

文章编号 1004-924X(2002)02-0201-04

主动调节刚性支撑薄膜型反射镜面形调整机构的研究

叶 露

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130022)

摘要:空间光学的发展对光学系统的轻量化提出越来越高的要求,作为一种超轻量化的方法,介绍了主动调节刚性支撑薄膜型反射镜的概念,这种薄膜型反射镜由美国率先提出,并制造出口径500mm厚2mm的模型镜,反射镜的面形通过均匀分布的致动器的微量移动来调整,致动器的最小位移是20nm。美国使用压电陶瓷做致动器,有利于实现系统的轻量化。在试验阶段,设计一套机械微动装置来代替压电陶瓷做致动器,它的微动原理是利用杠杆减速机构及球面上的不同点的矢高变化来得到所需要的微位移,这套机构具有结构简易,重量轻,易于加工制造的特点,同时具有较高的灵敏度。

关键词:反射镜;轻量化;微动机构

中图分类号:TH703 **文献标识码:**A

1 引言

空间光学的发展对光学系统的轻量化提出越来越高的要求。空间光学系统中光学元件的超轻量化问题已越来越为人们所重视,解决这一问题将为整个航天发射计划节约大量资金。最初的轻量化方法是通过机械加工或超声波钻孔在反射镜的背面或侧面打孔以减轻重量;之后,又发明了熔合法和熔合封接法制造反射镜以及采用轻质材料镀膜制造反射镜。这些方法都有效地实现了光学元件的轻量化,但随着自适应光学技术的发展,及其自适应光学技术对空间光学系统像面的调节作用,未来的空间光学系统将向着更轻的、面形可以进行自适应调整的方向发展。1989年美国发射的哈勃空间望远镜其主镜口径2.4m,镜坯由两片25.4mm厚的玻璃片,中间夹有305mm宽的玻璃蜂窝制成,其重量为816kg磅。自适应光学技术在哈勃空间望远镜中也得到了应用。在其主镜背面装有24个致动器,副镜背面装有6个致动器,一旦镜子发生变形,可由致动器进行调节,使聚焦光线达到焦平面。

2 薄膜型反射镜简介

1997年美国Arizona大学提出采用先进的技术,以更快的速度、相对低廉的价格制造大口径空间望远镜。望远镜的主镜称之为主动调节刚性支撑薄膜型反射镜。这种反射镜以微重量的碳纤维混合物做框架,由光学玻璃制成的薄膜型反射镜同许多均匀分布的致动器做刚性连接,致动器可以在微电机的作用下做步距为30nm的上下移动,通过对星点像的检测,时时调整致动器,以保持镜面面形。在Arizona大学首先制作完成的一块口径530mm,厚2mm的模型镜中,共使用了36个致动器,每个致动器的重量仅40g,镜子全部总重量(包括碳纤维支撑架)为4.73kg。经过致动器的调整,面形精度能达到53nm/rms。目前Arizona大学正在研制口径更大的薄膜型反射镜。

3 面形支撑与调整机构概况

超薄镜子的镜面面形极易发生变化,必须用一个能进行微量调整的致动器机构对面形进行调

收稿日期:2001-06-04;修订日期:2002-01-17

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 69878028)

整,微量调整机构的位移步距需达到 $\lambda/20$,以带动镜面实现 $\lambda/20$ ($p-v$) 的局部调整,当使用 zago 干涉仪进行检测时, $\lambda = 0.6328\text{nm}$,微量调整机构的微动步距需达到 30nm 。在试验阶段,一个口径 400mm 的镜子至少需要 20 个点来调整,也就是需要 20 个致动器,要真正将薄膜型镜面应用于空间光学系统,需要做大量的实验(从不同的口径到不同的厚度),美国使用压电陶瓷作微量调整元件,通过对输入电压的控制,改变压电陶瓷的伸缩量,带动镜子的某一点产生位移,从而使镜子面形得到调整。由于压电陶瓷价格昂贵(成品每个在 $400 \sim 500$ 美元之间),在经费比较缺乏的情况下,全部使用压电陶瓷作微量调整元件是难以实现的。为此设计一套机械微动装置,来代替压电陶瓷,或与压电陶瓷配合使用。这套机械微动装置也可实现步距 30nm 微量移动,其性能在试验阶段完全可以代替压电陶瓷,而成本却大大降低。

