

文章编号:1004-4213(2010)12-2139-4

# 45°倾斜镜多自由度精调结构设计研究\*

张丽敏, 吴元昊

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033)

**摘 要:**对于高准确度光学系统,光学元件及其支撑机构之间的简单连接很难使光路对准并满足公差要求,本文介绍了一种在光学系统中能够对光路进行折转或分束的 45°倾斜镜的精调支撑机构.该倾斜镜支撑结构采用了多自由度精调方式,能够在实现两维倾斜调整的同时,实现相互垂直光路的方向平移.设计中使用的柔性元件使结构的倾斜调整准确度达到角秒级,实现 0~10 mm 的位移,同时借鉴现有的燕尾槽导轨平移技术节省加工成本和减小周期,并且借助有限元分析软件,对机构中的关键部分进行了详尽的分析和论证.整个研究方法可作为同类光机系统设计时的参考,在光学系统的光路调整中有较大的应用价值.

**关键词:**45°倾斜镜;多自由度微调;柔性元件;燕尾槽导轨

**中图分类号:**TH122

**文献标识码:**A

**doi:**10.3788/gzxb20103912.2139

## 0 引言

在光学系统中,经常使用 45°倾斜镜对光路进行折转或分束,如在望远镜中的 coude 光路系统中采用 2 个或多个 45°倾斜镜折转光路.在简单光路中,为了使装配出的产品性能最优化,设计时应当让机械零件和光学元件之间的调整环节最少.但对于复杂光学系统,机械零件和光学元件之间的简单连接很难使光路对准并满足公差要求,或者对机械加工和装调的要求相当苛刻.因此在满足光学设计要求的条件下,可以调整增加机械结构的复杂性,使光学元件可以微量调整,以便于装调和有效的光路对准<sup>[1]</sup>.为了保证光路的稳定性,反射镜的支撑结构需要具有较高的一阶谐振频率.因此,设计者即需要控制支撑结构的准确度,同时又需要满足刚度设计要求<sup>[2]</sup>.本文着重从结构方面对 45°倾斜镜支撑结构进行研究和分析.

## 1 精调结构分析

在诸多应用中,精密调整是一个基本且极其重要的技术,为了使结果最优,需要将精调结构、应用参量和需求性能协调匹配.本文设计多自由度(Degree Of Freedom, DOF)精调机构在实现两维倾斜调整的同时,可以在相互垂直的光路方向平移,即可以在 X、Y、 $\alpha$  和  $\beta$  4 个自由度微调,如图 1.所以在完成反射镜的装卡后,其支撑结构应由即两维倾斜调整机构和两维平移机构组成.

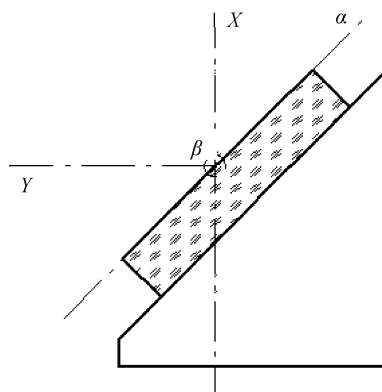


图 1 调整自由度方向示意图

Fig. 1 Sketch of orientation of tuning DOF

### 1.1 两维倾斜机构选择

两维倾斜调整机构可分为串联和并联两类,各有优缺点.此处采用并联结构,从而使结构简化,而且在反射镜尺寸稍大的情况下由此带来的边界效应可以通过两维平移消除.

一般地,获得优于 0.1  $\mu\text{m}$  的运动准确度是比较困难的.然而使用柔性单元,运动准确度可以提高.柔性单元是依靠材料自身的弹性实现其功能的结构.在精密机械设计中,主要考虑使用柔性单元作为约束单元,把柔性单元特定设计为一个弹簧集合就可以实现其约束的功能,利用机械原理可以决定柔性结构的力-位移特性.柔性单元由于分子之间的变形实现其运动,所以其两个主要特性是:运动平滑和运动范围小.此外,柔性元件可以消除由温度应力和装配应力产生的过约束和弹性不定位的矛盾<sup>[3]</sup>.

