

静电薄膜反射镜的关键技术研究

石广丰¹, 金光², 张鹏²

(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)

摘要: 静电薄膜反射镜是一种空间光学应用新技术。在阐述静电薄膜反射镜的定义、研究意义和国内外研究现状的基础上, 讨论了静电薄膜反射镜的几种关键技术: 薄膜材料的制备、薄膜预应力调节、成形控制机理和方法、薄膜反射镜面形评价。根据已有的成形机理的研究, 分析了开展静电薄膜反射镜的紧迫形势以及目前所遇到的挑战性困难, 明确了我国当前开展静电薄膜反射镜的首要任务和方向。

关键词: 静电; 薄膜反射镜; 关键技术

中图分类号: TH751

文献标识码: A

文章编号: 1672 - 9870 (2009) 04 - 0592 - 03

Key Technologies of Electrostatic Membrane Reflector

SHI Guangfeng¹, JIN Guang², ZHANG Peng²

(1.Changchun University of Science and Technology, College of Electro-mechanical Engineering, Changchun 130022;
2.Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033)

Abstract: Electrostatic membrane mirror is a new technology for space optics application. And its definition, significance of research and development status in the world are introduced in this paper. Then the main contents of the key technologies are given: membrane material preparation, membrane pre-stress modulation, mechanism and method of shaping control and evaluation of the membrane shaping. The contrast between China and foreign countries is so urge that we face a challenge to develop electrostatic membrane mirror quickly based what I have done about the shaping mechanism and control method. At the end, several tasks and suggestions are given about future work on electrostatic membrane reflector.

Key words: electrostatic; membrane reflector; key technology

空间薄膜反射镜是一种利用镀金属的柔性树脂薄膜成形聚光的空间光学元件, 具有十分明显的优点: 面密度小、贮存体积小、可展开、成本低等, 在空间应用中有着巨大的潜质。传统的反射镜使用玻璃、金属等形态稳定的刚性材料做基坯, 其主要缺点是重量重、加工难度大、制造周期长、成本高, 难以适用于超大口径(如几十到几百米)光学系统对反射镜的要求。因此, 作为空间望远镜、照相系统、天线、能量聚集器和微弱信号探测器主要组成部分, 薄膜反射镜能够有效解决空间光学系统大口径、高分辨率的要求和发射承载空间、承载质量限制的矛盾。空间薄膜反射镜的主要成形方式有静电式、充气式、扫描式和混合式等, 其中静电薄膜

反射镜具有成形精度高, 成本低的特点而得到广泛研究^[1]。

国外很多宇航先进国家都对静电薄膜反射镜进行了深入研究, 其中美国的相关研究最早, 报道最多^[1]。以美国 NASA、空军研究室、SRS 公司、亚利桑那大学等为代表的科研单位, 自上世纪 70 年代开始, 经过 30 多年发展, 对空间薄膜反射镜的关键技术都有很好的突破。按照 NASA 薄膜反射镜的发展规划^[2]推断可知其成果已经进行空间应用, 但未见报道。而在国内, 对静电薄膜反射镜的研究开始于 21 世纪初, 中科院长春光机所是国内第一家对薄膜反射镜进行系统研究的单位, 率先进行了静电拉伸薄膜反射镜的理论研究,

收稿日期: 2009-08-18

基金项目: 国家 863 计划资助项目(2007AA12Z113)

作者简介: 石广丰(1981-), 男, 博士研究生, 讲师, 主要研究薄膜反射镜技术和光学材料加工技术, E-mail: shiguangfeng@cust.edu.cn

设计研制了 180mm 口径单电极反射镜，并进行了实验，薄膜拉伸面形良好，平面 RMS 在亚波长级。而后继续研制 300mm 口径多电极静电拉伸薄膜反射镜正在进行相关技术研究^[3]。另外苏州大学在静电拉伸薄膜反射镜方面也做了部分研究，包括理论分析、模拟两环电极的试验等^[5]。国内对空间薄膜反射镜的研究，还处于地基分析试验的初级阶段，许多方面与国外的差距较大，所以国内应当先从地基研究开始，再逐步发展到空间应用。

1 静电薄膜反射镜关键技术

静电薄膜反射镜通过在高压电极和镀金属(铝、银)树脂薄膜之间形成电势差，在电场力的作用下使薄膜发生变形从而达到静电力和结构力的平衡以稳定成形。由于柔性树脂薄膜本身没有刚度，要使其稳定成形就要给薄膜施加一定的预应力从而具有足够的结构刚度，在静电力作用下才能得到收敛面形。因此地基静电薄膜反射镜研究的关键技术主要包括：薄膜材料的制备、薄膜预应力调节技术、成形控制机理和方法、薄膜反射镜面形评价技术。如图 1 所示。