4 致动器的结构设计

4.1 致动器的微动原理

这套致动器装置采用杠杆减速机构及利用球面上不同点矢高的变化来实现所需要的微位移,它的工作原理是:

如图 1 为微动原理示意图:首先杠杆按 $6:1$ 的减速比设计,当微调丝杆平移 1mm 时,杠杆顶点平移 $1/6\text{mm}$, 杠杆顶端为直径 8mm 的球面,球面中心距杠杆回转中心距离为 8mm , 杠杆顶端通过一块磁铁与一个顶块相连。当杠杆转动时,在磁铁吸附力的作用下,顶块在限位套内上下移

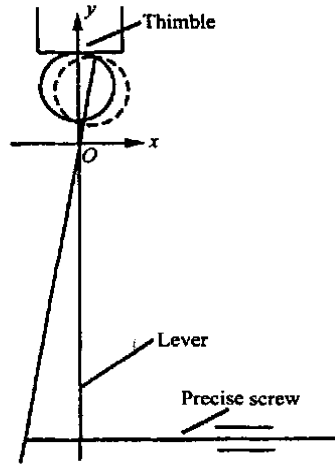


图 1 微动原理示意图

Fig. 1 Sketch map of micro-moving.

动。微调丝杆螺距为 0.5mm ,手轮直径 50mm ,按手轮转动的分辨率为 0.5mm 计算,微调丝杆可实现 $3\mu\text{m}$ 的移动,相应杠杆顶点的水平移动为 $0.5\mu\text{m}$,若杠杆顶点水平移动的总范围为 3mm ,在此范围内各点矢高的变化可通过圆周运动方程计算得到。

顶点运动方程

$$X^2 + Y^2 = 64$$

$$Y_i^2 = 64 - X_i^2,$$

$$h = Y_{i+1} - Y_i$$

$$X_i = i/2 \quad i = 0, 1, 2, \dots$$

杠杆顶点 x 方向总行程 $0 \sim 3\text{mm}$, y 方向的矢高 h 变化 1.8mm ,在此范围内,以杠杆转轴为坐标原点, x 从零开始每运动 $30\mu\text{m}$,相应的矢高 h 变化见表 1。

表 1 顶点平移与矢高变化关系表

Table 1 Relations between top moving and sagitta changing

X(μm)	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300
Y(nm)	3.1	9.4	15.6	21.9	28.1	34.4	40.6	46.9	53.1	59.4
X(μm)	330	360	390	420	450	480	510	540	570	600
Y(nm)	65.6	71.9	78.1	84.4	90.6	96.9	103.1	109.4	115.6	121.9

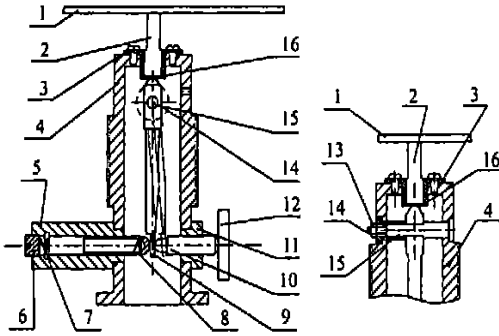
从表中数据可知杠杆顶点水平移动在 $0 \sim 150\mu\text{m}$ 范围时,顶点位移低于 30nm ,随着水平位移的加大,顶点位移的步距也在增大,可根据实际使用情况,恰当选择微调丝杆平移范围控制杠杆的摆角。