另一种精调机构为半运动机构.根据接触点的数量等于被约束自由度的数量,运动约束包括两部分:其中一种可能的运动约束是:一个零件上有 3 个

\* 中国科学院三期创新项目

Tel:0431-86708873

Email:zhangtqx@163.com

收稿日期:2010-08-10

修回日期:2010-09-29

V型槽,另一个上有3个球/球的一部分.每个球与V型槽有2个接触点,这样设计可以使系统中包含相似的零件,因此具有热稳定性,如果施加预载荷可以获得高刚度.而且因为连接具有对称性,在垂直方向向中心施加载荷,各接触点具有相同的变形.另一种采用V型槽-圆锥-平面的基本结构形式,圆锥结构可为角度调节提供自然的支点,对于上端倾斜的支承结构非常适用.将圆锥块和V型槽设计在镜框的侧上方,承受大部分的重力载荷,还可以增加球头轴.此结构实际只有3个可移动的球头完成定位调整功能,第4个支承平面块的可移动球头起辅助支撑作用,为反射镜框提供平衡对称的支撑力,并且过约束可提高结构的刚性<sup>[4]</sup>.

### 1.2 平移机构选择

平移机构一般由工作台滑板、直线移动导轨、传动机构、驱动组成,需要时可以增加位移传感器.导轨有多种形式,按摩擦方式来划分有滑动摩擦导轨(如燕尾导轨)和滚珠/滚柱导轨(如交叉滚柱导轨)两种.根据导轨的不同结构,使用场合也不同.在选择平移导轨时需将准确度要求和环境统一考虑.在本设计中使用燕尾导轨,在现代加工技术条件下,导轨的准确度已经不是问题,而且结构空间灵活.燕尾导轨可以任意方向承载,结构简单、刚度高,适合于光路调整结构.

## 2 精调机构设计

### 2.1 2维倾斜结构设计

本文设计倾斜调整机构采用柔性元件通过转动丝杠实现倾斜功能.该机构由3点支撑,其中1个固定单元、两副螺母/丝杠,通过螺母/丝杠的推拉实现上下两平台间2维倾斜运动.3点沿光学元件法向分布如图2,其中A点为固定点,B点和C点为丝杠所在支撑点.

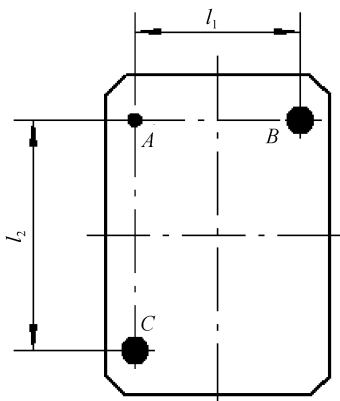


图2 3点支撑分布  
Fig.2 Layout of 3-point support

倾斜所带来的横向位移即弹性元件所需的变形

为:沿AC轴倾斜 $\alpha$ 时, $\Delta S_B = l_1(1 - \cos(\alpha))$ ;沿AB轴倾斜 $\beta$ 时, $\Delta S_C = l_2(1 - \cos(\beta))$ .

单悬臂梁端部在外力的作用下,梁端部既产生挠度又产生转角,而且抗扭能力差,所以采用如图3所示的固定复式片弹簧结构(梁自由端上下梁通过中间垫块固结).梁端部在小挠度下将近似产生平动,并且抗扭刚度显著大幅度提高.根据计算的变形量确定柔性元件的结构尺寸,柔性元件在受载时,自由端的挠度为<sup>[5]</sup>

$$f = Fl^3 / 12EI = Fl^3 / Ebh^3$$

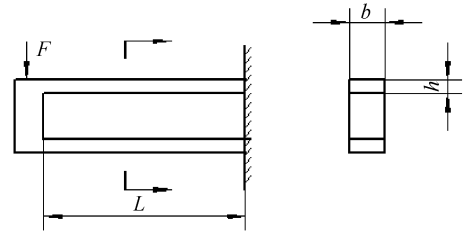


图3 复式片弹簧  
Fig.3 Double-sheet spring

计算柔性元件的外形尺寸时还有一个约束条件就是结构的谐振频率,即刚度问题.在满足调整角度和准确度的条件下,结构的谐振要尽可能的高.

手动丝杠调整一般分为:手旋螺杆、标准测微头和差动测微头.它们的分辨率由螺纹质量、有效螺距和调节旋钮的大小决定,其中螺距越小分辨率越高,旋钮越大分辨率越高.如果手旋螺杆螺纹质量好,分辨率可达几个微米,但重复性较差.标准测微头将内螺纹与外刻度集为一体,可以提供精确的位置且重复性好,分辨率和重复性小于 $1\ \mu\text{m}$ .差动测微头的分辨率小于 $50\ \text{nm}$ ,重复性小于 $1\ \mu\text{m}$ <sup>[6]</sup>.2维倾斜结构装配图如图4.

