semi-analytical method of surface shape control based on an inverse approach was proposed. Firstly, the relation between required pressure distribution and voltages and the desired parabolic shape were derived based on the Karman equation and electrostatic field theory. Then, the finite element analysis was used to establish a model to validate the pressure distribution and a verified test was performed on a $\Phi 300$ mm three concentric annular electrode membrane mirror. The experimental results show that the measured values of max displacement are consistent with the theoretical ones basically. The surface shape error has been reduced as compared with that of traditional method and the best RMS and PV values of shape surfaces have reduced by 9.76% and 15.38% respectively under a uniform pressure. In conclusion, the method described

收稿日期:2011-05-20;修订日期:2011-07-28.

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

can control surface shape and can improve the surface accuracy. Compared with other methods, the method is simpler and more practical.

Key words: electrostatic stretching membrane; membrane mirror; surface shape control; inverse approach

1 引言

近年来,国内外在发展一种以柔性薄膜为基底材料的新概念超轻反射镜——薄膜反射镜。与传统的大口径反射镜相比,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、重量轻等优点^[1]。

薄膜反射镜的成形控制是要建立在一定边界条件下反射镜面形与施加载荷的相互关系,并利用所建立的关系施加载荷以控制薄膜反射镜成形。目前国内外研究机构对薄膜反射镜的成形控制展开了大量研究,其中文献[2-4]利用基于泊松方程的薄膜小变形理论控制薄膜反射镜成形,方法简单易行,但只适用薄膜小变形。文献[5]基于 Karman 方程的大变形理论研究了均匀压强下的薄膜拉伸成形。文献[6-8]研究了基于大变形理论的有限元分区优化控制方法,适合薄膜大变形拉伸,但求解过程复杂且不利于实时控制。文献[9-10]利用边界静电拉伸控制及多模激励控制对薄膜反射镜进行成形控制。文献[11]采用模糊控制理论控制薄膜反射镜成形,避免了复杂的数学控制模型的建立,但硬件要求高且工程实用性差。文献[12]从静电场分布模型的角度给出抛物面薄膜条件下多电极的电场强度分布和电场力,但求解难度较大且不能反映出初始面形和预应力施加情况。所以现有的薄膜反射镜成形控制求解往往过程复杂,工程实用性差。

基于上述原因,本文在原有的 Karman 方程基础上,通过推导计算给出一定边界条件下的反射镜抛物面面形与施加载荷的关系,进行了有限元仿真及实验验证,并给出及分析了相关结果。

2 静电拉伸薄膜反射镜成形控制

薄膜反射镜在均匀压强作用下的面形是近似抛物面,在非均匀压强作用下可以进一步提高面形精度^[5,7,11]。本文基于 Karman 方程给出一种

成形控制方法,具体如下:在已知所需抛物面面形下,反演求解一定边界条件下薄膜反射镜所施加的压强分布,再利用静电场理论转化为实验中所需离散电极环的电压值,利用推导结果来控制薄膜反射镜成形及提高面形精度。图1为成形控制推导示意图。

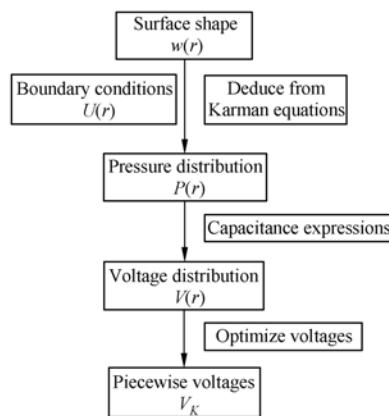


图1 薄膜反射镜成形控制推导示意图

Fig. 1 Schematics of derivation of surface shape control

2.1 静电拉伸薄膜反射镜成形理论

薄膜反射镜中的薄膜周边被固定在圆环装置上,当平面薄膜受压强载荷作用时,薄膜上各点相对于初始平面薄膜位置产生位移,由于薄膜几乎没有横向刚度、不能承受弯矩的特点,由 Karman 方程圆薄膜理论化简后得到的圆薄膜大变形方程为^[13]

$$N_r \frac{d\omega}{dr} + \frac{1}{r} \int p r dr = 0, \quad (1)$$

$$r \frac{d}{dr} \left[\frac{1}{r} \frac{d}{dr} (r^2 N_r) \right] + \frac{hE}{2} \left(\frac{d\omega}{dr} \right)^2 = 0, \quad (2)$$