4.2 致动器的具体结构

这套机械调整装置主要由 13 个部件组成,其中关键部件有顶块 2、磁铁 16、杠杆 9、微调丝杆 10,如图 2 所示。

其余的部件均起辅助作用,微调丝母 11 固定

在薄镜调整支座 4 上,微调丝杆 10 转动时可沿轴向移动;压簧 7 装在压簧顶杆 8 内,压簧顶杆 8 可在压簧座内沿轴向移动,在压簧力的作用下,压簧顶杆 8 顶在杠杆 9 上,使得杠杆 9 随微调丝杆的移动而转动。压簧座 5 通过螺纹固定在薄镜调整支座 4 上,压簧帽 6 拧在压簧座 5 中,通过调整压簧帽 6 拧入的深度,改变压簧的预紧力。压簧顶杆 8 与微调丝杆 10 同轴。



1. Mirror 2. Thimble 3. Limiting 4. Mirror adjusting
5. Spring abutment 6. Screw nut 7. Spring 8. Spring
thimble 9. Level 10. Precise screw 11. Screw nut 12.
Handwheel 13. Screw nut 14. Lever sheath 15. Lever
axle 16. Magnetic

图 2 微动装置结构图

Fig. 2 Structure of the micro-move device.

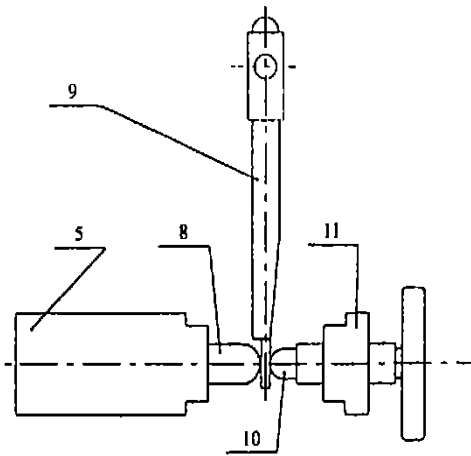


图 3 杠杆运动机构示意图

Fig. 3 Sketch map of lever moving.

杠杆 9 的形状及固定方式如图 3 所示。

杠杆 9 的顶端做成球面,球面的顶点是杠杆的一个工作点,杠杆的下端系出两个平行的平面,微调丝杆 10 和压簧顶杆 8 分别顶在这两个平面上,顶点位置是杠杆的另一个工作点,杠杆的转轴中心将上下两个工作点分成 1:6 的比例,杠杆其余部分是圆柱形,将圆柱的下端砍掉一角,目的是使杠杆在薄镜调整支座内有足够的行程。杠杆通过杠杆轴 5 固定在薄镜调整支座上,为了使杠杆能够转动自如,同时又可控制杠杆转动时的晃动量,用杠杆轴套 14 压住杠杆,通过螺母 13 来调整压紧力,使杠杆在最佳状态下转动。

4.3 机构的功能

为了满足薄膜镜面形的调整需要,致动器不仅要实现 20nm 的微量移动,同时还应有一个粗调装置,当微调范围不能满足要求时,可移动粗调装置使我们所需要的微量在工作范围内。

4.4 关键工艺措施

薄膜镜的面形调整,最终是通过顶块 2 的移动来实现的。顶块同薄膜镜用胶粘来连接,顶块和杠杆之间用磁铁 16 来连接。顶块的位移量最终决定了面形的调整量,为了使顶块移动时不晃动,做了一个限位套 3 固定在薄镜调整支座,限位套与顶块在加工时配研,使间隙很小,同时光洁度很高,顶块能在限位套内移动自如。