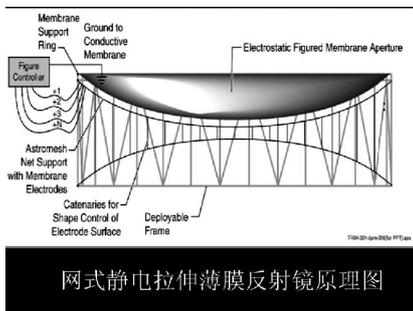


图 1 静电薄膜反射镜成形原理图

Fig.1 Forming sketch of electrostatic membrane mirror

1.1 薄膜材料的制备

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出现并得到广泛应用。它的面密度能达到 0.05Kg/m²，具有良好的物理性能，拉伸性能十分优秀，能够在极端温度下保持性质不变，很适合太空环境，成为薄膜反射镜材料的首选。早在上世纪 60 年代，美国、日本等就开始研制高性能的聚酰亚胺薄膜。国外商业聚酰亚胺薄膜以美国杜邦公司和日本的钟渊、宇都兴产为代表，能够制造出各种聚酰亚胺薄膜。要使薄膜能够进行光学应用，薄膜的表面粗糙度和厚度变化率要达到光学要求。除此之外，薄膜表面镀金属层的

粗糙度、厚度变化率以及反射效率等也直接影响着薄膜反射镜的应用效果。目前美国的 SRS 公司已经能够制造出光学应用质量的聚酰亚胺薄膜，而且他们还能够精确控制薄膜的厚度变化率或金属镀层厚度变化率来形成特定应力分布的成形薄膜。

国内目前聚酰亚胺薄膜制备的研制单位主要是中科院长春应化所，其研究历史和国外接近，但在薄膜应用和市场化方面差距明显。此外中科院上海硅酸盐所也研制聚酰亚胺薄膜产品。而国内市场上的聚酰亚胺薄膜多用于绝缘和隔热产品，其薄膜表面光学质量无法应用于薄膜反射镜。可见，国内聚酰亚胺薄膜缺乏高光学质量和大回转面积的制备技术和经验，这种现状一定程度上限制了静电薄膜反射镜的研究进展。如图 2 所示。



图 2 国内研究用单面镀铝聚酰亚胺薄膜

Fig.2 Polyimide single face coated with aluminium for study application in China

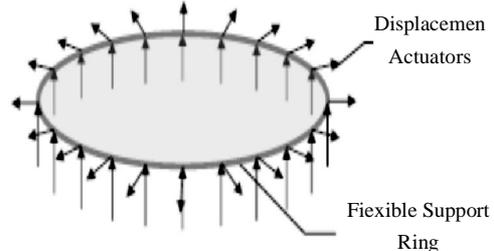


图 3 薄膜预应力施加

Fig.3 Membrane pre-stress exerted

1.2 薄膜边界预应力调节

如图 3 所示。薄膜的预应力分为径向预应力和轴向预应力，它对于薄膜的成形收敛和光学成形效果有很重要的影响^[3]。施加方式主要有：边界位移法，变化温、变湿度法和薄膜预成形法。其中边界位移法通过薄膜边界夹持结构使薄膜发生一定的径向和周向位移来改变薄膜预应力，在静电薄膜反射镜的支撑结构中较常见；变化温和变湿度法是通过给定的薄膜反射镜结构改变温度和湿度的方法来

使薄膜应力发生变化,主要用于空间面形补偿和有限元软件模拟分析阶段;薄膜预成形法是通过在薄膜制备阶段形成一定形状的结构应力来改变原有的平面薄膜预应力。这项技术在国外多见,国内的长春光机所和苏州大学也开始研究这项技术,但受薄膜制备技术的限制,薄膜的预成形技术也遇到诸多瓶颈。

1.3 静电成形机理和控制方法

静电薄膜反射镜的曲面成形主要是通过控制电压上的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。如何控制电极电压分布和数值是薄膜反射镜成形控制的关键。而这首先就要解决电极对薄膜面形的影响函数并确定面形的控制矩阵^[3]。

1.3.1 基于泊松方程的薄膜小变形求解

薄膜的小变形问题是指薄膜变形 z 的挠度角比较小,薄膜的预应力 T 在横向力 P 的作用下不受薄膜变形 z 影响,而且方向相同。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。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理想面形。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, $z=0$ 。则,泊松方程在极坐标 (r, ϕ) 下的近似解析解为:

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

通过给出(2)式的离散边界条件和解析解(影响函数)即可求出特定薄膜小变形条件下的面形控制矩阵,所受的离散分布横向力和分布电极上

的电压值均可求^[3]。

1.3.2 薄膜大变形的数值求解

对于微机械领域的可变形静电薄膜反射镜来说,基于泊松方程的薄膜小变形线性求解是适用的,但对于大口径静电薄膜反射镜来说,要对其大变形非线性进行求解必须采用数值方法,有限元法就是有效手段之一。利用有限元软件的静电-结构耦合求解功能可有效求解出薄膜在分布电场力的作用下的电场、电势、薄膜表面电荷、电场力的分布和薄膜变形情况。有限元求解不仅适用于薄膜的小变形线性求解也适合薄膜的大变形求解^[4],而且可以有效分析出薄膜的成形特性和影响因素,如预应力、环境因素和薄膜吸附电压的大小等方便对静电薄膜反射镜的结构设计和成形控制。通过数值法求解的面形影响函数和控制矩阵更加准确。

