

大口径主镜支撑液压缸用弹性膜片优化设计

刘祥意^{1,2,3}, 张景旭¹, 陈宇东³, 吴小霞¹, 李剑锋¹, 郝亮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. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 吉林大学 机械学院, 吉林 长春 130022)

摘要: 在大口径望远镜主镜液压支撑形式中, 液压缸需要一种简单可靠、不需要润滑维护的精密导向机构, 而且可以输出较大行程范围(毫米级)。设计了一种柔性金属膜片机构用于液压缸的径向定位导向。建立了金属膜片机构有限元模型, 采用几何非线性算法, 研究分析了不同拓扑结构对金属膜片柔度的影响, 通过不同拓扑结构金属膜片的性能分析对比可知, V 型膜片能够很好地克服应力刚化, 保证柔度的稳定性; 以柔度为优化目标, 对金属膜片 V 型的位置尺寸和形状尺寸进行了优化设计, 金属膜片在导向方向上的柔度提高了 14.2%; 搭建了柔性金属膜片机构柔度测试平台, 验证了仿真计算结果。结合实验和仿真结果可知: V 型柔性金属膜片具有良好的定位导向性能, 对用于液压支撑的液压缸和主动光学的微位移促动器的导向机构的设计具有指导意义。

关键词: 柔性金属膜片; 液压支撑; 定位导向; 优化

中图分类号: TH751 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)01-0188-07

Optimized design of flexible membrane used for large-aperture primary mirror support cylinder

Liu Xiangyi^{1,2,3}, Zhang Jingxu¹, Chen Yudong³, Wu Xiaoxia¹, Li Jianfeng¹, Hao Liang¹

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
3. College of Mechanical Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China)

Abstract: For large-aperture primary mirror hydraulic support system, a simple and reliable precision guiding mechanism is needed to give a larger stroke range (mm) for cylinders, which did not require lubrication and maintenance. In this paper, a flexible metal membrane was designed for the cylinder guiding and radial positioning. With the method of finite elements and nonlinear geometry algorithms adopted, an analysis was carried on the flexible membrane with different topologies, it was shown that V-shape metal membrane could well overcome stress stiffening and maintain the stability of flexibility; with flexibility as the optimization target, optimize the V-shape position and geometry dimensions of membrane V-shape, and the guiding flexibility of metal membrane was improved by 14.2%; established

收稿日期: 2014-05-05; 修订日期: 2014-06-10

基金项目: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所三期创新重大项目专项资金(O65X32C060)

作者简介: 刘祥意(1987-), 男, 博士生, 主要从事大口径望远镜的主镜支撑及热控系统的设计和仿真分析方面的研究。

Email: liuxiangyi107@163.com

导师简介: 张景旭(1964-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事大型光电望远镜结构总体技术方面的研究。

the experimental platform, did experiments and verify the simulation results. According to the experiment and simulation results, the V-shape membrane is found not only having a good flexibility in the vertical surface direction, but also ensuring the stability of flexibility by avoiding stress stiffening. These findings give a certain guidance in the design and application of the guiding mechanism for hydraulic support cylinders and active micro-displacement actuator.

Key words: flexible metal membrane; hydraulic support; positioning guide; optimization

0 引言

望远镜的探索能力和望远镜口径直接相关,为了更好地探索外太空及研究宇宙起源,要求地基光学望远镜口径越来越大。随着口径不断增大,对望远镜主镜的支撑方式提出了更严峻的要求,传统机械式 Whiffletree 结构已很难满足需求^[1-2]。目前,液压支撑作为一种主镜支撑形式,在国外一些大望远镜上已有广泛应用,例如欧洲南方天文台的 8.2 m VLT 望远镜^[3-4]、美国 8.1 m 双子座望远镜 GEMINI^[5]、美国空军毛伊岛基地的 3.67 m AEOS 望远镜^[6]、3.5 m CAT 薄镜面主镜^[7]等,都是用液压支撑作为主镜的轴向支撑。