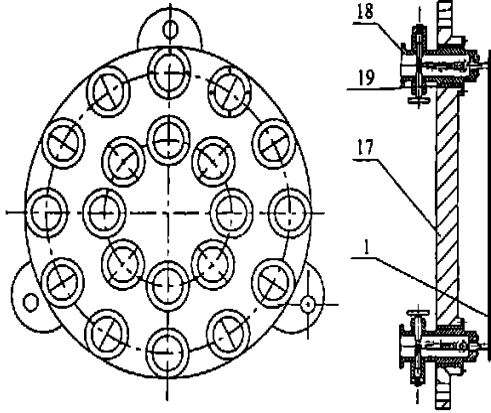
薄镜调整支座 4 除用于固定零部件外,自身还起着粗调的作用,它的形状由几段直径不同的圆柱体组成,在中间部位车有一段螺纹,当杠杆微动的范围不能满足要求时,转动薄镜调整支座,并带动所有的零部件上下移动,使顶块有较大范围的移动,从而达到粗调的目的。

4.5 机械灵敏度的检验

用测微计对微调装置的灵敏度进行测试,测微计的分辨率是 0.5μm,精度是 1μm,将测头置于顶块上,轻轻转动精密丝杆,观察测微计的变化,结果是很容易分辨 0.5μm 的变化量,尽管无法用测微计检验 20nm 步距的变化,但从转动螺杆的手感可以判断出这套微调机构有很高的灵敏度。

5 应用简介

按照有限元分析的结果,对于口径为 400mm



1. Mirror 17. Main support 18. Mirror adjusting 19. Screw nut

图 4 薄膜镜微动调整示意图

Fig. 4 Sketch map of micro-move for membrane.

的薄膜型反射镜,要得到较好的面形,需 20 个点来支撑与调整,即内圈 8 个,外圈 12 个,每个支撑点都装有一个步距为 30nm 的微量调整机构。如图 4,在一块底板 17 上按要求打 20 个孔,每个孔内装一个螺纹套 19,每个螺纹套用螺钉与底板固定,将 20 个薄镜调整支座 18 拧入每个孔中,再将各部件装入薄镜调整支座。如图 4 所示。

为了使镜子进行面形调整时,各微调机构的调整点之间互不干扰,顶块与镜子之间用胶粘固定连接,杠杆与顶块间通过磁铁来连接。当某一点顶块向上移动顶镜面时,其他各点在磁力的吸附下不发生移动,只有这一点顶块移动量过大时,磁铁才与杠杆脱离。使用磁铁连接的优点是可以保护玻璃不破碎,只是要求磁铁磁力的选择应适当。

参考文献:

- [1] Burg J K, Angel R P. Lightweight mirror technology using a thin facesheet with active rigid support[J]. *SPIE*, 1998, 3356:690 - 701.
- [2] Angel R, Martin B. Next generation space telescope: a monolithic mirror candidate[J]. *SPIE*, 1996, 2807:354 - 356.
- [3] Martin H M, Anelson D S. Techniques for optical fabrication of a 2-mm thick adaptive secondary mirror[J]. *SPIE*, 1995, 534:134 - 139.
- [4] 沈人杰. 哈勃空间望远镜[J]. 国外空间动态, 1990, 8:15 - 17.
- [5] 史习敏, 李永明. 精密机械设计[M]. 上海:上海科学技术出版社, 1987.

Micro-move devices for supporting and adjusting large membrane mirrors

YE Lu

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022)

Abstract: Along with the development of space optics, the lightweighting of an optical system becomes more and more important. Membrane with active rigid support (MARTS) was first made at the University of Arizona. The mirror features lightweight and fine surface accuracy, and its surface can be adjusted by many actuators. The thickness of the membrane mirror is 2.1 mm, diameter, 530mm, and mass, 1.25kg. The actuator designed on the principle of piezoelectricity has the micro-moving of 20nm. During the trial manufacture, the author made an actuator by the method of mechanism. Its principle of micro-moving is based on leverage and changing of height of arc in the spherical surface. It can realize 20nm micro-moving, too. This device is characterized by simple structure, high sensitivity and easy manufacturing.

Key words: reflection mirrors; lightweighting; micro-mechanism

作者简介:叶 露(1965 -)女,吉林省长春市人,1986年毕业于长春光机学院光学仪器专业,1993年在长春光机所获光学专业硕士学位,现在长春光机所工作,主要从事光学检验技术等方面的研究工作。