

文章编号 1004-924X(2009)08-1964-07

# 薄膜反射镜的单电极控制静电成形

安 源<sup>1</sup>, 金 光<sup>1</sup>, 齐迎春<sup>2</sup>, 孙小伟<sup>3</sup>, 蒋 宁<sup>1</sup>, 艾晨光<sup>4</sup>

(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. 吉林大学, 长春 吉林 130022; 3. 长春理工大学, 吉林 长春 130028;

4. 北京邮电大学, 北京 100876)

**摘要:**考虑薄膜反射镜具有质量轻、柔韧性好、可折叠等优点,研究了由静电拉伸法制备薄膜反射镜的新技术。介绍了薄膜反射镜的静电成形机理,计算了单电极模式下薄膜所受力场,设计了单电极式薄膜反射镜的控制实验。给出了控制成型所需的主要参数,设计了薄膜反射镜的夹持结构和控制电路,并利用刀口仪测量了形成的反射面的焦距。实验结果显示,未通电时薄膜反射镜面形的 PV 值达到  $11.14\lambda$ , RMS 值为  $1.86\lambda$ , 在  $10\,000\text{ V}$  的高压下可以形成焦距约为  $2.1\text{ m}$  的反射镜面。通过 Zernike 拟合验证了数据的可靠性,结果表明,通过改善夹持结构精度和选取性能优良的薄膜材料,反射镜面形精度可进一步提高。

**关键词:**薄膜反射镜;单电极控制;静电拉伸

**中图分类号:**TH704 **文献标识码:**A

## Control of membrane mirror shape by single electrode

AN Yuan<sup>1</sup>, JIN Guang<sup>1</sup>, QI Ying-chun<sup>2</sup>,  
SUN Xiao-wei<sup>3</sup>, JIANG Ning<sup>1</sup>, AI Chen-guang<sup>4</sup>

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China*; 2. *Jilin University, Changchun 130022, China*;  
3. *Changchun University of Science and Technology, Changchun 130028, China*;  
4. *Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China*)

**Abstract:** Electrostatic stretching is a new technique developed in recent years for fabricating membrane mirrors with light, good flexible and collapsible properties. Based on the electrostatic shaping principle of a membrane mirror, the force field of the stretched membrane was calculated by a single electrode mode, and the support structure of the membrane and its control circuit were designed. Then, several kind of technological parameters for controlling membrane shape were given and the focus of reflective surface of the membrane was measured by a knife-edge. The experimental results show that the PV and RMS values of the membrane mirror are  $11.14\lambda$  and  $1.86\lambda$  without applying an electric force respectively, and the focus of reflective surface of the membrane is about  $2.1\text{ m}$  with a  $10\,000\text{ V}$  high voltage. Finally, the Zernike fitting was used to verify the reliability of the data, and it

收稿日期:2009-01-19;修订日期:2009-03-31.

基金项目:国家 863 计划项目(No. 2007AA12Z113)

suggests that the surface accuracy can be improved further by optimizing the holding structure and selecting excellent membrane materials.

**Key words:** membrane mirror; controlled with single electrode; electrostatic stretching

## 1 引言

薄膜反射镜是近些年应空间光学系统分辨率越来越高的要求而提出的一种新型反射镜,通过在具有高精度光学表面的有机薄膜基底材料上镀一层金属反射介质来达到反射光线的目的。相对传统反射镜基底材料来说这种反射镜具有极小的面密度,解决了反射镜口径与质量相互制约的问题,同时它具有优良的可折叠性能,能够满足运载设备对光学系统有效载荷使用空间的要求,因而成为各国航天工作者的研究热点。为了研制薄膜反射镜,美国科学研究学会(SRS)专门研制了满足光学要求的CP-N型号的聚酰亚胺薄膜,CP-1薄膜的面密度大约为 $18\text{ g/m}^2$ ,如果利用超轻可折叠展开机构支撑(其面密度大约为 $1\sim 2\text{ kg/m}^2$ ),则用此薄膜制成的孔径 $10\text{ m}$ 反射镜主镜的面密度大约为 $2\sim 3\text{ kg/m}^2$ ,与用传统材料制成的反射镜相比(如哈勃望远镜,主要由精密桁架结构和厚的玻璃主镜组成,孔径 $2.4\text{ m}$ ,总质量 $12\ 000\text{ kg}$ ,面密度 $2\ 500\text{ kg/m}^2$ ),其优势非常明显<sup>[1-2]</sup>。

