

空间薄膜反射镜的研究发展现状

张鹏^{1,2}, 金光¹, 石广丰^{1,2}, 齐迎春³, 孙小伟⁴

(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. 吉林大学机械工程学院, 吉林 长春 130025;

4. 长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022)

摘要:空间薄膜反射镜由于具有面密度低,易于折叠展开且成本低等优点很好地满足了空间反射镜的超轻量、超大口径的要求,因此在空间科学研究领域倍受关注。介绍了空间薄膜反射镜的发展,包括薄膜反射镜的理论基础,充气式薄膜反射镜和静电拉伸薄膜反射镜及其他类型的反射镜的代表成果。而后对空间薄膜反射镜的技术难点进行了分析;重点讨论了薄膜反射镜用聚酰亚胺薄膜的生产情况以及薄膜反射镜的面形控制、面形检测和反射镜支撑结构的设计。最后总结了反射镜近期的研制情况、存在的问题和应用发展趋势。认为空间薄膜反射镜作为国内外空间科学的热点,在未来的几十年内将在航天领域的太空望远镜、空间侦察相机、人造太阳、微波天线等方面得到广泛应用。

关键词:空间薄膜反射镜;薄膜理论;静电拉伸;充气;综述

中图分类号:TH703 **文献标识码:**A

Current status and research development of space membrane reflectors

ZHANG Peng^{1,2}, JIN Guang¹, SHI Guang-feng^{1,2}, QI Ying-chun³, SUN Xiao-wei⁴

(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. *Institute of Mechanical Engineering, Jilin University, Changchun 130025, China;*

4. *Institute of Opto-electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)*

Abstract: Space membrane reflectors have become promising mirrors for space science fields in recent years, for they are favorable properties in low area density, low producing costs and the reliability easy to fold and deploy. It is proved that the space membrane reflectors can meet the requirements of ultra lightweight and super-size space mirrors. In this paper, the development of membrane reflectors is introduced, including the theoretical foundation of membrane reflectors, the representative achievements of inflatable membrane reflectors and electrostatic stretch membrane reflectors and other kinds of membrane reflectors. Then, it puts the

focuses on the discussion about the production status of polyimide (PI) films for membrane reflectors, and the shape control and shape tests of membrane reflectors, also the design of supporting structures of reflectors. In addition, it analyzes the technical difficulty for developing the space membrane reflectors and summarizes the development, application and current status of the membrane reflectors. From analysis and discussion reported here, it is clear that the space membrane reflectors will be widely used in space telescopes, space surveillance cameras, artificial suns and microwave antennas in the space science fields in the coming decades.

Key words: space membrane reflector; membrane theory; electrostatic stretch; inflation; review

1 引言

近年来,随着对地观测和军事侦察用系统结构的迅猛发展,对空间望远镜、照相系统、天线、能量聚集器、微弱信号探测器主要组成部分—反射镜的超大、超轻量要求越来越迫切。传统的反射镜使用玻璃、金属、晶体等形态稳定的刚性材料作基坯,其主要缺点是质量大、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。与其他传统的大口径反射镜相比,空间薄膜反射镜具有成本低、收藏体积小、展开可靠性高、质量轻等优点。由于空间薄膜反射镜能够满足空间反射镜超轻量超大口径的要求,它的研制对推动空间技术的发展有重要的意义。美国等一些国家的科研单位已经开始了对空间薄膜反射镜的研究,但国内开展这方面的研究还处于起步阶段。

空间薄膜反射镜是一种以柔性聚合物薄膜为基坯,用外力控制面形的反射镜,其工作原理主要是利用静电力、气体压力等外力对薄膜进行面型的变形及维持,所以从外力的不同主要分为静电拉伸式、充气式,此外,还有电子枪控制压电薄膜,激光控制薄膜等其它方式。

本文综述了空间薄膜反射镜的最新发展,包括薄膜发射镜的理论基础,静电拉伸式,充气式等薄膜反射镜的代表成果,分析了研制技术难点和现状,以及应用发展的趋势。

2 空间薄膜反射镜的发展

2.1 薄膜反射镜理论基础

对空间薄膜反射镜的力学分析主要是研究薄

膜的大挠度变形^[1,2],将薄膜变形归结到薄板变形的范畴,即薄膜理论来自板和薄板理论。3种理论定义如图1所示,学术界认为 a/h (径厚比)在8以内为厚板理论, a/h 在8~80为薄板理论,当 $a/h > 80$ 可以称为薄膜理论。

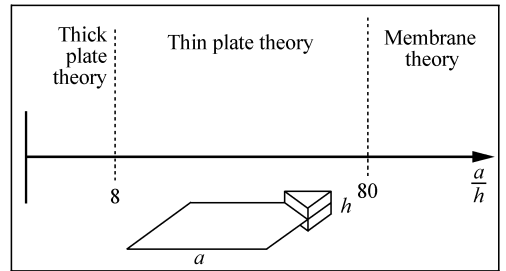


图1 3种理论的定义

Fig. 1 Definitions of three kinds of theory

一般薄膜理论分析常做以下假设:1)边界中没有横向的剪切力和力矩,施加在边界上的载荷一定是垂直于中面。2)边界的垂向变形和旋转是没有限制的,这些边界可以在中面的垂向自由变形。3)薄膜必须是光滑连续的面。4)面和边界载荷部分也应该是关于坐标的光滑连续的方程。