液压支撑系统中支撑液压缸是其关键的部件之一。望远镜液压支撑所采用的液压缸不同于传统液压缸,利用滚动薄膜而不是传统的 O 型密封圈作为活塞和缸体之间的密封元件,因为 O 型圈会导致活塞和缸体之间较大的静摩擦力,而静摩擦力将导致不同液压缸输出力不同。为此大都采用滚动薄膜作为活塞和缸体之间的密封元件,滚动薄膜具有很好的密封效果,且不会带来摩擦力。如 VLT 望远镜的液压缸使用了三处滚动薄膜作为上下油腔的密封^[3]。但是由于滚动薄膜径向较为柔软,需要给予额外定位。因此液压缸需要一种用于输出较大位移范围(毫米级)、简单可靠、不需要润滑维护的精密定位导向机构。

然而大口径望远镜中液压支撑方案在国内还没有实际的应用,对液压支撑方式中的液压缸及其定位导向机构研究较少。由于柔性机构无摩擦、零间隙、重量轻、简单可靠等优点^[8-12],文中采用一种具有较好的面内刚度和面外柔度的柔性金属膜片作为液压缸的径向定位导向装置。采用一对平行设置的金属膜片,分别安装在液压缸输出轴的前后端。首先通

过有限元分析软件进行仿真分析,研究了拓扑结构、几何尺寸等因素对柔性金属膜片力学性能的影响规律;然后搭建实验平台,利用精密位移测头和力传感器,测试了金属膜片的柔度。

1 理论基础

当结构的刚度随其变形而改变时,就会出现应力刚化^[12]。文中所研究的柔性金属膜片如图 1 所示。柔性金属膜片通过四个支脚固定在液压缸上,当受到垂直力 F 的作用、膜片中心的导向方向上的位移变形不是很小时,必须增加各支脚的长度来满足在垂直方向上的变形。支脚长度的增加是通过应变来实现的,而应变相对应的应力使得结构刚化。对于应力刚化问题的变形求解,必须在求解变形之前已知。但在计算刚度之前又必须知道变形,所以求解和分析是非线性的。

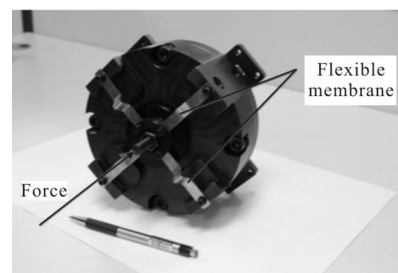


图 1 文中研究的膜片

Fig.1 Flexible metal membrane studied in this paper

对于这种几何非线性情况,平衡条件应如实地建立在变形后的位形上,以考虑变形对平衡的影响。同时应变表达式也应包括位移的二次项。这样一来,平衡方程和几何关系都将是非线性的。这种由于大位移和大转动引起的非线性问题称为几何非线性问题。

在涉及几何非线性的有限元方法中,通常都采用增量分析方法,可以采用两种不同的格式。第一种格式中,所有静力学和运动学变量总是参考于初始

位形,即在整个分析过程中参考位形保持不变,称为完全拉格朗日式。另一种格式中,所有静力学和动力学的变量参考于每一载荷增量或时间步长开始时的位形,记载分析过程中参考位形不断更新,称为更新拉格朗日式,这种算法解算时空效率低,不利于优化,因此在有限元中采用完全拉格朗日式^[13]。

2 柔性金属膜片仿真分析

主镜支撑液压缸的工作行程一般为 2~3 mm,所以作为导向的金属膜片在导向方向上应具有较好的面外柔度,为满足工程要求导向方向的柔度应大于 50 $\mu\text{m}/\text{N}$,且柔度大小稳定。同时为保证金属膜片导向机构能承受一定的径向负载,对活塞起到一定的径向定位作用,金属膜片应具有较大的面内刚度。为满足工程要求,金属膜片的面外柔度应至少高于面内柔度三个数量级。