其中 E 为薄膜的弹性模量, h 为薄膜厚度, N_r 为应力函数, ω 为挠度值, r 为极坐标沿薄膜口径方向, p 为薄膜受到的压强。

薄膜被固定在圆环装置上,其初始条件可表示为

$$\begin{aligned} \omega(a) &= 0 \\ U(a) &= U_a \end{aligned}$$

$$U(r) = \frac{r}{Eh} \left[\frac{1}{r} \frac{d}{dr} (r^3 N_r) - (1+\nu) N_r \right], \quad (3)$$

其中 U_a 表示薄膜在 $r=a$ 处沿 r 方向的位移量, 表征初始状态下薄膜周边被固定和拉伸的程度, ν 为薄膜的泊松比。 $U_a=0$ 表示圆形薄膜周边处于自由平展状态, 沿 r 方向不发生位移;

如先前所述, 当 p 为常数时, 面形近似抛物面, 精度有限。为了得到面形精度高的抛物面, 有必要调整压强的分布和强度。通常以过边界点与中心点的抛物面为理想抛物面面形^[14], 这里对理想抛物面面形所需施加的压强分布进行推导, 理想抛物面表达式如下

$$\omega(r) = \omega_0 \left[1 - \left(\frac{r}{a} \right)^2 \right], \quad (4)$$

其中: ω_0 为中心挠度, a 为薄膜反射镜半径, 假设压强分布为关于半径 r 的二次多项式, 定义为

$$P = P_0 + P_2 r^2, \quad (5)$$

其中 P_0, P_2 为待定系数。

将(4)、(5)代入式(1)则有

$$N_r \frac{2\omega_0}{a^2} r = \frac{p_0}{2} r + \frac{p_2}{4} r^3. \quad (6)$$

由式(6)可知, N_r 是关于半径 r 的二次多项式, 定义如下

$$N_r = N_0 + N_2 r^2, \quad (7)$$

将(7)代入式(6), 对比系数可得

$$\begin{cases} P_0 = \frac{4\omega_0 N_0}{a^2} \\ P_2 = \frac{8\omega_0 N_2}{a^2} \end{cases}, \quad (8)$$

只需求解出 N_0, N_2 , 就可到压强分布。

将(6)代入(2)得到

$$N_2 = -\frac{Eh\omega_0^2}{4a^4}, \quad (9)$$

将(7)代入边界条件(3)有

$$N_0 = \frac{U_a Eh}{a(1-\nu)} - \frac{(3-\nu)}{(1-\nu)} N_2 a^2, \quad (10)$$

将(9)与(10)代入(8)可得

$$\begin{cases} P_0 = \frac{4\omega_0 U_a Eh}{a^3(1-\nu)} + \frac{(3-\nu) Eh \omega_0^3}{(1-\nu) a^4} \\ P_2 = -\frac{2 Eh \omega_0^3}{a^6} \end{cases}, \quad (11)$$

得到所需压强分布表达式

$$p = \left[\frac{(3-\nu) Eh \omega_0^3}{(1-\nu) a^4} + \frac{4\omega_0 U_a Eh}{a^3(1-\nu)} \right] - \frac{2 Eh \omega_0^3}{a^6} r^2, \quad (12)$$

式(12)建立了薄膜反射镜所拉伸抛物面面形与边界条件、压强分布的关系。

2.2 静电拉伸薄膜反射镜电极电压值确定

静电拉伸薄膜反射镜通过静电库伦力对薄膜拉伸成形, 工作原理如图 2 所示。式(12)给出推导压强分布, 而实际输入值为同心环电极电压值。所以根据静电场理论转换压强与电压之间的关系^[15]

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

其中 p 为电极产生的压强, ϵ_0 为真空介电常数, V 为电极上的电压值, d 为膜极间距, 实验中 $d=5$ mm。将式(12)代入(13), 则电压分布表达式为

$$V(r) = d \sqrt{\frac{2}{\epsilon_0} \left[\frac{(3-\nu) Eh \omega_0^3}{(1-\nu) a^4} + \frac{4\omega_0 U_a Eh}{a^3(1-\nu)} - \frac{2 Eh \omega_0^3}{a^6} r^2 \right]}. \quad (14)$$

由式(14)可知拉伸面形所需施加的为连续电压, 而薄膜反射镜的电极环数量有限, 所以必须将电压分布近似转换为所需的离散电极环电压值。这里可以在离散电极电压值上采点, 通过以离散电极电压值为变量使得所采点与电压曲线之间的偏差最小, 得到最贴近电压曲线的离散电压值。

