

文章编号 1004-924X(2009)09-2199-07

无导轨高精度位移平台的结构设计

高云国¹, 张 倩^{1,2}, 史亚莉^{1,2}, 姜伟伟^{1,2}, 彭 岩^{1,2}

(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)

摘要: 为了完善高精度位移平台性能, 提高平台位移直线度和定位精度, 研制了制造成本较低的高精度无导轨位移平台机构。根据平行四边形和比例杆运动原理, 设计了无导轨平台结构。介绍了平台的工作原理, 并对其运动部件进行了有限元分析。用自准直平行光管和高精度测量头分别检测了平台的位移直线度和升、降位移误差, 实验结果得出, 该机构的位移直线度误差小于 1", 升、降位移误差小于 0.02 mm, 达到了平台设计要求。应用结果表明, 该平台安装方便、体积小、易于养护, 在有重力条件下均能正常使用, 可应用于航天或其它领域的高精度位移系统中。

关键词: 导轨; 位移平台; 平行四边形; 比例杆驱动结构

中图分类号: TH12; TH703 **文献标识码:** A

Structure design of precise displacement platform without guiding apparatus

GAO Yun-guo¹, ZHANG Qian^{1,2}, SHI Ya-li^{1,2}, JIANG Wei-wei^{1,2}, PENG Yan^{1,2}

(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*)

Abstract: A new low-cost precise displacement platform without a guiding apparatus was developed to perfect its working performance and to improve the displacement straightness and position accuracy of the system. Based on the theories of parallelogram and proportional lever, the structure of the platform was designed and the work principle was introduced. Then, the movement parts in the platform were analyzed by the Finite Element Method (FEM). Finally, an autocollimator and a high precise measuring head were used in the measurement of the displacement straightness and the error of the lifting displacement, respectively. The experiment results show that the error of the displacement straightness is smaller than 1" and the error of the lifting displacement is less than 0.02 mm, which shows that the structure achieves the design desire completely. The platform in applications is proved that it is easy to install and maintain and can be used in a weightless condition, so it is suitable for the spaceflight fields and other precise displacement systems.

Key words: guide apparatus; displacement platform; parallelogram; proportional lever drive structure

收稿日期: 2008-08-29; 修订日期: 2008-10-10.

基金项目: 中科院长春光学精密机械与物理研究所三期创新工程资助项目 (No. 061X20C060)

1 引言

精密位移和精确定位是现代机械电子设备技术领域的关键技术^[1]之一。精密位移平台多用于高精度仪器的精密对准和精密装调,空间站、载人飞船、航天飞机和遥感卫星等近地轨道航天器一般都配置有多种光学与电子设备,如望远镜,光学干涉仪,各类遥感设备器件以及各类相机和成像光谱仪等。为了获得较好的观察和观测效果,提高遥感器件的成像质量,在航天器总体设计过程中,需要应用具有较高的运动位移分辨率和定位精度的工作平台,同时对环境振动、冲击的隔离和对内部振源的抑制也具有严格的要求;在生物、医学工程的研究中,也需要采用高精度的能做快速运动的微位移工作台对细胞进行搬动、分离、组合,对 DNA 分子进行拉伸并固定到隔膜上,对蛋白质分子进行操作和生成薄膜结构等,由于在一些情况下精密位移平台本身就是高精度仪器中的重要组成部分,所以平台的轻型化和微型化也是必须考虑的内容。因此,在现代高科技迅速发展的今天,在高精度精密仪器领域中的精密位移平台特别受到业内人士的高度重视。

在已有的精密位移平台中,传动机构多为丝杠和导轨传动机构。近年来为提高位移精度,在驱动上使用高精度滚珠丝杠的比率有了很大的提高。由于它们的标准、系列化、通用化程度很高,又有广阔的市场,十分有利于组织专业化大批量生产。随着位移平台速度的提高,滑动导轨的不足逐渐显现出来,包括滑动导轨摩擦力较大,直线度差等。因此,这种平台多用于移动直线度要求较低的场合,导轨的使用也逐渐由滑动向滚动转化。虽然在中国,滑动导轨的使用还占大多数,但使用滚珠导轨和滚柱导轨的平台数量在急速上升。