2.1 拓扑结构对柔性金属膜片的影响

为研究拓扑结构对金属膜片性能的影响,分别设计三种拓扑结构的金属膜片,即平膜片,轻量化膜片和 V 型膜片,三维模型如图 2 所示。

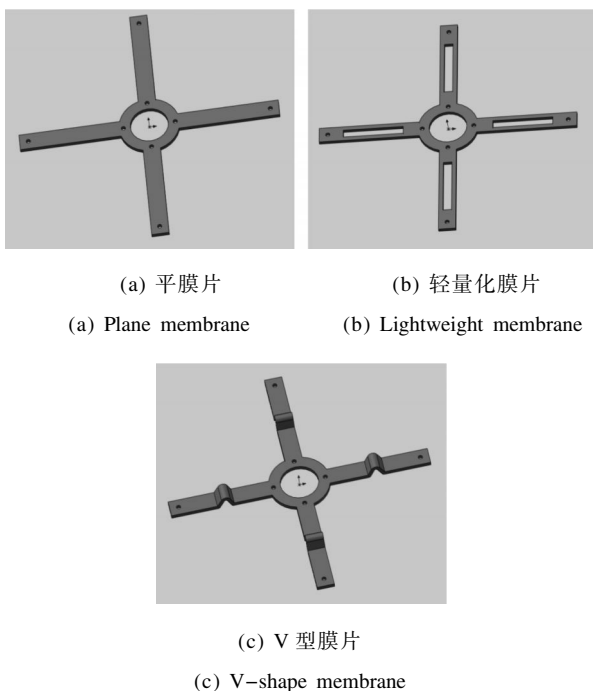


图 2 三种拓扑结构膜片

Fig.2 Three topologies of flexible metal membrane

2.1.1 三种拓扑结构金属膜片的面外柔度计算

首先在 ANSYS 中分别建立基于液压缸的三种

柔性金属膜片有限元模型。以 V 型铍青铜膜片为例,如图 3 所示,为了便于分析,在液压缸未注油的情况下,在有限元模型中可以将液压缸中的活塞简化为梁;液压缸的直径为 150 mm,两侧的柔性金属膜片的厚度为 0.5 mm,每个支脚的宽度为 10 mm,金属膜片采用 Shell 单元。柔性金属膜片中心环与液压缸的活塞采用四个螺钉连接,故可认为梁与金属膜片的中心环是刚性连接;柔性金属膜片的四个支脚与液压缸也采用螺钉固定,故对柔性金属膜片的四个支脚的边缘采用固定约束。活塞材料为 45 号钢,柔性金属膜片材料为铍青铜。其他两种拓扑结构的有限元模型采用相同建模方法。

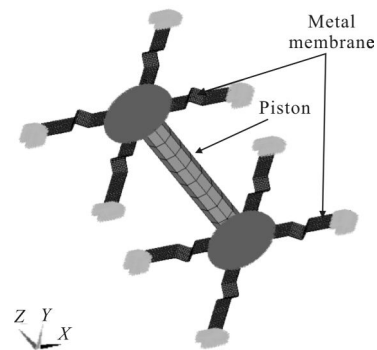


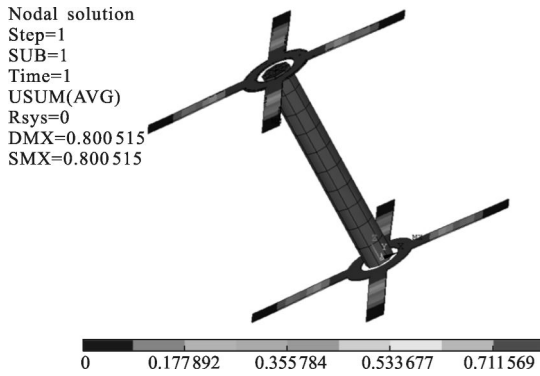
图 3 V 型柔性金属膜片的有限元模型

Fig.3 FEM of V-shape metal membrane

为了能够精确反应力与位移的关系,有限元模型的分析计算采用大变形非线性算法。在有限元模型中沿导向方向上,即 Z 向上施加 $F_z=0\sim 25\text{ N}$ 的力,通过仿真计算,分别计算出三种柔性膜片在 Z 方向上的最大位移量 U_z 。图 3 为三种拓扑结构的柔性金属膜片在 $F_z=25\text{ N}$ 时的变形云图。