薄膜反射镜的面形可通过在其表面施加一定载荷来实现,静电拉伸薄膜反射镜就是利用静电场和结构场相互耦合作用来产生曲面面形并对面形进行控制的。目前很多科研单位正在对此进行研究,如美国亚利桑那大学<sup>[2]</sup>、NASA<sup>[3]</sup>、Honeywell<sup>[4]</sup>实验室等。但由于薄膜结构本身的特点,有别于传统反射镜系统设计和生产技术,因此薄膜反射镜仍处于理论和实验研究阶段。

本文在对静电拉伸薄膜反射镜控制成形机理进行研究的基础上,针对单电极静电成型试验展开详细设计,并通过实验验证了静电薄膜成型控制原理的正确性。

## 2 静电拉伸薄膜反射镜控制机理

静电拉伸薄膜反射镜面形成形控制主要是通过控制电极间电势的大小及分布来实现的。所

谓的静电拉伸是指在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,是依靠电流做功来完成的。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。

成形控制过程包括两个方面的内容:(1)反射镜面形的初始成形,这一过程从平面面形开始,最终达到薄膜面形的静态稳定。给平面薄膜反射镜施加电势场,使薄膜产生变形,当电势的大小及分布达到一定条件时,薄膜从初始的平面变形成为一定的曲面,保持作用电势,薄膜面形将最终保持某一曲面模型;(2)对薄膜面形调整,从已具有一定曲面面形的薄膜开始,改变电极上电势的大小与分布,使薄膜曲面再做一定变形,最后通过调节电势及其外部条件使面形达到所要求的结果,最终仍需要达到静态平衡<sup>[5-6]</sup>。

单电极模式是静电拉伸薄膜反射镜最简单的工作模式,本文以单电极为例,应用静电场理论和薄膜力学原理计算单电极作用下薄膜所受力场及产生的最大挠度,以此为依据设计单电极静电拉伸薄膜反射镜的结构及控制电路等,并对实验结果进行分析。

## 3 单电极控制薄膜反射镜参数

静电拉伸薄膜反射镜单电极的工作原理如图1所示,设反射镜口径为 $d$ ,薄膜到电极的距离为 $l$ (变形前薄膜为平面),薄膜与电极间的电压为 $U$ 。

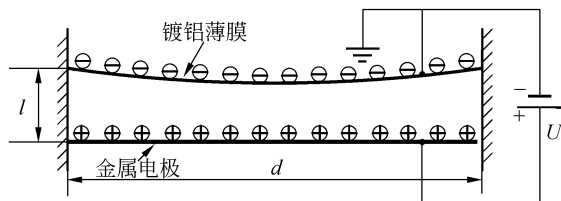


图1 单电极模型的电容近似图

Fig. 1 Capacitance distribution in model of single electrode electrostatic

### 3.1 受力的近似计算

考虑到成形薄膜曲面的曲率较小,将单电极与薄膜简化为平板电容。在金属电极与镀铝薄膜之间加上一定电压  $U$  (薄膜镀铝层为零电位),两极间在  $l$  方向上的相互引力为  $F_l$ ,假设两电极间的相互位置变动为  $dl$ ,需要做功  $F_l dl$ ,则这个功等于电容器所含能量  $W$  的增量  $dW$ ,即

$$dW = F_l dl, \quad (1)$$

$$dW = d\left[\frac{Q^2}{2C}\right] = -\frac{U^2}{2} dC, \quad (2)$$

$$F_l = -\frac{U^2}{2} \frac{\partial C}{\partial l}. \quad (3)$$

平板板间距离为  $l$ ,面积为  $A$ ,而  $l \ll \sqrt{A}$ 。当电压  $U$  加在两极板上时,不计电极的边缘效应,可以认为整个电场都是均匀的。将电场强度  $E$  沿电力线自一个电极积分到另一个电极(即由 0 到  $d$ ),得到

$$U = \int_0^d E dl = El, \quad (4)$$

$$E = \frac{U}{l}, \quad (5)$$

$$D = \frac{\epsilon U}{l}, \quad (6)$$

其中,  $E$  为电场强度,  $D$  为电位移矢量,  $\epsilon$  为真空介电常数。

极板上的电荷密度  $\sigma$  将为:

$$\begin{cases} \sigma = D = \frac{\epsilon U}{l} \\ Q = \sigma A = \frac{A\epsilon U}{l} \\ F = -\frac{U^2}{2} \epsilon A \frac{1}{l^2} \end{cases}. \quad (7)$$