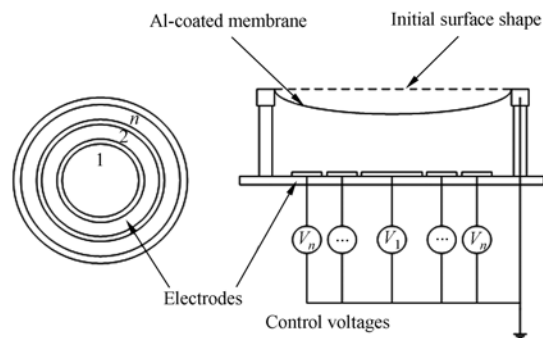


图 2 静电拉伸薄膜反射镜原理

Fig. 2 Principle of electrostatic stretching membrane mirror

3 薄膜反射镜成形有限元仿真

利用有限元软件对薄膜反射镜进行建模及分析。采用由一维线网格(母线)扫掠(sweep 旋转)生成二维面网格来建模, 所用薄膜反射镜及聚酰

亚胺薄膜相关参数如表 1 所示,有限元模型如图 3 所示。

表 1 薄膜反射镜及薄膜相关参数

Tab. 1 Parameters of membrane mirror and polyimide membrane

圆薄膜半径	薄膜厚度	杨氏模量	泊松比	热膨胀系数	密度
0.15 m	25 μm	$4.0 \times 10^9 \text{ Pa}$	0.335	$20 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$	1 400 kg/m^3

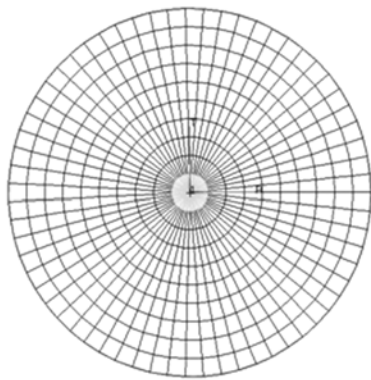


图 3 薄膜反射镜有限元模型

Fig. 3 Finite element model of membrane mirror

首先,由于薄膜抗弯矩能力极小,不存在稳定的无应力状态,需要施加一定的预应力才能形成结构的基本形态。由于径向位移与温度差的关系^[16]:

$$U_a = -a \times \alpha \Delta t, \quad (15)$$

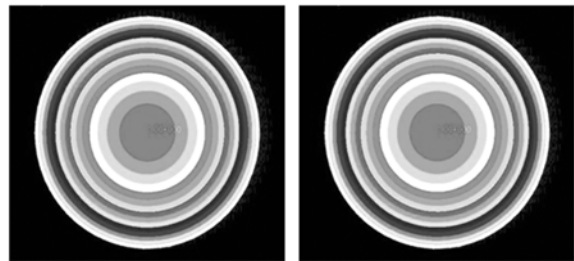
其中 a 为薄膜反射镜半径, α 为热膨胀系数, Δt 为温度差。所以根据式(15)通过降温 11.098 7 $^\circ\text{C}$ 来模拟位移 $U_a = 3.329\ 62 \times 10^{-5} \text{ m}$, 在薄膜表面施加一定预张力。

其次,针对相同焦距(最大变形量相同)的抛物面在有限元模型上施加均匀压强^[5]和由式(12)计算的压强分布,比较不同压强下薄膜反射镜面形。有限元仿真薄膜反射镜拉伸面形如图 4 所示,施加压强和变形量如表 2 所示。

表 2 薄膜施加压强和最大变形量

Tab. 2 Pressure and max displacement of membrane

施加压强/Pa	最大变形量/mm	
	理论值	有限仿真值
6.632 13	1	1.004 41
$6.725\ 77 - 17.558\ 3 \times r^2$	1	1.004 45



(a)均匀压强

(b)推导压强

(a)Under uniform pressure (b)Under deduced pressure

图 4 薄膜反射镜面形

Fig. 4 Figure of membrane mirror

由表 2 可知最大变形量有限元分析值和理论计算值基本一致。而从图 4 可知两图差别不易观察,所以要想获得反射镜的面形等信息,必须对这些数据进一步处理。有限元软件通过模拟施加的载荷、边界条件等一系列处理计算得到一组反射镜变形数据,这里选用 Zernike 多项式作为基底函数系,对镜面面形进行拟合,将拟合的面形代入 CodeV 软件分析,得到在期望的理想抛物面焦距处的反射波前误差,薄膜波前误差值如表 3 所示。在推导压强下薄膜反射镜波前误差 RMS 值减少 48.98%,如果增加有限元网格密度,波前误差将更小。上述分析表明,有限元仿真结果验证了所推导压强。