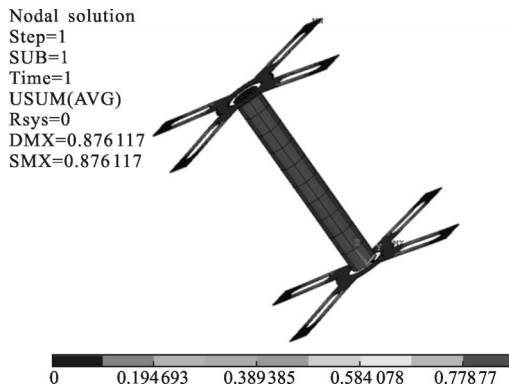
图 4 为三种拓扑结构金属膜片在 Z 方向上的位移与力的变化关系,曲线的斜率为膜片的柔度。从图 5 中不难看出,在 0~2 N 的位移变化范围内,三种膜片的位移随力的变化均成线性变化,即膜片的柔度的大小不变,且三种膜片的柔度基本相等。而随着力的增加,平膜片和轻量化膜片的位移呈现明显的非线性,且其柔度越来越小。这是由于随着力的增加,膜片沿中心轴方向上的变形已经不是很小,膜片需要通过应变变形增加膜片所在平面方向上长度来满足沿中心轴方向上的变形,即平膜片和轻量化膜片在变形过程中出现了应力刚化。应力刚化会急剧增加柔性金属膜片的柔度,使平膜片和轻量化膜片在

导向位移为 $500\mu\text{m}$ 时,面外柔度就分别降为 $35\mu\text{m}/\text{N}$ 、 $42\mu\text{m}/\text{N}$,使其不能满足设计要求。而 V 型膜片在整个力的变化范围内,其柔度不仅具有较好的线性度,而且较大,约为 $100\mu\text{m}/\text{N}$ 。



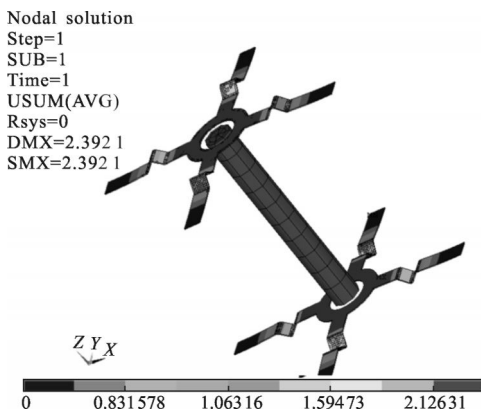
(a) 平膜片

(a) Plane membrane



(b) 轻量化膜片

(b) Lightweight membrane



(c) V型膜片

(c) V-shape membrane

图 4 三种拓扑结构在 $F_z=25\text{N}$ 时的变形云图

Fig.4 Deformation cloud of three topologies flexible membrane when $F_z=25\text{N}$

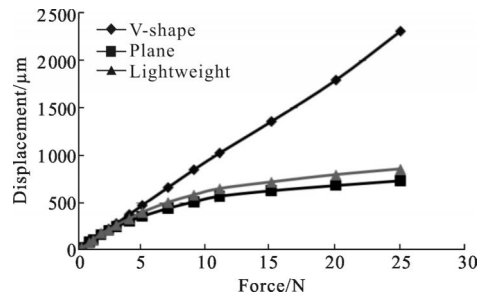


图 5 柔性金属膜片在 Z 方向上的位移与力的变化关系

Fig.5 Z-direction displacement of three topology membranes changing with force

2.1.2 三种拓扑结构金属膜片的面内刚度计算

由于平面内 X、Y 方向的对称性,以金属膜片在 X 方向上的刚度代表膜片的面内刚度。柔度与刚度互为倒数,为了方便与面外柔度的比较,以面内柔度计算代替面内刚度计算。在金属膜片所在平面的 X 方向上施加 $F_x=0\sim 25\text{N}$ 的力,计算三种拓扑结构金属膜片在 X 方向上的柔度。图 6 为金属膜片中心环在 X 方向上的位移与力的变化关系。从图中可以明显地看出,三种拓扑结构金属膜片的柔度大小基本不变,平膜片、轻量化膜片和 V 型膜片的面内柔度分别为: $0.038\mu\text{m}/\text{N}$ 、 $0.05\mu\text{m}/\text{N}$ 、 $0.1\mu\text{m}/\text{N}$ 。虽然平膜片和轻量化膜片的面内柔度更小,但由于对应的面外柔度的非线性变化,当柔性金属膜片沿导向方向的位移由 0 变化为 $500\mu\text{m}$ 时其对应的面外与面内柔度的比值分别由 2 600 下降为 921 和 2 000 下降为 840,而且该比值会随着导向位移的增加而继续急剧减少,使之不能满足设计要求。相比之下 V 型膜片的面外柔度与面内的柔度的比值基本保持在 1 000。