可以近似地认为在薄膜上存在对  $l$  方向上均匀密度力:

$$p = -\frac{\epsilon U^2}{2l^2}. \quad (8)$$

### 3.2 最大挠度 $\omega_m$ 估计

由于电极与薄膜的最短距离  $l_0 = l - \omega_m$ ,在实际应用中必须考虑高压击穿的问题,所以设计时必须考虑到在最大电压下不会因变形产生薄膜与电极间的高压击穿。

$$p = \frac{8}{3} (1.015 - 0.247\nu) \frac{Et\omega_m^3}{a^4}, \quad (9)$$

其中:  $a = \frac{1}{2}d$ ,  $\nu$  为泊松比,  $t$  为薄膜厚度。

联立式(8)与式(9)得:

$$\omega_m = \sqrt[3]{\frac{\epsilon U^2}{2l^2} \frac{3a^4}{8Et(1.015 - 0.247\nu)}}. \quad (10)$$

计算得最大挠度为:  $\omega_m = 1.8 \text{ mm}$ 。

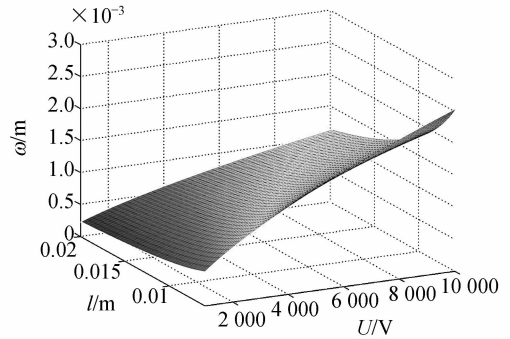


图 2 电压与极间距对最大挠度取值的影响

Fig. 2 Effect of voltage and distance between two poles on flexibility maximum

通过式(10)可计算出电压  $U \in [1\ 000, 10\ 000]$ ,  $l \in [0.006, 0.02]$  区域上最大挠度与电压及极间距之间函数关系。从图 2 中看出当  $l = 0.006 \text{ m}$ ,  $U = 10\ 000 \text{ V}$  时挠度值最大,此时计算得  $\omega(10\ 000, 0.006) = 0.002\ 5 \text{ m}$ ,最小极间距  $l_0 = 0.003\ 5 \text{ m}$ ,由空气介质的临界场强为

$$E_{kp} = 3 \text{ V/m},$$

则有  $E_{kp} \times l_0 = 10\ 500 \text{ V}$ ,稍大于最大工作电压的  $10\ 000 \text{ V}$ ;在最大值  $10\ 000 \text{ V}$  的可调电压下,极间距最小值不应低于  $0.006 \text{ m}$ ,否则就可能产生高压击穿。

## 4 薄膜反射镜静电成形控制实验设计

### 4.1 结构设计<sup>[7]</sup>

静电拉伸薄膜反射镜的支撑结构设计主要为进行静电拉伸薄膜反射镜原理性试验构建一个平台。本文从以几个方面考虑:

(1) 设计合理的周边夹持结构,以获得足够精度的薄膜平面面形;

(2) 结构平台的物理模型应尽量与静电场理论分析模型相一致;

(3) 结构设计应使在高压环境下的静电实验在程序操作上安全可靠。

图 3 给出了静电拉伸薄膜反射支承结构的设

剖面图,反射镜的口径为 180 mm,薄膜固定在下板上,通过调节上压板与下板的间距来控制薄膜表面张力,达到将薄膜拉紧和扯平的作用。支撑架与电极座采用绝缘材料环氧树脂制作,其临界场强  $E_{kp}$  达到 2~3 kV/m,保证了高压实验器件的安全性。