随着科学的发展和技术的进步,除了机械设备技术领域,还有很多应用领域都对位移平台的位移定位精度提出了更高的要求。如依据半导体加工技术、IC 制芯关键装备(分布光刻机等)、IC 后封装设备等对作业系统高速高精度的实际需求,已开展的宏/微结合双重驱动的高速高精度定

位技术的研究,以及光纤对接、微细加工、微型机器人、自适应光学等领域对精密定位平台的研究等。综上所述,针对高科技领域的精密位移平台,应体现快速位移运动、安装简便、省空间、免维护、环保和成本低等特点。本文应对这些要求,研制了一种采用新机构传动的高精度位移平台,即无导轨位移平台,实现了位移平台的精密直线平移运动。

2 无导轨位移平台的性能要求

本文设计的无导轨位移平台的性能指标如下:

- (1)移动平台的移动距离 $\geq \pm 8$ mm,平台位移最大升、降位移为 ± 0.03 mm,直线度 $\leq 1''$ 。
- (2)移动平台在移动范围内的驱动力为 10~30 N。
- (3)移动平台的移动定位应稳定可靠,驱动分辨率 ≤ 0.0005 mm,定位精度 ≤ 0.002 mm(外加监测仪检测)^[2]。
- (4)移动平台的承载能力 ≥ 1000 g。

3 无导轨平台结构设计

无导轨平台采用双层平行四边形和比例杆驱动结构实现位移平台的精密直线平移运动,以保证安装于位移平台上的功能部件高精度直线运动。无导轨位移平台的结构和工作原理如下。

3.1 平行四杆机构的导向性能

平行四杆结构有良好的导向精度,以柔性铰链代替普通的具有间隙的铰链副来形成柔性平行四杆机构^[3]。柔性平行四杆机构可以通过线切割技术或其它精密加工方法在一块基体材料上加工出圆弧和缝隙,在圆弧切口处形成弹性支点。柔性平行四杆机构具有导向精度高、无间隙、导轨定位分辨率高、加工精度易于保证、柔性铰链本身不需要装配等优点。

如图 1 中(a)图所示,由平面几何基本关系知,平行四杆机构在力 F 作用下,连杆 c 做平行于基线的运动。由于加工误差的存在,杆 a 和杆 b

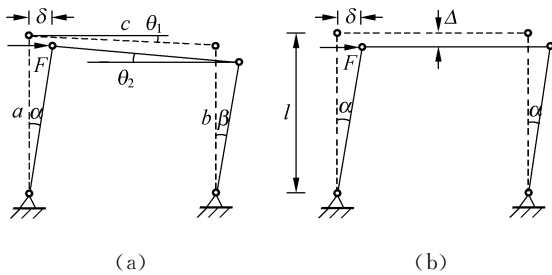


图1 平行四杆机构

Fig. 1 Parallelogram structure

的长度不会完全相等,从而引起连杆 c 在运动中的转角误差 $\Delta\theta$,即:

$$\delta = a \sin \alpha = b \sin \beta,$$

$$\Delta\theta = \theta_1 - \theta_2 = \frac{a - b - (a \cos \alpha - b \cos \beta)}{c} =$$

$$\frac{a - b}{c} \frac{a^2 - b^2}{c(\sqrt{a^2 - \delta^2} + \sqrt{b^2 - \delta^2})},$$

由上述推导可知,杆长加工误差引入的偏转角 $\Delta\theta$ 很小。当 $a = 50.1 \text{ mm}$, $b = 50 \text{ mm}$, $c = 100 \text{ mm}$, $\delta = 5 \text{ mm}$ 时, $\Delta\theta = 5 \times 10^{-6} \text{ rad}$,从而证实了平行四杆结构具有良好的导向性能。

但是当以上参数超出一定范围之后,单个平行四杆机构沿运动方向产生一个位移时,在运动方向的垂直方向上有一个明显的寄生运动。因而,用单个平行四杆机构设计高精度位移机构时,垂直方向的寄生运动将影响它的垂直位置精度。

如图 1(b),设垂直位移量为 Δ ,若: $l = a = b$, $\Delta = l - l \cdot \cos \alpha$,当 $l = 20 \text{ mm}$, $\alpha = 10^\circ$ 时, $\Delta = 0.3 \text{ mm}$ 。