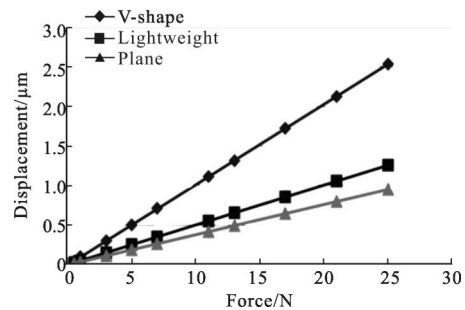


图 6 金属膜片中心在 X 方向上的位移与力的变化关系

Fig.6 X-direction displacement of three topology membranes changing with force

2.2 几何尺寸对金属膜片柔度的影响

通过以上分析可知,V 型膜片相对于平膜片和

轻量化膜片具有很好的性能。由图 6 可知,V 型形状所在位置取决于 D (V 型中心距金属膜片中心的距离),V 型形状主要取决于 L 、 H 。图 7 是对 V 型的位置尺寸和形状尺寸对金属膜片柔性的影响进行分析,并进行优化。

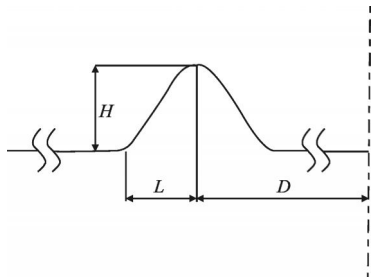


图 7 V 型形状几何尺寸

Fig.7 Position and geometry dimensions of V-shape

首先运用单一变量法研究 H 、 L 、 D 分别对金属膜片柔度的影响。图 8 为三个尺寸对金属膜片柔度的影响。从图 8 中可以明显地看出,三个几何尺寸参数对金属膜片的柔性均呈现出非线性的影响。

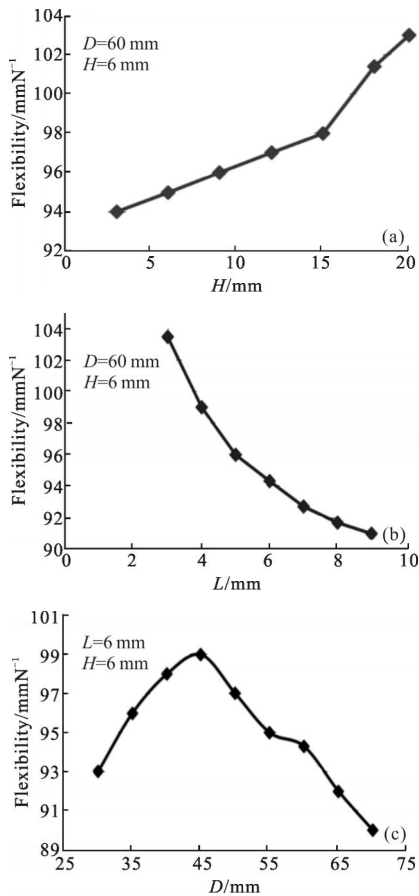


图 8 三个尺寸对金属膜片柔度的影响

Fig.8 Influence of three dimensions on the membrane flexibility

为了得到一组较优的 V 型几何尺寸参数,以 H 、 L 、 D 为优化变量,V 型膜片的面外柔度为优化目标进行优化。液压缸的直径为 150 mm,由于结构尺寸的限制,设计变量的约束条件如公式(1):

$$\begin{cases} 0 < H < 20 \\ 30 < D < 70 \\ 0 < L < 20 \\ D + L < 70 \\ D - L > 20 \end{cases} \quad (1)$$