从以上的4项基本假设,可以得到薄膜两个的特点:1)薄膜没有任何弯曲刚度,因此没有弯曲载荷。2)薄膜只有张力载荷,无法维持有压缩的载荷和其产生的现象,如褶皱。

对于薄膜研究很多学者根据不同的研究方法提出了很多不同的薄膜模型,其中最具有代表性的是被大多数人接受的由 von Karman (1910) 导出的大挠度理论微分方程(1)。

轴对称 Karman 板方程:

$$\begin{cases} \frac{1}{r} \frac{d}{dr} (rN_r \frac{dw}{dr}) + q(r) = D \frac{1}{r} \frac{d}{dr} r \frac{d}{dr} r \frac{d}{dr} \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \frac{dw}{dr}, \\ \frac{Eh}{2} (\frac{dw}{dr})^2 + r \frac{d}{dr} \frac{1}{r} \frac{d}{dr} (r^2 N_r) = 0, \end{cases} \quad (1)$$

式中, E 为弹性模量, h 为薄膜厚度, w 为挠度, r 为薄膜半径 ($0 \sim a$), $q(r)$ 为任意分布的侧向载荷。

在 von Karman 板方程中, 除了包含假定以外, 还要求板变形后的挠角不能太大, 以保证推导过程中的几何关系的简化前提成立^[3]。薄膜反射镜理论基础是忽略 Karman 板方程中的弯矩项得到的 Karman 薄膜方程如式(2)。

简化后均布力负载时的薄膜力学模型为:

$$\begin{cases} \frac{Eh}{2} (\frac{dw}{dr})^2 + r \frac{d}{dr} \frac{1}{r} \frac{d}{dr} (r^2 N_r) = 0, \\ N_r \frac{dw}{dr} + \frac{p}{2} r = 0, \end{cases} \quad (2)$$

式中, N_r 为薄膜力, p 为均布力。

薄膜反射镜力学分析选择 von Karman 板方程, 主要在于它合理地考虑了板的非线性效应, 同时其方程相对于其它情形比较简单。尽管如此, 由于 von Karman 板方程是一对耦合的非线性微分方程, 因此对其理论研究和求解仍是很困难的。在上世纪 60 年代以前主要是解析法, 比如摄动法、级数法、迭代法等^[4]; 到上世纪 70 年代出现了高性能计算机后, 相应产生了一些数值计算方法, 如有限差分法、边界元法、有限元法等^[5]。数值计算的方法在求解不规则板时具有优势, 但对某些因载荷因素突变的情形, 数值计算结果并不令人满意, 而解析法则能提供精度可靠的理论解。

2.2 充气式薄膜反射镜的发展

充气薄膜反射镜来源于古老的使用薄膜的方法, 即利用气压充起气囊使薄膜拉伸成像。充气式反射镜通常由 2 块薄膜组成, 并在边缘封住, 由拉伸圈固定, 往里充气提供气压来产生所需要的弯曲面型。这些充气反射镜已经用于要求精度不高的各个领域(包括天线), 限制其应用于高成像质量系统的主要问题是很难将反射镜的面型控制为理想的抛物面或是球面, 即消除 Henky-curve 的偏离。

工程实践中最早应用于空间领域的是上世纪 60 年代美国的第一个充气卫星 Echo 1, 如图 2 所

示, 其利用了 30 m 口径气囊 0.0127 mm 厚聚酯薄膜, 携带用于遥测 107.9 MHz 信标发射机的卫星^[6]。虽然当时很粗糙, 但给充气薄膜反射镜提供了有关材料质量、热载荷、充气比、可展开的最初始的知识和经验。



图2 Echo 1 卫星

Fig. 2 Echo 1 satellite

1990 年, L. Garde 公司制造了一个 7 m × 9 m 口径的离轴椭圆形薄膜反射镜, 用激光束测量其面形精度, 面形中心 30% 部分的 RMS 为 2 mm。1996 年该公司进行了 IAE(充气式天线实验), 如图 3。反射镜组件为 14 m 口径主反射镜, 采用 25 μm 厚镀铝薄膜, 中心 8 m 口径 RMS 可达 1.5 mm^[6], 这项试验的目的是确认能够低成本建造大型充气膨胀空间结构; 显示大型充气膨胀空间结构有高的机械包装效率; 演示这一新的空间结构有高的展开可靠性; 验证大型薄膜反射镜能够得到几毫米均方根的表面精度, 以及可以实现

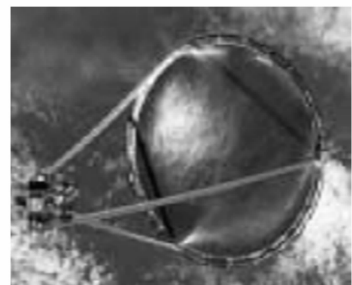


图3 充气式薄膜反射镜实验

Fig. 3 Experiment of inflatable membrane mirror

在轨测量反射镜表面精度。而后该公司研制了一系列充气式反射镜,如图4所示,其IRD 7 m 充气式反射镜钢性支撑面型达到 $1.2\text{ mm RMS}^{[6]}$ 。