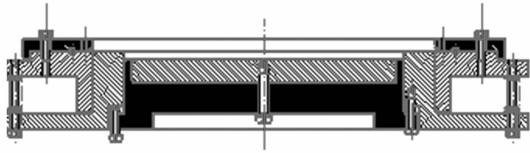


图 3 静电拉伸薄膜反射镜结构图

Fig. 3 Holding structure of membrane mirror by electrostatic stretching

### 4.2 单电极控制实验电路设计<sup>[8]</sup>

由于整个单电极实验的目的是为未来多电极控制系统提供数据参考,并在单电极模型完成相器件与材料的性能测试,以便为静电拉伸薄膜反射镜的实际研制工作提供硬件条件的支持,所以整个电路模型采用多电极多路中的一路作为单电极电路的基础。整个电路系统以器件保护与安全操作为重点考虑的对象。

图 4 中  $R_1$  为薄膜短路保护电阻,  $R_2$  为充电电阻,  $R_3$  为负载电阻,并与  $R_2$  组成放电电阻,  $R_4$  为电压表分压电阻,电容  $C_1$  和  $C_2$  串联组成电压保持滤波系统,保持与减小纹波电压。

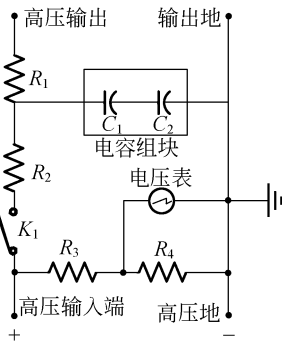


图 4 单电极电路图

Fig. 4 Circuit of single electrode

### 4.3 实验结果

在完成静电拉伸薄膜反射镜支撑结构与电路调试之后,为对整体试验方法做出评估,进行了如下 2 项实验测定。

#### 4.3.1 静电拉伸薄膜反射镜平面面形检测<sup>[9]</sup>

检测周边夹持结构下薄膜拉伸形成平面精度,对未来薄膜反射镜支承结构的设计提供重要的数据参考。面形检测采用干涉仪测量法,其主动光源的激光波长为 532.8 nm。图 5 是本实验的实物图。

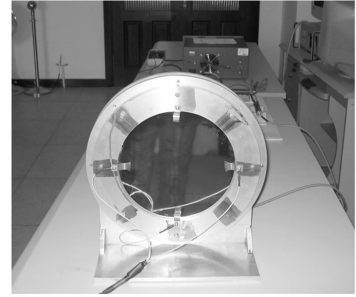


图 5 单电极静电拉伸薄膜反射镜实物图

Fig. 5 Picture of membrane mirror by electrostatic stretching

图 6 显示了测量干涉条纹以及测量结果,面形的 PV 值精度为  $11.14\lambda$ ,面形的 RMS 值精度为  $1.86\lambda$ 。

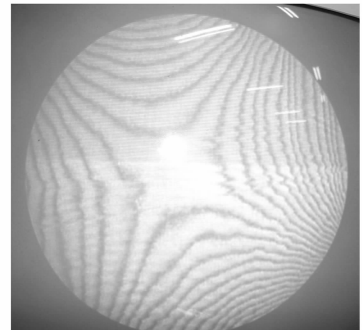


图 6 检测干涉条纹图

Fig. 6 Tested interference fringes

作为光学成像来说,这一测量值显然是不够理想的。但从整个试验平台加工以及薄膜材料的选取来说,实现这一结果,已能证明这一结构设计的合理性。

首先,支承结构中下板的平面度公差为  $6\ \mu\text{m}$ ,与面形的 PV 值近似。其次,薄膜材料选用通常包装用的镀铝聚脂薄膜,其性能远不能达到光学面形的标准。图 7 为薄膜材料在显微镜下的表面质量图片。