表 3 薄膜反射镜波前误差

Tab. 3 Wave aberrations of membrane mirror

施加压强	波前误差 RMS($\lambda=0.632\ 8 \mu\text{m}$)
均匀压强	2.519 7 λ
推导压强	1.285 6 λ

4 静电拉伸薄膜反射镜成形控制实验

为了验证所描述的薄膜反射镜成形控制方法,在 $\Phi 300 \text{ mm}$ 口径三环电极薄膜反射镜实验平台上进行了成形控制实验。薄膜反射镜夹持结构分为内外环,如图 5 所示的,其中外环用于固定薄膜边界,内环用于提供径向位移,内外环设计间隔为 15 mm。可通过三角关系求得径向位移 U_a 与内环顶起高度 h 的关系: $h^2 = (U_a + 15)^2 - 15^2$,

从而建立边界条件理论与实验的关系。

实验所用薄膜反射镜的装置如图 6 所示。首先通过内环顶圈推进 0.5 mm 来施加径向位移 $U_a = 8.331\ 019 \times 10^{-6}$ m, 其次分别按照式(14)和均匀压强控制^[5] 计算所需的电压曲线, 并按 2 : 1 : 1 电极环宽度比来离散化电极环电压实现成形控制, 实验具体内容如表 4 所示。最后薄膜在静电库伦力作用下拉伸成形, 待面形稳定后进行面形测量。

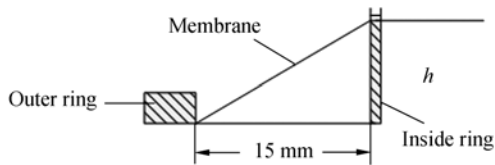


图 5 薄膜反射镜边界示意图

Fig. 5 Schematics of boundary of membrane mirror

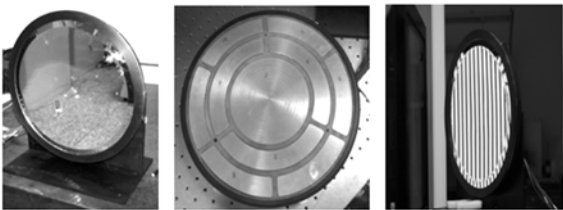


图 6 薄膜反射镜装置和条纹图

Fig. 6 Membrane mirror and fringe

表 4 薄膜反射镜实验施加电压值

Tab. 4 Voltages in membrane mirror experiment

最大变形量/mm	施加压强/Pa		离散电压值/V	
	均匀压强	推导压强	均匀压强	推导压强
1.5	4.647 77	4.898 85-5	5 123.1	5 200.8
		$9.259\ 3 \times r^2$		4 969.1
				4 675.5
2	8.758 11	9.302 43-1	7 032.6	7 145.6
		$40.466 \times r^2$		6 743.5
				6 225.7

现处于研究薄膜反射镜成形控制机理阶段, 薄膜面形不固定, 随施加电压而改变, 特别是小变形长焦距情况下, 对于传统的测量方法受到空间的限制使用不方便。而光栅投影方法既可以测量

三维轮廓, 又能得出拉伸面形的大致焦距值, 同时该类测量方法精度在微米级别, 满足薄膜反射镜精度要求^[17]。所以选择光栅投影方法测量薄膜反射镜所拉伸面形。

该方法根据光栅移相图求解出反射镜镜面的相位分布图, 其次对相位进行展开, 最后基于相位和矢高之间关系式使用数值积分, 得到薄膜反射镜面形三维轮廓图。以实验测得的中心点和边界点确定的抛物面为理想面形计算出 PV、RMS 值, 如表 5 所示。

表 5 薄膜反射镜面形测量数据

Tab. 5 Figure data of membrane mirror

实验序号	类型	最大变形量/mm		面形偏差/mm	
		实验值	理论值	PV	RMS
1	均匀压强	1.639	1.5	0.144	0.025
	推导压强	1.630	1.5	0.136	0.022
2	均匀压强	2.171	2	0.205	0.039
	推导压强	2.293	2	0.185	0.033