图4 IRD 充气式反射镜

Fig. 4 IRD inflatable membrane mirror

1999年,新墨西哥大学的A. K. Maji和M. A. Starnes利用压电驱动方法主动控制充气式反射镜面型。试验在主动面型控制下,用莫尔条纹和电子散斑干涉测量^[7]。结论表明,压电主动面型控制不能消除Henky-curve的偏离误差,但结果显示压电驱动可以控制充气结构到光学级($10\text{ }\mu\text{m}$)。

在Meinei等人以前,充气式薄膜反射镜被认为是不适于可见光波段使用的。2000年Meinei在文献[8]中通过变厚度的薄膜来校正可见光抛物镜典型的Henky-curve偏离,提出了变厚度薄膜厚度推导,研究了薄膜厚度按照曲率半径的平方变化而改变的变厚度薄膜制造过程,这项研究有望用于 $0.5\sim 12\text{ }\mu\text{m}$ 的光学系统,改写充气薄膜反射镜不适于可见光波段的历史。

2005年韩国卫星研究中心Mingwan soh等人在Meinei的基础上,提出充气薄膜反射镜可用于空间望远镜的薄膜反射镜,主要解决的问题是消除Henky-curve的偏离及光学上的误差。文献[9]中提出了薄膜使用偶次非球面的厚度变化,RMS值在可见光波段 $>50\lambda$ 。限制有限口径使用RMS在 $10\text{ }\mu\text{m}$ 左右,在带有19个驱动器的次镜校正下,RMS可限制为 $0.7\sim 3\text{ }\mu\text{m}$,这为充气薄膜反射镜用于可见光波段提供了很好的佐证。

2007年宾夕法尼亚州立大学电子工程系和材料研究中心的Qinchen, Don Natale利用压电聚合物驱动器,精确控制PVDF(聚偏二氟乙烯)膜和kapton膜组合复合膜。很好地控制了Henky-

curve的偏离误差和温度梯度差,有效地提高了薄膜反射镜的精度^[10](0.03 mm)。

2.3 静电拉伸薄膜反射镜的发展

静电拉伸薄膜反射镜在控制面形和控制精度方面比充气式反射镜有较大的优势,静电拉伸不像充气式受到的是均布力,先天存在有Henky-curve的偏离。静电拉伸能够很好地控制面形精度和薄膜像差补偿,但是结构相对复杂。下面是几种有代表性的聚酰亚胺薄膜反射镜的研究成果:

如图5所示,1979年,美国NASA研制了半径为 4.88 m 的五环静电拉伸式薄膜反射镜^[11],分析了面形误差的影响因素和薄膜的非均布力控制的数值计算方法。但受到当时高质量光学薄膜制造技术和空中可展技术以及机电复合型控制技术发展的制约,试验在地基进行,只提出了一个空基的概念设计。



图5 NASA 4.88 m 静电拉伸薄膜反射镜

Fig. 5 4.88 m electrostatic stretch membrane mirror from NASA

2000年,美国亚利桑那大学进行了利用静电压力使延展薄膜弯曲到一定曲率(SMEC)的薄膜反射镜的设计^[12,13],如图6所示。反射镜由 $10\text{ }\mu\text{m}$ 的CP-1聚酰亚胺薄膜制成。主要原理是用静电压力使薄膜反射镜成形并与设计形状保持一致,通过压电陶瓷的微控制有效改善成像质量,减小像差。用 152 cm (6 in)的延展薄膜平面反射镜和曲率半径为 32 m 的曲面反射镜分别做试验,平面反射镜中心 10 cm (4 in)范围内的面误差可达到波长的 $1/20$,曲面反射镜同样也取得了很好的实验结果。

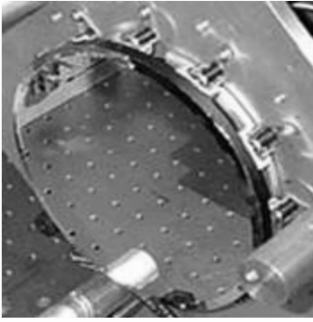


图6 15.2 cm(6 in)静电拉伸薄膜反射镜

Fig.6 15.2 cm(6 in) electrostatic stretch membrane mirror

2002年,波音公司和美国空军研究室合作研制了0.28 m口径的静电拉伸薄膜反射镜^[14],采用了带有一层20 μm镀铝聚合物的薄膜。在检测过程中以抛物面组合成像,采用实时补偿技术校正偏差,口径中心区域成像接近衍射极限。

2005年,SRS公司和美国空军研究室合作研究超轻量的薄膜反射镜^[15~17]。研制了0.25 m口径的静电拉伸薄膜反射镜,背面含有14个电极进行拉伸,同时在边界上加有径向和垂向主动控制器各18个,薄膜为SRS公司专门生产的变厚度铝层薄膜。如图7所示,实验中经过多电极的拉伸,边缘控制器的控制,变厚度的补偿,所成的抛物面面形有效地减少了球差、像散、彗差,RMS已经达到可见光的亚波长级。接着研制了0.78 m口径的静电拉伸薄膜反射镜,如图8所示,采用18路电极控制系统,可控制0~12 kV高压,电极镀铜 kapton 薄膜,薄膜为SRS公司的cp-N产品,有着很好的变厚度质量。通过对比等厚度薄膜反射镜,很好地抑制了各种像差。