在整个实验的过程中,干涉仪中显示的面形稳定,表明在薄膜拉伸预应力调节下,内部张力增



图 7 10 倍显微镜下薄膜表面质量

Fig. 7 Surface quality of membrane in 10× microscope

大使得薄膜能够在常规环境下保持面形稳定。

### 4.3.2 焦距测量

对于近似球面反射镜,焦距是关键指标之一,因此有必要测量一下薄膜静电拉伸后反射面的焦距,在本试验中采用传统的刀口仪进行检查,图 8 为刀口仪测焦距的原理示意图。

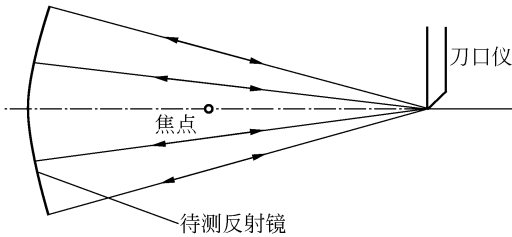
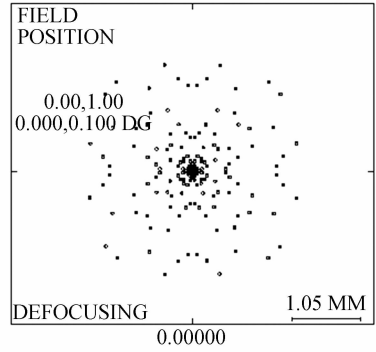


图 8 刀口仪测焦距的示意图

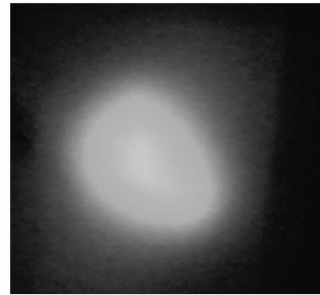
Fig. 8 Principle of focus measured with knife-edge

反射镜中心光斑和数值分析通过 Zernike 多项式拟合后计算得到的点列图,可以看出反射镜聚光明显,计算艾里班直径为 0.45 mm,实测光斑尺寸半径大约为 0.5 mm,在现有的条件下,能够说明测的焦距基本准确。实验最终测得在电压为 10 000 V 时的反射镜焦距大约为 2.1 m。



(a) 计算点列图

(a) Calculation point map



(b) 试验聚焦光斑

(b) Focus facular of test

图 10 反射镜聚焦光斑

Fig. 10 Focus facular of membrane mirror by electrostatic stretching

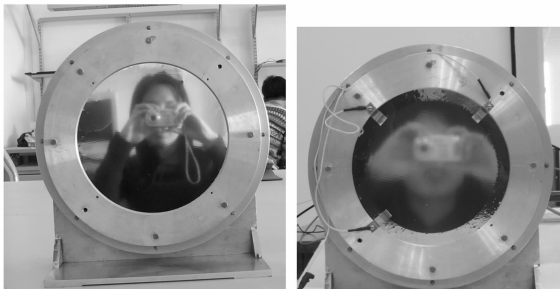


图 9 静电拉伸薄膜反射镜试验通电前后对比

Fig. 9 Comparison of membrane surface with and without electrostatic fields

图 9 是通电前后薄膜反射镜的成像情况,从图 9 中可以看出,通电前薄膜反射镜处于平面状态,为平面反射镜,所成像清晰;通电后,反射镜变形,成像放大且变得模糊,说明薄膜从平面反射镜变为凹面反射镜。图 10 是电压为 10 000 V 时的

## 5 结 论

本文通过单电极控制产生静电力完成了薄膜反射镜的初步拉伸成形实验。分析了静电薄膜反射镜的成形机理,并对静电拉伸成形实验的主要参数进行了计算分析,在此基础上搭建了静电薄膜反射镜拉伸成形实验平台。通过加电前平面反射镜的面形检测和静电拉伸后焦距测量的结果可以看出设计的夹持结构稳定性良好,可满足静电

拉伸试验时薄膜面形保持稳定的要求。在对高压电路系统设计和分析的基础上,完成了薄膜拉伸成型控制系统,在通电达到高压源最大输出10 000 V时,可安全实现静电拉伸薄膜的功能,性能稳定。通过单电极控制成形试验可知,通电前受夹持结构的精度和薄膜材料性能的影响,平面面形的PV值达到 $11.14\lambda$ ,RMS值为 $1.86\lambda$ ,通电后测得拉伸后的薄膜反射镜焦距为2.1 m,并

通过Zernike拟合验证了数据的可靠性。

单电极静电拉伸成形实验证明,用静电力拉伸实现薄膜面形的成形和面形控制方案是可行的,但由于薄膜材料表面精度、主要支承面的面形精度以拉紧结构精度的限制,此次实验得到的薄膜反射镜面形精度还不能达到成像水平。下一步的工作将是通过改善夹持结构精度和选取性能优良的薄膜材料来进一步提高控制面形精度。