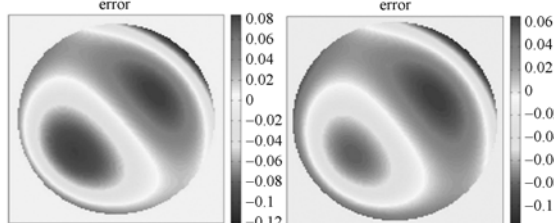
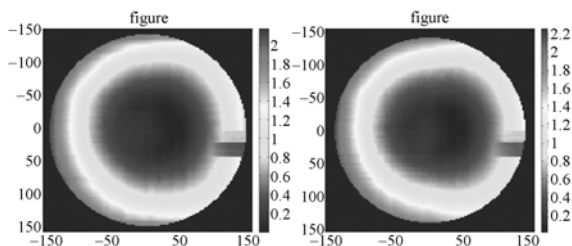
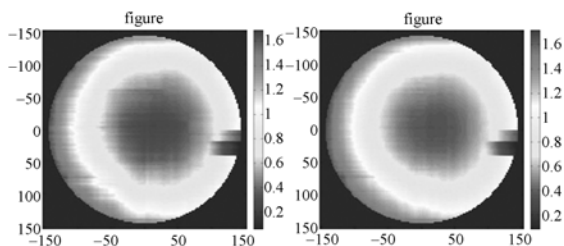
测量结果如表 5、图 7 所示, 由两组实验测量结果可知其最大变形量测量值与理论值基本吻合, 推导压强下面形误差 PV 值及 RMS 值都小于均匀压强下的。其中第一组实验的 PV 值减少了 5.56%, RMS 值减少了 12%; 第二组实验的 PV 值减少了 9.76%, RMS 值减少了 15.38%。所以认为所描述的成形控制方法可以控制面形且更接近抛物面面形, 提高薄膜反射镜的面形精度。

从第二组实验结果可知推导压强下的最大变形量偏离理论值比均匀压强的更大。分析主要原因是工作区的不稳定。在实验过程中, 当增加均匀压强至薄膜变形量为 2.171 mm 时, 薄膜可能处于不稳定状态^[18], 而后再改变压强分布将增加大变形的非线性及扩大边界条件不均匀的影响, 从而使得推导压强下的变形量偏离理论值更大。不过从结果看偏离量不大, 接近理论值, 基本可以验证所提方法的可控性。

另外从两组面形测量结果可看出面形误差大

部分表现为彗差。这里考虑测量过程中已经去除了离焦等影响,所以认为主要是边界及预张力不均匀导致在施加载荷作用下面形不对称,存在偏心和倾斜。在偏心和倾斜的影响下,面形误差表现为较大的彗差。

最后从实验结果可知面形精度的提高没有理论分析幅度大。这里认为实验中薄膜属性不均匀、机械结构硬件精度不够、环境因素影响及边界条件引入的误差导致面形精度的提高有限。



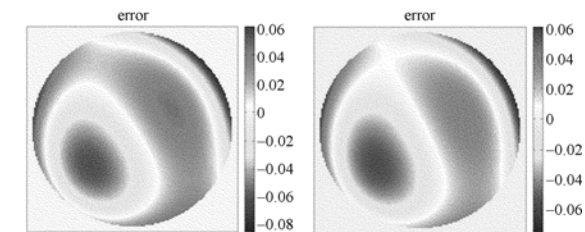
Experiment(2)

(c)均匀压强 (d)推导压强

(c)Under uniform pressure (d)Under deduced pressure

图 7 薄膜反射镜面形及面形偏差值

Fig. 7 Figures and figure errors of membrane mirror



Experiment (1)

(a)均匀压强 (b)推导压强

(a)Under uniform pressure (b)Under deduced pressure

5 结 论

针对目前成形控制方法求解复杂,工程实用性差的局限性,给出一种基于 Karman 方程反演求解的半解析成形控制方法。并利用有限元仿真对 $\Phi 300$ mm 薄膜反射镜进行了验证,结果表明:最大变形量值与理论计算基本吻合,使得面形更加接近抛物面,验证了所描述的方法能够控制薄膜成形,为薄膜实时成形控制及面形调整奠定了一定的技术基础。

参考文献:

[1] 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)
[2] SIMONA E, BRIAN S, JAMES B. Stretched membrane with electrostatic curvature (SMEC) mirrors: Demonstration of a new technology for large light-weight space telescopes[J]. *SPIE*,2002,3:108-110.