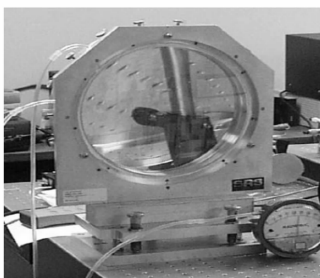


图7 0.25 m 静电拉伸薄膜反射镜

Fig.7 0.25 m electrostatic stretch membrane mirror

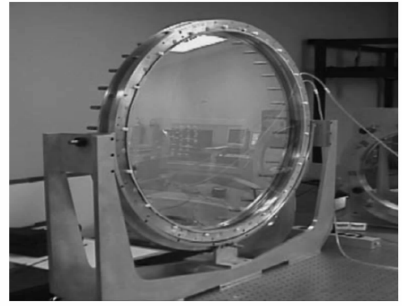


图8 0.78 m 静电拉伸薄膜反射镜

Fig.8 0.78 m electrostatic stretch membrane mirror

2006年,麻省理工学院林肯实验室研制了20 cm(8 in)口径薄膜反射镜^[18],如图9所示,采用23 μm聚对苯二甲酸乙二醇酯薄膜,表面镀有一层钴、钨、钨合金,确保电磁力的高渗透、高饱和性及好的平面度和可见光高透性。含有19个3.8 cm(1.5 in)口径柱形驱动器。测试过程是将薄膜反射镜组装成一个牛顿式望远镜,并带有波前测量器和控制器。采用软件分析传感器的波前输出,补偿后重建反射镜的波前。计算了每个驱动器的影响效果,由软件控制作用力以减少波前像差。检测结果表明,其面形精度RMS在亚波长级。经过与玻璃镜面望远镜所成的像对比,成像质量令人满意。

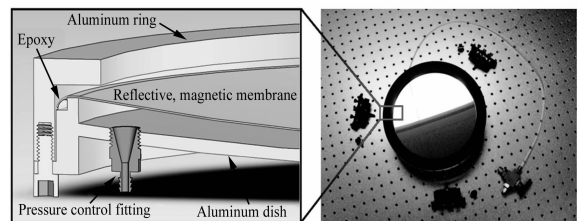


图9 MIT研制的20 cm(8 in)口径薄膜反射镜

Fig.9 20 cm(8 in) membrane mirror from MIT

2.4 其它类型薄膜反射镜的发展

除了上述两种薄膜反射镜,常用的还有电子束控制和激光控制薄膜表面面形的反射镜。这几种薄膜反射镜口径做大可作为大型望远镜相机的主镜,做小可作为微变形镜,由于可以很好地进行快速、大量的像差补偿,其同时还可作光学镜头的自动调焦器件。这里介绍了几种代表性成果。

Bekey公司提出了极大口径,轻量的无支撑

成像系统概念^[19],控制原理是电子枪发射电子束对压电薄膜反射镜进行控制,正对反射镜由光学像差传感器进行探测,通过 RF(射频)或激光对电子枪进行校正,从而实现闭环控制。像差校正分为两个阶段,主要的是主动控制的薄膜反射镜,在次镜附近的液晶控制校正,从而使得在可见光或者红外波段良好成像。整个成像系统由电子枪、主镜的薄膜反射镜、次镜、像差传感器、快速旋转镜、液晶校正器、太阳帆板组成。

肯塔基大学和美国能源部圣地亚国家实验室也在联合研制电子枪控制的薄膜反射镜技术^[20]。这种压电材料(聚偏氟乙烯或聚酰亚胺)制成的镜片,能在计算机控制的电子枪扫描之下改变形状,且薄膜体较轻,能够折叠,用小推力火箭发射,可在轨道上展开,利用电子枪使其外形变成所需形状,误差不超过 2.5×10^{-5} mm,所用压电材料的密度不超过 1 kg/m^2 。

2005 年,美国加利福尼亚州伯克利大学的 Bell 实验室、New Jersey 纳米技术联盟的多名科学工作者研制了多电极薄膜变形镜^[21],虽然口径很小,但提出了一种新的结构:薄膜上层有一整块透明电极,下层为传统的电极分布,面形由透明电极的电压和下层,及上下层电极和薄膜之间的间隔来控制。透明电极是一块玻璃窗,下面镀有一层透明的导电材料。这一思想对大口径薄膜反射镜

的凸面发展有一定的参考价值。

2008 年,夏威夷大学天文中心的 Jose. M. Ritter 等人针对 $10 \sim 50 \mu\text{m}$ 厚的聚合物具有大型光机效应的特点,利用激光引导薄膜反射镜的面型变化^[22]。如图 10 所示,光致薄膜反射镜的结构由半导体激光器、扩束器、光强和相位控制器、扫描检流计等组成。此方法有以下几个特点:1)可逆的双方位弯曲;2)大范围面型变形;3)高速变形;4)仅有单个激光器控制(0.1 W/cm^2)。

3 空间薄膜反射镜的技术难点

3.1 薄膜生产

目前用作薄膜反射镜的材料首选聚酰亚胺薄膜,该薄膜拉伸性能十分优秀,能够在极端温度下保持性质不变,很适合太空环境。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,均采用双向拉伸法来制造良好的均苯型和联苯型聚酰亚胺薄膜。国