由于平行四杆机构具有上述的缺点,因而在用平行四杆机构设计高精度一维位移机构时,需要获得一种解法,既能利用它的导向性能好的优点,又能避免其受垂直位移影响的缺点。

内外双层的平行四杆结构能很好地解决受垂直位移影响的问题,双层复合的平行四杆机构由于相互之间垂直位移补偿抵消,不会产生明显的寄生运动,很好地解决了这个问题^[4]。

3.2 无导轨平台的结构和工作原理

基于以上原理,设计出的新型无导轨位移平台,其结构与工作原理如下所述。

此高精度无导轨位移平台主要由变形板、移

动平台、基座、比例杆、下驱动板、微分头、拉簧以及其他联接固定构件组成^[5],各零部件的安装位置及相互关系如图 2 所示,微分头固定于驱动支架上,顶块固定于移动平台的台面上,比例杆上球面安装在上衬套的内孔中,可以转动和滑动;比例杆的中球面安装在下驱动板的中间孔内,可以转动和滑动;比例杆的下球面安装在下衬套的内孔中,可以转动和滑动;下衬套与基座是紧配合固定连接的。

这样,在微分头做进给运动时,通过顶块推动移动平台向前移动,移动平台向前移动的同时,带动下衬套和比例杆的上球面一同前移,由于比例杆的下球面中心位置固定不动,使比例杆产生一个绕下球面中心位置的转动,在转动过程中,比例杆的中球面推动下驱动板前移,其移动距离是移动平台移动距离的一半。

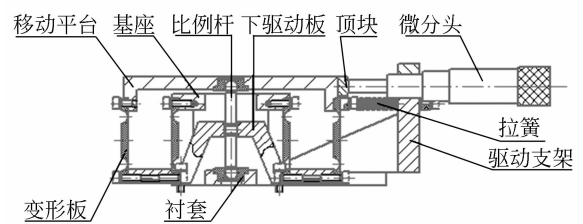


图2 高精度无导轨位移平台的结构

Fig. 2 Structure of high precise displacement platform without guiding apparatus

由于比例杆的 4 个球面中心是严格等距的,从而保证移动平台和下驱动板移动的距离比例始终为 2 : 1 的关系。

当微分头进给运动推动移动平台向前移动时,下驱动板会始终以移动平台一半的距离跟随前移;下驱动板前移过程中,推动内外层 4 个变形板的下端前移,由于内层 2 个变形板的上端固定于基座上不能移动,迫使内层变形板的上、下变形截面变形,使内层变形板的下端向前摆动,内层变形板的下端固连于下驱动板上,这样,下驱动板前移的同时,由于内层变形板的带动,下驱动板会产生小量的向上平移;因移动平台和下驱动板移动的距离比例始终为 2 : 1,在移动过程中,下驱动板相对于移动平台也前移了 1/2 距离,由于外层两个变形板上端固定于移动平台,下端固定于下

驱动板上,这样,由于移动平台相对于下驱动板的前移,迫使外层变形板的上、下变形截面变形,使外层变形板的上端向前摆动,由于外层变形板的带动,移动平台会产生小量的向下平移;因外层变形板与内层变形板等长,移动平台相对于下驱动板的移动距离与下驱动板相对于基座的移动距离相等,所以,下驱动板产生的小量向上平移和移动平台产生的小量向下平移距离相等,相互抵消;由基座、内层变形板和下驱动板组成内平行四边形结构,由下驱动板、外层变形板和移动平台组成外平行四边形结构,两组平行四边形组合结构保证移动平台在运动过程中只有前后的直线平移运动,不产生高低移动。

拉簧通过拉簧两侧的弹簧固定板,驱动支架和移动平台,始终拉紧微分头和顶块,使微分头的驱动端与顶块的右面始终紧密接触,保证移动平台由微分头驱动前后移动时不产生回差。从而实现移动平台上的功能器件的高精度直线运动和精密定位。