## 参考文献:

- [1] JAMES D M, BRIAN P, PAVL A G, *et al.*. Design, test, and evaluation of an electrostatically figured membrane mirror[J]. *SPIE*, 2004, 5166: 188-195.
- [2] SIMONA E, JAMES R P A, BRIAN L S, *et al.*. Stretched membrane with electrostatic curvature (SMEC) mirrors; a new technology for large light-weight space telescopes[J]. *SPIE*, 2002, 4849: 356-364.
- [3] SERGEI A D, MIKHAIL P B, ALEXANDER V G, *et al.*. Electrically controlled preshaped membrane mirror for systems with wavefront correction[J]. *SPIE*, 2003, 5162: 147-156.
- [4] MOORE J D, PATRICK B, GIEROW P A, *et al.*. Design, test, and evaluation of an electrostatically figured membrane mirror [J]. *SPIE*, 2004, 5166: 188-198.
- [5] 孙小伟, 齐迎春, 金光. 静电拉伸薄膜反射镜成形机

理研究[J]. *半导体光电*, 2007, 28(4): 490-493.

SUN X W, QI Y CH, JIN G. Research on shaping stretched membrane with electrostatic curvature mirrors [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2007, 28(4): 490-493. (in Chinese)

- [6] KURCZYNSKI P L, DYSON H M, SADOULET B, *et al.*. Low-voltage 256-electrode membrane mirror system for adaptive optics[J]. *SPIE*, 2004, 5346: 166-174.
- [7] CENTAMORE R M, WIRTH A. High-bias membrane mirror[J]. *SPIE*, 1991, 1543: 128-132.
- [8] ROTGE R, SHIV C D, DAN K M, *et al.*. Progress toward large-aperture membrane mirrors James[J]. *SPIE*, 2000, 4091: 74-82.
- [9] 齐迎春, 金光. 空间薄膜反射镜面形设计及优化[J]. *光学精密工程*, 2007, 15(6): 818-823.
- QI Y CH, JIN G. The design and optimize about the shape of the space membrane mirror[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(6): 818-823. (in Chinese)

## 作者简介:



安源(1980—),男,黑龙江安达人,博士,助理研究员,主要从事空间遥感器的结构及机构设计。E-mail: any@ciomp.ac.cn



金光(1958—),男,吉林长春人,博士生导师,研究员,新技术室主任,主要从事空间遥感器的总体设计。E-mail: jing@ciomp.ac.cn

通讯作者:



齐迎春(1979—),女,博士,讲师,主要研究方向为光机电一体化、机械系统设计及数值模拟与分析。E-mail: qiying-chun0304@tom.com



蒋宁(1973—),女,吉林长春人,工程师,主要从事航空相机及机载平台机械结构研究。E-mail: jiangn73@sina.com



孙小伟(1975—),男,山西宁武人,博士,长春理工大学光电工程学院讲师,主要从事光学结构设计、光电检测、计算机控制、图像处理方面的研究工作。E-mail: sxwlux@163.com



艾晨光(1987—),男,吉林长春人,主要从事机械工程及自动化方面的研究。E-mail: aichenguang@gmail.com

● 下期预告

## 无导轨高精度位移平台的结构设计

高云国<sup>1</sup>,张倩<sup>1,2</sup>,史亚莉<sup>1,2</sup>,姜伟伟<sup>1,2</sup>,彭岩<sup>1,2</sup>

(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)

为了使现阶段在各个机械相关领域中广泛使用的高精度位移平台性能更加完善,位移直线度、定位精度更高,制造成本更低,而研制了高精度无导轨位移平台机构。该机构是根据平行四边形和比例杆运动原理研制出来的,并用自准直平行光管和高精度测量头分别检测平台的位移直线度和平面度。通过各项指标实验结果得出,该机构的位移直线度误差小于 $1''$ ,平面度的误差也可以忽略不计,完全能够达到平台设计要求。此机构完全能达到预先的设计要求,而且安装方便,体积小,养护简便,在有无重力的条件下均能正常使用,既可应用于航天等领域,也可以应用于其它要求的高精度位移系统中。