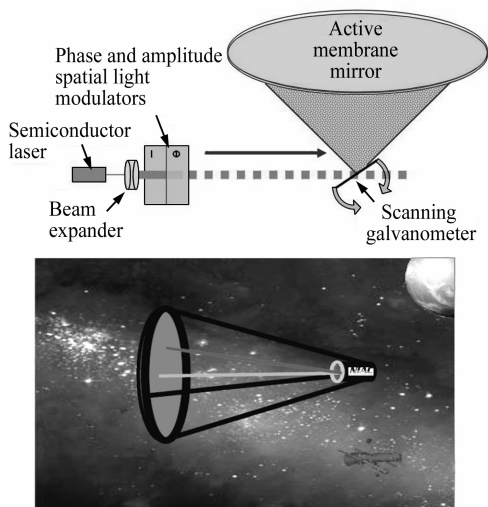


图 10 夏威夷大学的薄膜反射镜概念

Fig. 10 Concept of membrane mirror in Hawaii University

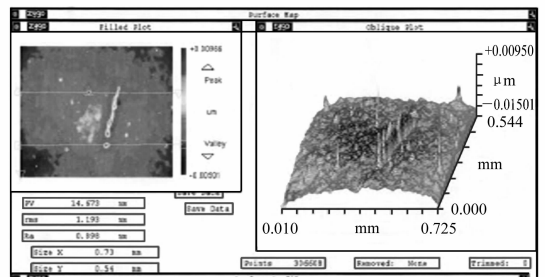


图 11 Zygo 干涉仪结果

Fig. 11 Result of Zygo interferometer



图 12 薄膜拉伸实验

Fig. 12 Membrane stretch experiment

外科研单位使用的光学级的薄膜是以 SRS 公司为代表的 cp 系列聚酰亚胺薄膜,如图 11、图 12 所示,优秀的平面薄膜光学质量 RMS 在 1.5 nm 以内。另外,还可以加工变厚度薄膜以及镀变厚度金属层,变厚度的精度在 40 nm 以内^[23]。可以说国外的聚酰亚胺薄膜的生产质量很好地满足了薄膜反射镜的各项要求。而国内在上世纪 60 年代开始研制聚酰亚胺薄膜,以中国科学院长春应用化学研究所和上海市合成树脂研究所为代表,还有许多民用公司也生产聚酰亚胺薄膜,但由于生产方式和技术与国外还有差距,无论是从物理性能、光学性能、还是变厚度薄膜生产都不及国外。因此,薄膜反射镜要从根本上发展,必须最先考虑薄膜的质量。

3.2 面形控制

薄膜反射镜虽然具有重量轻的特点,可受各种力学、热力学等环境因素的影响,其面形易发生变化。但是利用它极易受外力影响的特点,亦可以对它进行灵活调节,从而达到面形精度的要求。

薄膜反射镜的初始面形一般可以分为两类——平面薄膜反射镜和曲面薄膜反射镜。平面薄膜反射镜由外界提供的压力或由静电场力使薄膜产生形变,形成曲面。曲面薄膜反射镜由一个预先设计好的曲面形腔直接生成所要曲面或者近似曲面,然后以固化的方式保持这一曲面形状并由支持结构、薄膜侧向载荷以及边界约束来实现聚焦。充气薄膜镜就是基于后一种方案的。由于薄膜材料特性和生产条件的影响,用预成形加工的方法很难生成精度很好的光学表面面形,此外在使用控制上,利用气压的变化来调节面形误差也存在较大困难,而使用侧向力拉伸薄膜以改变和控制面形却具有实时调节面形的优点。静电拉伸薄膜反射镜的基本原理就是利用静电场中存在的库仑力作为薄膜的侧向载荷,通过控制电压实现面形的控制。国外的很多薄膜反射镜的研究均采用了这一方法,利用静电场的库仑力矫正薄膜由于其不均匀性而引起的面形误差,通过采用不同的静电场参数来得到不同的面形。

为了实现薄膜反射镜面形的精确控制,必须对其面形影响因素进行分析,如薄膜反射镜的载荷施加方式、强度和频率等对面形的影响,空间环

境如温度等对面形的影响,支撑条件、预应力等对面形的影响。

3.3 支撑结构设计

静电拉伸式薄膜反射镜中多电极的设计是重要的部分,它的分布和控制精度对面形控制算法和控制精度的影响很大。多电极分布分为环形电极和细化电极。环形电极的代表是美国在上世纪 80 年代的 5 环电极控制的薄膜反射镜^[11];图 13 为苏州大学的 2 环 3 电极的薄膜反射镜^[23]。

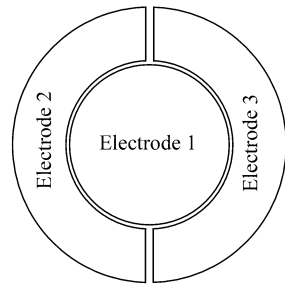


图 13 苏州大学 3 电极

Fig. 13 3 electrodes from Suzhou University

细化电极是在环形电极的基础下做轴对称细分,如图 14 为亚利桑那大学的 37 个电极分布^[13],图 15 为 MIT 的林肯实验室的 19 个电极分布^[18],图 16 为空军研究所的 14 个和 18 个电极分布^[15-17]。电极数量的增加能提高控制能力和精度,不过负面因素也增多,如多电极的供电系统的复杂性,另外电极互相放电容易发生击穿等,因此如何权衡、折衷是难点。