3.3 运动部件的有限元分析

在此无导轨位移平台机构中,支撑和负责移动平台前后位移的最主要的运动部件是变形板,如图 3 所示,下面对变形板进行有限元分析。

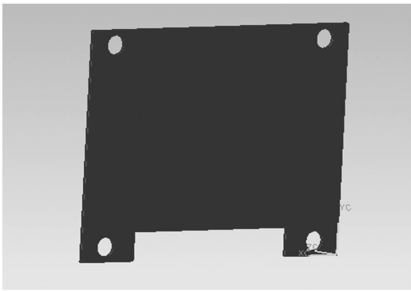


图 3 变形板立体图

Fig. 3 Solid picture of elastic board

在对固定组件进行有限元建模时,对影响不大的螺纹孔和倒角进行了简化,设定边界条件时,对固定端和基座连接的螺钉上节点的自由度进行了限定。变形板的尺寸和材料属性如下:尺寸为 $50 \text{ mm} \times 39.5 \text{ mm} \times 0.5 \text{ mm}$;材料为 65Mn;密度 $\rho = 7.8 \times 10^{-9} \text{ t/mm}^3$;弹性模量 $E = 2.1 \times 10^5 \text{ MPa}$;泊松比 $\mu = 0.3$;抗拉强度 $\sigma_b = 630 \text{ MPa}$ [6]。

当变形板顶端在 -Z 轴方向受力 2 N 时的最大变形位移如图 4 所示。



图 4 变形板受力 2 N 时的最大位移云图

Fig. 4 Max displacement picture of elastic board received 2 N

分析结果表明,当变形板顶端受力 2 N 时的最大位移为 5.12 mm,通过剩余的变形板、拉簧以及其他支撑位移部件在位移时所需的驱动力之和的计算 [7] 可以看出,采用此尺寸和材料的变形板符合驱动力为 10~30 N 的要求。

4 实验及结果

4.1 对平台直线度的实验及结果

因为此位移平台为一维运动平台,所以平台运动的直线度直接影响平台的工作精度,故直线度是此位移平台应具备的最基本精度。对于该位移平台的直线度的实验采用自准直平行光管进行测量,将自准直光管对准平台的位移轴,利用固定于平台台面上的棱镜的反射光随平台的位移产生的偏角来观察平台在位移过程中的直线度,如图 5 所示。

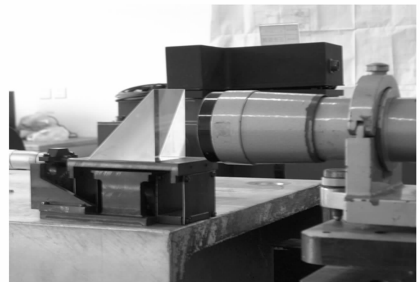


图 5 平台直线度实验

Fig. 5 Experiment of straightness measurement of platform

所得数据如表 1 所示:

表 1 平台在位移过程的直线度

Tab.1 Straightness of platform in displacement processing

位移(mm)	读数	位移(mm)	读数
0	6'30"	3.0	6'29.7"
0.5	6'29.8"	3.5	6'30.2"
1.0	6'30.1"	4.0	6'29.6"
1.5	6'30.2"	4.5	6'29.7"
2.0	6'29.9"	5.0	6'29.5"
2.5	6'29.6"		

其中最大读数为 6' 30. 2", 最小读数为 6'29.5", 差值为 0.7", 满足直线度不超过 1" 的设计要求。所产生的误差是由于装配时四个变形板没有严格等长, 使得平台的位移运动不是严格直线, 但是此误差值 0.7" 是在设计误差范围之内, 故此平台的位移直线度满足设计要求。

3.2 对平台升、降位移的检测结果

除了平台的位移直线度之外, 平台位移时的

升、降位移也是另一个重要的指标, 对于这个指标的检验即是对平台的台面在运动中的升降进行测量。将高精度测量头放置于位移平台的台面上, 在平台移动到不同位置时, 用测量头沿平台行进轴向在台面上任意划一直线, 通过在直线上取得数值的最大差值判断平台的升、降位移, 示意图如图 6 所示。