1.3.3 薄膜的预成形方法

以上所讨论的都是基于静电薄膜反射镜是平面的情况,要使其拉伸成曲面不但需要较大的静电力,而且控制时的计算求解困难。如果把薄膜预先作成曲面的,在较小的单一或多源静电力的作用下即可成形。因此薄膜的预成形方法研究国外普遍重视。国外已经出现的有裁剪粘合法和曲面成形流延法,其中裁剪粘合法主要是:曲面薄膜成形法、平(曲)面薄膜厚度梯度变化法、平(曲)面镀膜厚度梯度变化法等^[5],预成形虽然在薄膜初始设计阶段比较复杂,但可有效降低作用电压并方便成形。同样,预成形方法可以应用于薄膜电极的曲面设计,为静电薄膜的轻量化研究奠定基础。

1.4 薄膜反射镜面形评价技术

要验证成形机理和控制方法的正确必须有适当的薄膜面形评价手段。由于薄膜材料本身的特点,如对外界环境敏感、质薄等,使静电薄膜反射镜的面形不能用常规的面形检测方法如接触法等进行检测;由于其口径非常大,通常达到几米甚至几十米,使常规的曲面面形检测方法不能奏效,如干涉仪检测,平行光管自准检测,刀口仪阴影检测等。目前薄膜反射镜的检测分为三类^[1],一是利用光栅投影,取其薄膜镜面反射光图像,再用专门的软件对图像进行分析和计算,得出光程差、Zernike系数等参数以评价反射镜的面型质量。二是用传统的干涉检验方法对口径较小或缩小观察区域的薄膜反射镜进行面型检测,如采用干涉仪、莫尔条纹、波前

(下转第 638 页)

的出错率比使用本文方法对扫描点进行解码的出错率大很多。

表 2 未采用文中方法的解码结果

Tab.2 Decoding result unused this method

扫描点坐标	编码序列	解码序列	结果
(23 ,87)	100001	100101	正确
(12 ,39)	110000	110000	错误
(41 ,95)	001100	001100	错误
(16 ,88)	101100	101011	正确
...	

表 3 采用文中方法的解码结果

Tab.3 Decoding result used this method

扫描点坐标	编码序列	解码序列	结果
(37 ,62)	100001	100001	正确
(40 ,18)	110000	110000	正确
(71 ,92)	001100	001100	正确
(53 ,26)	101100	101100	正确
...	

5 结论

在原有格雷码编解码原理的基础上,对所摄取

(上接第 594)

传感器检测。三是对薄膜反射镜成像,如光栅投影成像检测和三线靶测试,对激光器光斑的变化成像。由于薄膜的制备质量极大影响了静电薄膜反射镜面形的最终成形质量,因此在实验中多采取三种方法综合检测以给出薄膜反射镜面形的准确评价。

2 结论与展望

介绍了研究静电薄膜反射镜空间应用的重要作用 and 战略意义,讨论并分析了地基静电薄膜反射镜的关键技术:薄膜材料的制备、薄膜边界预应力夹持结构、成形控制机理和方法、薄膜反射镜面形评价技术。通过对比国内外的巨大差距,明确了我国目前开展静电薄膜反射镜面临的挑战性问题 and 主要方向。

在完善已有静电薄膜反射镜成形机理和控制方法等研究成果的基础上解决光学质量薄膜制备技术;电极轻量化设计;有效的面形评价方法;闭环薄膜面形反馈控制技术;空间薄膜夹持结构可展技

术,薄膜面形空间补偿技术等。

参考文献

- [1] Zollne F ,Matusevich V ,Kowarschik R.3D measurement by stereophotogrammetry [J].Proc SPIE ,5144 ,2003 : 311-314.
- [2] Salv I J. Pattern codification strategies in structured light systems [J]. Pattern Recognition ,2004 ,37:827-849.
- [3] 黄燕群,田玉玲.光栅投影测量物体三维轮廓的条纹中心线相对偏移量的获取 [J].应用光学 ,2004 ,25(6) 57-60.
- [4] Song Zhang. Novel method for structured light system calibration [J]. Optical Engineering ,August ,2006 ,45(8) ,083601.
- [5] Nelson L. Creating interactive 3-D media with projector-camera systems [C]. Proceedings of the SPIE-The International Society for Optical Engineering ,2004 ,5308: 850-861.

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] MIHORIA D J. Test Progress on the Electrostatic Membrane Reflector [R]. Virginia: NASA ,Langley Research Center ,1981.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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 :自然科学版 ,2008 ,24(4):69-74.
- [6] Serguei D. Study of Pre-Shaped Membrane Mirrors and Electrostatic Mirrors with Nonlinear-Optical Correction [R]. Russia ,St. Petersburg ,2002.
- [7] Sergei A D ,Mikhail P B ,Alexander V G ,et al.Electrically controlled preshaped membrane mirror for systems with wavefront correction [J]. SPIE ,2003 ,147 :5612.