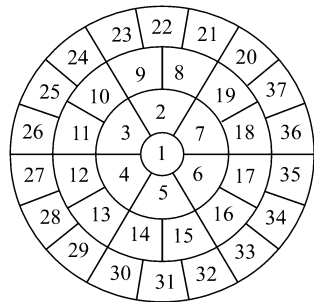


图 14 亚利桑那大学 37 电极

Fig. 14 37 electrodes from Arizona University

其次就是供电系统。理想的供电系统是单独

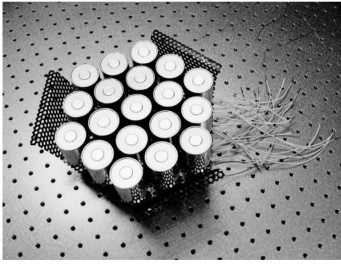


图 15 麻省理工学院 19 电极

Fig. 15 19 electrodes from MIT

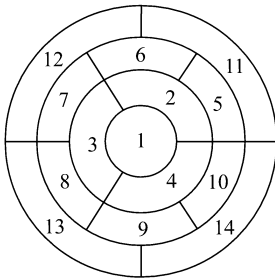


图 16 美国空军研究室 14 电极

Fig. 16 14 electrodes from Air Force Laboratory in USA

给每个电极配置一个高压电源,不过这大大增加了薄膜反射镜质量,与设计的初衷明显背道而驰,在未来空间薄膜反射镜应用上不具备优势,所以电源设计既要保证精确供压,又要简便安全。供电系统通常为两种。图 17 所示是一种直接用多个电源控制,或是单个电源通过分压进行多电极供电^[13]的情形。这种方法比较普通,首先高压多路电源比较昂贵,其次分压的精度和安全性有待改进。图 18 所示为另一种是通过电脑软件控制,经输出卡输出低电压信号给低压控高压的芯片,芯片输出高压给电极进行拉伸,同时给电脑带回电压反馈保证供电精度^[15]。这种方法安全、有效、快捷,不过硬件成本高。

另外,静电拉伸的薄膜夹持结构和主动控制部分设计也是技术难点。夹持的力度影响面形的拉伸,预应力大则很难拉伸,小则褶皱太多。对于边缘部分往往出现面形较差,无论是亚利桑那大学,还是波音公司,几乎所有的静电拉伸式薄膜反射镜的设计都使用边缘校正器。不过校正器的使用不方便,增加了反射镜的质量,在空基情况下需

要考虑其他途径。

3.4 面型的检测

由于薄膜材料本身的特点,如对外界环境敏感、质薄等,使空间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。这些都是空间薄膜反射镜面形检测过程中需要解决的问题。

目前薄膜反射镜的检测总结分为三类,一是对镜面照射后,取反射光图像,利用专门软件对图像进行分析和计算,得出光程差,Zernike 系数等

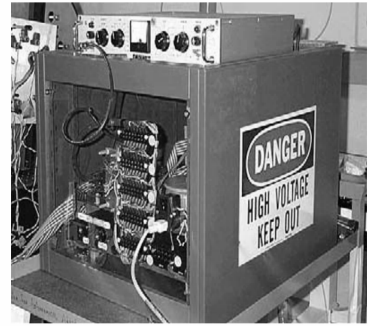


图 17 亚利桑那大学高压电源

Fig. 17 High voltage electrical source in Arizona University

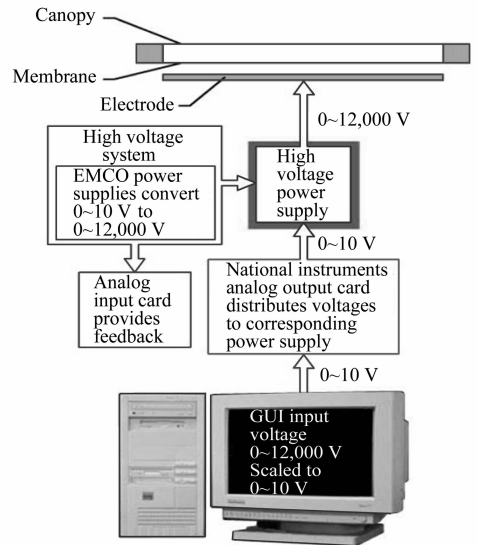


图 18 美国空军研究室供电系统

Fig. 18 Power supply system from Air Force Laboratory in USA

参数,以评价反射镜的面型质量。二是对口径较小的薄膜反射镜用传统的干涉检验方法进行面型检测,如采用干涉仪、莫尔条纹、波前传感器检测。三是对薄膜反射镜成像,包括组合为望远镜之类的仪器进行成像,有对网格成像,以专业的三线靶,对激光器的光斑的变化成像。

第一类检测方法以 SRS 公司为代表,如图 19 所示,照相测量后,用 SRS-thin software 计算光程差和各个 Zernike 系数^[15]。NASA 用麻省理工大学林肯实验室的算法软件计算波前^[18],对薄膜反射镜上取点、照相,用处理软件分析质量^[26],如图 20 所示。该方法能够快速评价面型质量,并反馈校正像差。