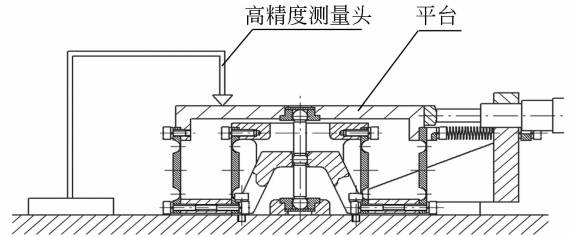


图 6 平台升降位移实验示意图

Fig. 6 Experiment of lifting displacement of platform

为了观测方便, 在测量头沿平台行进轴向在平台台面上划的任意直线上任取几点, 记录了平台在不同位移位置时的数值, 如表 2 所示:

表 2 平台在不同位移位置时的测量数值

Tab. 2 Measured data of platform at different displacements

位移(mm)	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
1	0.113 0	0.113 0	0.113 1	0.113 2	0.112 5	0.107 2	0.091 9	0.084 1	0.077 2
2	0.193 1	0.193 7	0.194 4	0.194 6	0.193 9	0.191 9	0.191 5	0.190 2	0.187 1
3	0.288 6	0.293 0	0.293 1	0.294 0	0.293 2	0.290 2	0.290 0	0.288 2	0.285 1
4	0.376 9	0.378 1	0.379 5	0.380 0	0.378 0	0.378 2	0.378 1	0.377 5	0.377 1
5	0.450 8	0.451 1	0.451 7	0.453 1	0.452 2	0.452 1	0.452 0	0.451 8	0.450 8
6	0.542 0	0.542 5	0.543 0	0.544 1	0.543 6	0.543 5	0.543 0	0.542 1	0.542 0
7	0.605 2	0.605 6	0.606 0	0.608 5	0.608 0	0.607 8	0.607 2	0.606 5	0.605 8

为了方便观察, 绘制坐标图如下所示:

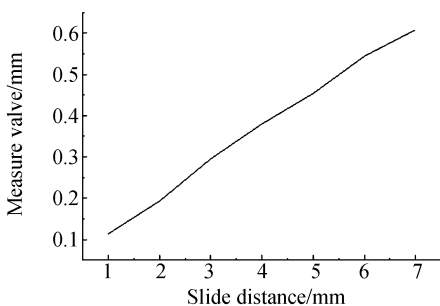


图 7 平台在原点位置时任意划一直线的测量值曲线

Fig. 7 Measured curve of a line when platform is on origin

图 7 为移动平台在原点位置时在台面上任划的一条直线上的几点绘成的曲线, 可以看出此条曲线可近似看作为一条有倾角的直线, 其中, 倾角是由于位移平台本身的加工和装配引起的误差, 由此可以推出, 如果平台在其他位移位置时按同样原理绘制出的曲线与图 7 的直线倾角近似, 且最大相对差值小于 0.03 m 的话, 则可以认为位移平台台面的升、降位移是符合设计要求的。

图 8 是位移平台分别在 -1, -3, 3, 5 mm 以及原点位置时移动, 高精度测量头测量位移量, 绘制的曲线, 可以看出几条曲线是基本重合的, 其中, 表中几条曲线在同一测量点的差值既是平台

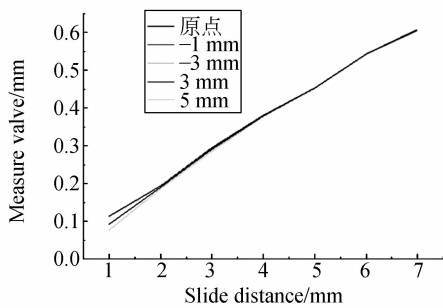


图 8 平台在不同位置时对同一直线的测量值曲线

Fig. 8 Measured curves of line when platform is at different positions

升、降误差,但其中包括台面在加工时产生的平面度误差以及 4 个变形板在位移过程中受力不均导致的台面产生一定程度的失稳,由图表可以看出,

参考文献:

- [1] 李耀斌. 微型机械运动参数测试中弱小信号的提取[J]. 光学精密工程, 1996, 4(3): 46-51.
LI Y B. Drawing to faint revolve signal in instrument for measuring dynamics of micromechanism [J]. *Opt. Precision Eng.*, 1996, 4(3): 46-51. (in Chinese)
- [2] 成大先. 机械设计手册[M]. 7 版. 北京: 化学工业出版社, 2002.
CHENG D X. *Machine Design Manual* [M]. 7th ed. Beijing: Chemistry Industry Press, 2002. (in Chinese)
- [3] 黄金永. 空间用精密微位移平台的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2004.
HUANG J Y. *Study on the Space Micro-Displacement Platform* [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2004. (in Chinese)
- [4] 王会, 伊连云, 孙如军. 平面连杆机构的计算机辅助设计系统研究与实现[J]. 四川理工学院学报(自然科学版), 2005(12): 39-42.
WANG H, YI L Y, SUN R J. Study and reality of

曲线之间产生的误差 < 0.02 mm, 故认为平台在位移过程中的升、降位移可以满足设计要求。

4 结 论

本文设计了一种高精度无导轨位移平台机构, 理论分析认为, 该平台工作可靠, 结构设计巧妙、紧凑, 较好地解决了目前在高精度位移平台领域中平台制造成本高、安装调试难度大等问题, 能够满足高精度仪器的使用要求, 而且无导轨位移平台在能达到高精度位移的基础上还具有成本低廉、结构简单、轻便、体积小、养护简便、不需润滑等优点, 特别适用于航空、航天的真空、高温、低温的特殊环境中。

- the planar linkage mechanism's CAD system [J]. *Journal of Sichuan University of Science & Engineering (Natural Science Edition)*, 2005(12): 39-42. (in Chinese)
- [5] 吉爱红, 汪炜, 陆俊华. 三坐标精密移动平台的研制[J]. 机械, 2004, 31-10: 54-55.
JI A H, WANG W, LU J. Development of 3D precise mobile platform [J]. *Machinery*, 2004, 31-10: 54-55. (in Chinese)
- [6] 易声耀, 潘存云. 一种新型移动平台动力学仿真与试验研究[J]. 机械设计与研究, 2007(4): 55-59.
YI SH Y, PAN C Y. Research on dynamics simulation and experiment of a new-style mobile platform [J]. *Machine Design and Research*, 2007(4): 55-59. (in Chinese)
- [7] 易声耀, 潘存云. 一种新型移动平台的传动系统设计与分析[J]. 机械设计, 2007(5): 21-25.
YI SH Y, PAN C Y. Design and analysis on the transmission system of a kind of novel moving platform [J]. *Journal of Machine Design*, 2007(5): 21-25. (in Chinese)

作者简介:



高云国(1955—)男,山东乳山人,研究员,博士生导师,主要从事光电仪器总体设计方面的研究。E-mail: gaoyunguo@163.com



史亚莉(1982—),女,山西运城人,硕士研究生,主要从事车载激光对抗系统光束监测与检测装调研究。E-mail: shiyali_825@126.com



张倩(1983—),女,河北任丘人,硕士研究生,主要从事光学仪器结构设计研究。E-mail: zhangqianzhacai@163.com



姜伟伟(1984—),男,山东济宁人,硕士研究生,主要从事光学仪器结构设计研究。E-mail: jdw094698@163.com

彭岩(1982—),女,黑龙江虎林人,硕士研究生,主要从事光学遥感器研究。E-mail: pengyan-163@126.com

●下期预告

不同入射角激光束在大芯径 SI-PDF 光纤中的损耗特性

张美,魏福利,邱孟通,王奎禄,王培伟,盛亮,彭博栋
(西北核技术研究所,陕西 西安 710024)

为得到 SI-PDF 光纤中漏泄模式光线功率的传输特性,应用光线投影积分法,推导了不同入射角的激光束与大芯径 SI-PDF 光纤的传输功率计算公式,对不同入射角激光束照射下 3、67、140 m SI-PDF 光纤的输出功率特性进行了理论和实验研究,用最小二乘法原理对对数坐标下的实验数据进行拟合,给出了损耗系数。结果表明:入射角在 $0\sim 12^\circ$ 内,不同入射角功率输出和损耗系数近似一常量,其中损耗系数约 13 dB/km;在大于 12° 外,不同入射角功率随入射角增加成指数衰减规律,其损耗系数随入射角增大而增大,在 12° 时损耗系数值为 26 dB/km,在 24° 时达到了 82 dB/km。