[3] CHEN X H, TANG M X, SHEN W M. Membrane mirror deformed by electrostatic pressure [J]. *SPIE*,2007,6721:67211-67218.
[4] 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 CH Y, et al.. Shaping control of membrane reflector [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009,17(4):732-737. (in Chinese)
[5] 陆丽娟,张庚生,唐敏学. 均匀载荷作用下膜基反射镜面形分析和研究[J]. 苏州大学学报(自然科学版),2009,25(4):53-58.
LU L J, ZHANG G SH, TANG M X. Analysis and research on the shape of membrane mirror applied

- by uniform load[J]. *Journal of Suzhou University (natural science)*, 2009,25(4):53-58. (in Chinese)
- [6] MOORE J, GIEROW P, PATRICK B, *et al.*. A parametric assessment of material properties, boundary conditions, and environmental effects on the performance of membrane optical systems [J]. *SPIE*, 4849, 2002:321-329.
- [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):818-828.
 QI Y CH, JIN G, XU Y J, *et al.*. The design and optimize about the shape of the space membrane mirror [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(6):818-828. (in Chinese)
- [8] 张鹏, 金光, 石广丰, 等. 多电极静电拉伸薄膜反射镜的面形优化[J]. *光电子·激光*, 2010, 21(10):1515-1518.
 ZHANG P, JIN G, SHI G F, *et al.*. Surface shape optimization for multi-electrode electrostatic stretching membrane mirror [J]. *Journal of Optoelectronics · laser*, 2010, 21(10):1515-1518. (in Chinese)
- [9] LISA R, MILES W, UMESH A K. Membrane mirrors with boundary located electrostatic actuators for excitation of multiple modes [C]. *50th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC structures, structural Dynamics, and Materials Conference 4-7 may 2009, palm springs, california*.
- [10] MILES W, BRIAN C F, UMESH A K. Closed loop electrostatic actuation of membrane mirrors [R]. boulder, Colorado, USA, 2010.
- [11] ZHANG G SH. minxue tang Design and simulation of the surface shape control system for membrane mirror [J]. *SPIE*, 2009, 7506:750610-1-750610-8.
- [12] 孙小伟. 空间薄膜反射镜控制机理研究 [D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2007.
 SUN X W. *The Research about the control Principle of the Space Membrane Mirror* [D]. Beijing: Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, 2007. (in Chinese)
- [13] 钱伟长, 林鸿荪, 胡海昌, 等. 弹性圆薄板大挠度问题 [M]. 北京: 中国科学院, 1954:8-9.
 QIAN W CH, LIN H S, HU H CH, *et al.*. *Large deflection problems of circular elastic plates* [M]. Bei jing: Chinese Academy of Science, 1954: 8-9. (in Chinese)
- [14] MARKER D K, JENKINS C H. Surface precision of optical membranes with curvature [J]. *Optics Express*, 1997, 1(11):324-331.
- [15] 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.
- [16] JENKINS C H, FAISAL S M. Thermal load effects on precision membranes [J]. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 2001, 38(2):207-211.
- [17] 刘元坤, 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, Shape measurement for reflector based on phase-shift and incoherent imaging [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2006, 17(4):458-463. (in Chinese)
- [18] MIHORA D J, REDMOND P J. Electrostatically formed antennas [J]. *Journal of Spacecraft*, 1980, 17(5):465-473.

作者简介:



张鹏(1985—)男, 福建长汀人, 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



金光(1958—)男, 吉林长春人, 研究员, 博士生导师, 主要从事空间遥感相机总体设计的研究。E-mail: jing@ciomp.ac.cn



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。E-mail:zhangyuanfresh@126.com



钟 兴(1982—)男,四川自贡人,副研究员,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,E-mail:ciomper@163.com

●下期预告

气溶胶对天空偏振辐射影响的测量

褚金奎,王 威,崔 岩,支 炜,高启升

(大连理工大学 精密与特种加工教育部重点实验室,辽宁 大连 116024)

研究气溶胶光学特性对天空偏振辐射的影响,对弄清实际天空偏振分布模式具有重要意义。采用自主搭建的天空偏振辐射测量系统,于不同日期、同一地点在太阳子午面内进行若干实验,分别测量太阳高度角约为 60° 时3个波段435~465 nm,535~565 nm,685~715 nm的光在散射角为 90° 时对应的偏振度、辐射强度等。气溶胶光学厚度由大气压强、能见度等参数进行理论计算获得。当气溶胶光学厚度在0.2~0.55之间逐渐增大时,3个波段对应的最大偏振度分别从43%减小到22%、从41%减小到21%、从38%减小到19%,而对应的辐射量不断增大。实验结果表明:随着气溶胶光学厚度的增大,偏振度不断减小,尤其是对长波长,偏振度衰减的更明显,从而不利于偏振光导航。