金属膜片 V 型形状的几何尺寸优化属于一个典型的非线性数学规划问题。为了得到较佳的 V 型形状和位置尺寸,根据以上优化变量、优化目标和约束条件,先用 ANSYS 零阶算法多次进行优化,缩小优化范围后再进一步使用一阶算法优化,以得到较优的值。优化的初始变量 $H=6$ mm、 $L=6$ mm、 $D=60$ mm,通过优化得到的优化变量为 $H=12$ mm、 $L=9$ mm、 $D=44$ mm,使柔性金属膜片的导向位移为 1mm 时的柔度由初始的 $94.3 \mu\text{m/N}$ 提高到 $107.7 \mu\text{m/N}$,提高了 14.2%。

3 柔性金属膜片性能测试

设计了如图 9 所示的弹性金属膜片的柔度测量方案。首先调节数字信号放大器对数字万用表在 Loadcell(测力元件)单位力下的电压值进行标定,可得标定值 0.036 V/N 。将三脚架安装在气浮平台上,并将液压缸(未注油)安装在支架上,液压缸的输出轴水平;在气浮平台上安装施力机构,利用工装将施力杆和液压缸输出轴调整在同一高度,并用 Loadcell 抵住液压缸力输入的一端;直线光栅尺的高精度位移测头抵住液压缸轴的另一端,用来测量液压缸轴的轴向位移。

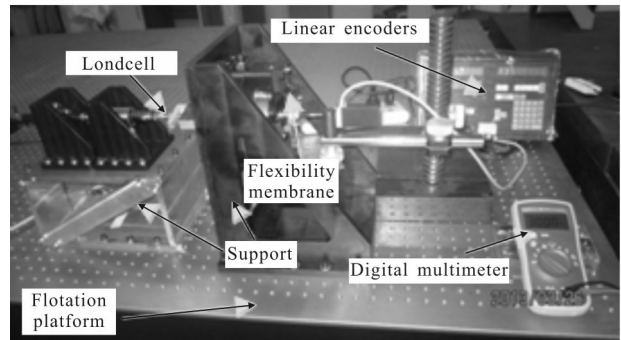


图 9 柔性金属膜片的柔度测量装置

Fig.9 Flexibility of metal membrane measuring experiment device

图10为V型铍青铜膜片的实验结果与仿真结果。不难看出,实验值与仿真值具有较好的一致性。实验所测的柔性金属膜片沿导向方向的柔度具有很好的稳定性,表明V型膜片可以很好地克服应力刚化,验证了V型结构的合理性;同时实验所测柔度与仿真计算的柔度具有较好地一致性,在0~2.5 mm的导向位移范围内,仿真计算的柔度约为103 $\mu\text{m}/\text{N}$,实验所测的柔度约为94 $\mu\text{m}/\text{N}$,相差不到10%,验证了有限元仿真结果的准确性。造成仿真值与实验值间的偏差的原因主要是在有限元建模时,为了简化模型,没有充分考虑液压缸内部结构对整个液压缸轴向柔度的影响,如液压缸移动过程中密封处的摩擦等,导致仿真求得的柔度偏大,但偏差在可以接受的范围内。

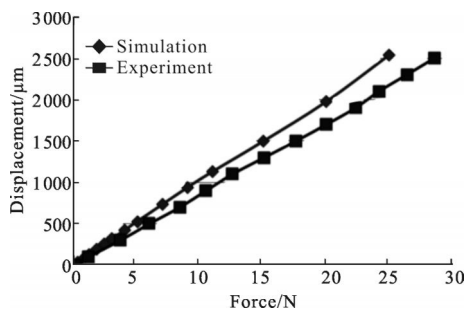


图10 V型铍青铜膜片的实验结果与仿真结果图

Fig.10 Simulation and experiment results of the V-shape membrane

4 结论

在大口径望远镜主镜液压支撑结构形式中需要一种简单可靠、不需要润滑维护的精密导向机构,本文开发了一种柔性金属膜片机构用于液压缸的径向定位导向。针对以上课题进行了理论计算和实验研究,主要工作及成果如下:

(1) 建立了一种用于大口径望远镜支撑液压缸定位导向的柔性金属膜片有限元模型,采用几何非线性算法,计算了不同拓扑结构下金属膜片的柔度,通过对三种拓扑结构的金属膜片的面外柔度的对比分析可知,V型膜片能够避免应力刚化,保持柔度的稳定性,能够较好地满足需求;

(2) 研究了膜片V型的定位尺寸和几何尺寸对膜片柔度的影响规律,以柔性金属膜片的导向柔度为优化目标,进行了参数优化,使柔性金属膜片在导向位移为1 mm时,柔度由94.3 $\mu\text{m}/\text{N}$ 提高到

107.7 $\mu\text{m}/\text{N}$,提高了14.2%;

(3) 设计了面外柔度测试系统,验证了V型柔性金属膜片设计的合理性和有限元仿真结果的准确性。

文中工作对大口径望远镜液压支撑方式中的液压缸和主动光学的位移促动器的导向机构的设计应用具有重要的指导意义。

参考文献:

- [1] Cheng Jingquan. Principles of Astronomical Telescope Design[M]. Beijing: China Science & Technology Press, 2003. (in Chinese) 程景全. 天文望远镜原理和设计[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2003.
- [2] Wang Fuguo, Shao Liang, Wu Xiaoxia, et al. Review of foreign groundbased telescope primary mirror support [J]. *Laser & Infrared*, 2011, 42(3): 237-243. (in Chinese) 王富国, 邵亮, 吴小霞, 等. 国外大型地基望远镜主镜支撑综述[J]. 激光与红外, 2011, 42(3): 237-243.
- [3] Ernst-Dieter knohl, Carl Zeiss Oberkochen. VLT primary support system[C]//SPIE, 1994, 2199: 271-283.
- [4] Thierry hovsepian, Jean Marc Michelin, Stephano Stanghellini. Design and tests of the VLT M1 Mirror passive and Active supporting system [C]//SPIE, 1998, 3352: 424-435.
- [5] Larry Stepp, Eugene Huang, Myung Cho. Gemini primary mirror support system[C]//SPIE, 1994, 2199: 223-238.
- [6] Kaercher H J, Peter E, Marth Süss, et al. Mechanical principles of large mirror supports [C]//SPIE, 2010, 7733: 201-2012.
- [7] Kimbrell J E, David Greenwald. AEOS 3.6mTelescope primary mirror active control system [C]//SPIE, 1998, 3352: 400-411.
- [8] Shao Liang. Mechanism design and research of micro-displacement actuator based on giant magnetostrictive cell [D]. Nanjing: Nanjing Institute of Astronomical Optics & Technology, 2009. (in Chinese) 邵亮. 基于磁致元件的微位移促动器的机构设计研究[D]. 南京: 中国科学院南京天文光学技术研究所, 2009.
- [9] Liu Zhengyu, Luo Xiao, Deng Weijie, et al. Multi-mode optimization for large optical aspheric mirror [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(11): 2791-2793. (in Chinese) 刘振宇, 罗霄, 邓伟杰, 等. 大口径非球面的组合加工[J]. 光学精密工程, 2013, 21(11): 2791-2793.
- [10] Shao Liang, Yang Dehua, Chen Kunxin, et al. Review of mechanical structure of Microo-displacement actuator for

- optical astronomical telescope [J]. *China Academic Journal*, 2009, 27(1): 70–79. (in Chinese)
- 邵亮, 杨德华, 陈昆新, 等. 光学天文望远镜用微位移驱动器机构研究综述[J]. 天文学进展, 2009, 27(1): 70–79.
- [11] Yu Xinfeng, Gong Yan, Ni Mingyang, et al. Optical surface figure of lens under kinematic mount apparatus and its reproducibility [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(8): 2000–2007.
- 于新峰, 巩岩, 倪明阳, 等. 基于运动学支撑的透镜光学表面面形及其复现性 [J]. 光学 精密工程, 2013, 21(8): 2000–2007.
- [12] Larry L Howell. *Compliant Mechanisms* [M]. John Wiley & Sons, Inc. 2001: 18–32
- [13] Wang Xuli. *Finite Element Method* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003. (in Chinese)
- 王勖力. 有限元法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.