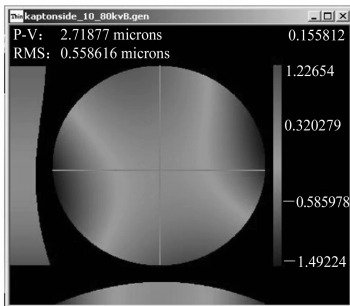


图 19 SRS 公司检验软件

Fig. 19 Software in SRS Company

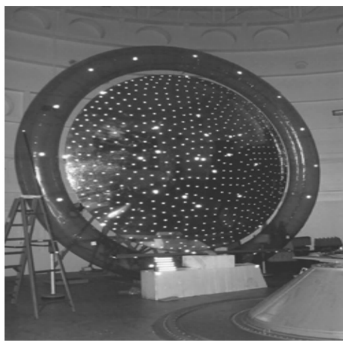


图 20 NASA 薄膜照相检验

Fig. 20 Photogrammetry of membrane mirror in NASA

第二类检测方法是亚利桑那大学(SMEC)为代表,针对薄膜反射镜所形成的曲面形的焦距比较大,检测时使用补偿镜加上干涉仪进行检测^[12,13]如图 21 所示。另外,新墨西哥大学使用莫尔条纹和电子散斑干涉测量,苏州大学则使用

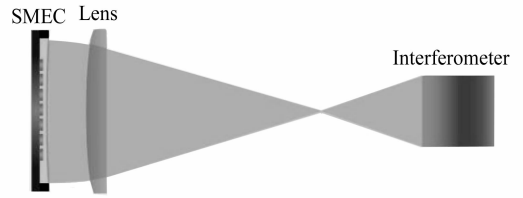


图 21 亚利桑那大学干涉法

Fig. 21 Interferometry from Arizona University

了莫尔条纹检测法对 200 mm 口径的薄膜反射镜检测^[25]。这些方法比较传统有效,不过仪器比较昂贵,而且检测的面型有限,不适用于未来超大口径空间薄膜反射镜的检测。

第三类检测方法是波音公司和空军研究室^[14]和苏州大学^[24]为代表,检测曲面面型使用抛物面、三线靶、照相机组合检测,从三线靶的像来判定成形质量。麻省理工大学^[18]林肯实验室使用薄膜反射镜组合成望远镜对尺子和月球成像;亚利桑那大学也是以对月球的成像来评价反



图 22 苏州大学使用的标准图

Fig. 22 Standard picture from Suzhou University



图 23 薄膜望远镜中的月亮

Fig. 23 Moon in membrane telescope

射镜的面型质量,此方法检测面型快速直观,可以用于设计后期面型质量较好的薄膜反射镜的检测,如图22、图23所示。

4 空间薄膜反射镜的现状和应用展望

以美国亚利桑那大学,空军研究室,SRS公司,NASA为代表的科研单位,自上世纪60年代开始,经过40多年发展,对空间薄膜反射镜的几个技术要点都有很好的突破,包括空间薄膜反射镜成形机理和控制方法。

在地基试验中,1 m口径内的静电拉伸薄膜反射镜在薄膜质量、控制面形、边缘主动控制、像差校正方面都有发展,可以适用于近红外波段。对于充气式薄膜反射镜,在微波段天线方向已经逐渐得到应用,而且在轨试验获得成功。现在国外的注意力对准了近红外和可见光波段的成像,已经提出了实施方法和概念,包括变厚度薄膜的解决的方法等。

静电拉伸薄膜反射镜现在存在的问题是超大口径化和面形精度的提高和空基设计,包括大薄膜的生产及质量保证、大变形问题的理论求解、控制精度、控制面形的范围、高压精确供电、用于空间的可展开装置、各部分的轻量化、太空的供电系统等诸多方面。而充气式薄膜反射镜由于在轨试验成功,它的主要问题就转向面形精度的提高和

面形的保持和控制范围,即如何成为理想的抛物面,面形如何保持,除抛物面其他曲面面形的成形等。

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180 mm口径静电拉伸薄膜反射镜的理论研究,设计研制了单电极反射镜,并进行了实验,薄膜拉伸面形良好,平面RMS在亚波长级。而后继续对300 mm口径多电极静电拉伸薄膜反射镜进行了研究,也取得了不错的成绩。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2环电极的试验等,面形良好。

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,所以笔者认为,国内应当先从地基研究开始,再逐步发展到空间应用。

空间薄膜反射镜独有的优点使其有着广泛的应用前景。微波段薄膜反射镜已经得到了一定的应用,可以用于天线接受器、空基大型天线、大型的太阳能聚集器、微波的微弱信号探测等。光波段薄膜反射镜正在研制中,离大口径应用还有些距离,但其前景颇好,可以用于高分辨率的望远镜、相机等系统,而现在的重心应该放在面形精度和面形控制上。相信随着科技的发展,特别是薄膜生产和面形控制技术的成熟,薄膜反射镜将会应用于各个领域。

参考文献:

- [1] 胡海昌. 弹性力学的变分原理[M]. 北京:科学出版社,1981.
HU H CH. *Elasticity of the Variational Principle*[M]. Beijing:Science Press,1981. (in Chinese)
- [2] 郑小静. 圆薄板大挠度理论及应用[M]. 长春:吉林科学技术出版社,1990.
ZHENG X J. *Large Deflection of Circular Thin Plate Theory and Application*[M]. Changchun:Jilin Science and Technology Press,1990. (in Chinese)
- [3] SCHMIDT R. On berger's method in the non-linear theory of plates[J]. *Appl. Mech.*,1974,41:521-523.
- [4] SHAW F S,PERRONE N. A numerical solution for the non-linear deflection of membranes[J]. *J. Appl. Mech.*,1954,21:117-128.
- [5] STORAKERS B. Small deflections of linear elastic circular membranes under lateral pressure[J]. *J. Appl. Mech.*,1983,50:735-739.
- [6] CASSAPAKIS G C,LOVE W L,PALISOC A L,*et al.*. Inflatable space antennas:a brief overview[C]. *Proc. IEEE Aerospace Conf.*,1998,3:453-459.
- [7] MAJI A K,STARNES M A. Shape Measurement and control of deployable membrane structures[J]. *Experimental Mech.*,2000,40(20):154-159.
- [8] MEINEL A B,MEINEL M P. Inflatable membrane mirrors for optical passband imagery[J]. *Opt. Eng.*,2000,39(2):

- 541-550.
- [9] SOH M, LEE J H, YOUN S K, *et al.* . An inflatable circular membrane mirror for space telescopes[J]. *SPIE*, 2005, 5638: 262-271.
- [10] CHEN Q, NATALE D, NEESE B, *et al.* . Piezoelectric polymers actuators for precise shape control of large scale space antennas[J]. *SPIE*, 2007, 65241P.
- [11] MIHORIA D J. Test progress on the electrostatic membrane reflector[R]. *Virginia: NASA, Langley Research Center*, 1981.
- [12] STAMPER B, ANGEL R, BURGE J, *et al.* . Stretched membrane with electrostatic curvature(SMEC) mirrors for extremely large space telescope[J]. *SPIE*, 2001, 4451:105-113.
- [13] ERRICO S, ANGEL R, STAMPER B, *et al.* . Stretched membrane with electrostatic curvature(SMEC) mirrors: a new technology for large lightweight space telescopes[J]. *SPIE*, 2002, 4849:356-364.
- [14] ROTGE J, MARKER D, LUTZ B, *et al.* . Membrane telescopes: useful in ground-based astronomy[J]. *SPIE*, 2000, 4493: 207-211.
- [15] MOORE J D, PATRICK B G, CHODIELLA S, *et al.* . Development of a one-meter membrane mirror with active boundary control[J]. *SPIE*, 2004, 5553:221-229.
- [16] CHODIELLA S, MOORE J D, PATRICK B G. Design, fabrication, and validation of an ultra-lightweight membrane mirror[J]. *SPIE*, 2005, 5984:589416.
- [17] MOORE J D, PATRICK B G, CHODIELLA S, *et al.* . Design and testing of a one-meter membrane mirror with active boundary control[J]. *SPIE*, 2005, 5899:5899POZ.
- [18] ANGEL M. Eight-inch f_5 deformable magnetic-membrane mirror[J]. *SPIE*, 2006, 6273:62732A.
- [19] BEKEY I. Very large *yet* extremely lightweight space imaging systems[J]. *SPIE*, 2002, 4849:17-27.
- [20] REDMOND J M, BANRNE P S, HENSON T D. Distributed sensing and shape control of piezoelectric bimorph mirrors [J]. *J. Intell. Mater. Sys. Struc.*, 2000, 11(10):744-757
- [21] KURCZYNSKI P, DYSON H M, SADOULET B, *et al.* . A membrane mirror with transparent electrode for adaptive optics [J]. *SPIE*, 2005, 5719:155-166.
- [22] RITTERA J M, BAERA A E, DITTOB T D. Large ultra-lightweight photonic muscle membrane mirror telescope[J]. *SPIE*, 2008, 7010:70102K.
- [23] MOORE J D, GIEROW P, PATRICK B G, *et al.* . A parametric assessment of material properties, boundary conditions, and environmental effects on the performance of membrane optical systems[J]. *SPIE*, 2002, 4849:321-329.
- [24] CHEN X H, TANG M X, SHEN W M. Membrane mirror deformed by electrostatic pressure[J]. *SPIE*, 2007, 6721: 67210K.
- [25] 陈新华, 唐敏学, 沈为民, 等. 薄膜反射镜的静电成形[J]. *红外与激光工程*, 2007, 36(2):274-277.
CHEN X H, TANG M X, SHEN W M, *et al.* . Membrane mirror deformed by electrostatic pressure[J]. *Infrared and Laser Eng.*, 2007, 36(2):274-277. (in Chinese)
- [26] Richard S P, LOUIS R G, JWSSICA M Q. Photogrammetry of a 5m Inflatable Space Antenna With Consumer Digital Cameras[R]. NASA-2000-tM210627, NASA Langley Technical Report Server, 2000

作者简介:张鹏(1985—),男,福建龙岩人,在读博士,主要从事空间光学技术应用研究。

E-mail:zpjg1021.studen@sina.com

金光(1958—),男,吉林长春人,研究员,博士生导师,主要从事空间遥感光机总体研究。

E-mail:jing@ciomp.ac.cn