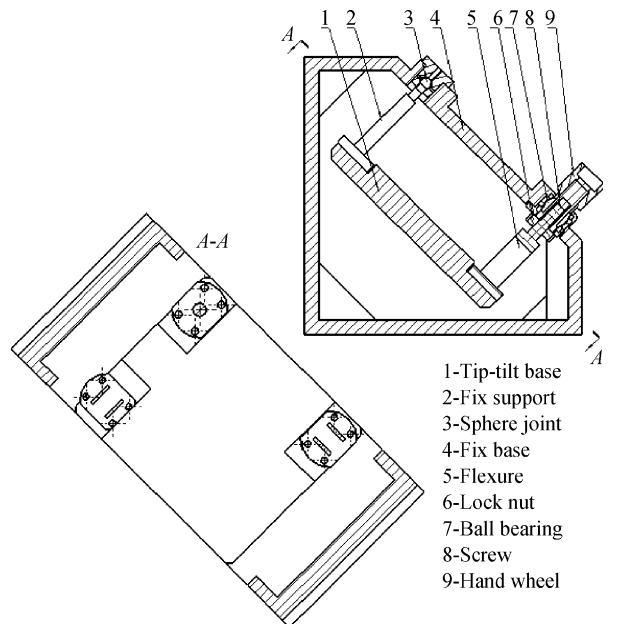


图4 倾斜调整装配图  
Fig.4 Assembly of tilt tuning

### 2.2 平移结构设计

使用平移结构主要有两个原因:一个是弥补非对称中心倾斜带来的光路偏移,另一个是方便整个光学系统的调整. 平移导轨形式多样,燕尾槽导轨副是常见的形式之一. 在设计时需要特别仔细分析设计误差和加工误差等误差因素,此外也需要考虑导轨副的可调整环节,从而可以适当的降低加工要求,节约成本.

在调整组件与燕尾导轨副之间设置了柔性连接环节,允许驱动丝杠和调整组件之间存在微小的角度和位置偏差. 这样即可以保证调整准确度,同时也降低了加工要求.

当调整光学元件达到要求的位置时,需要对其进行锁定以保证光路的稳定.

2 维垂直平移结构装配图如图 5.

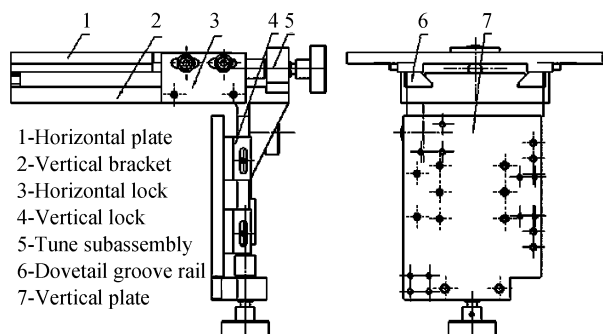


图 5 平移调整装配图  
Fig. 5 Assembly of translation tuning

### 3 优化分析

#### 3.1 弹性元件参量优化

对单个弹性元件模型进行分析,约束条件是满足变形要求,谐振频率高,根据具体结构,对参量  $L$  和  $h$  进行优化. 图 6 为单位作用力下,  $L=20$  mm,  $b=10$  mm,  $h=1.5$  mm 时的变形云图.

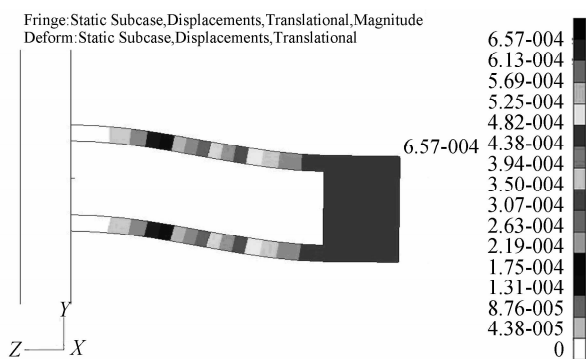


图 6 弹性元件变形云图  
Fig. 6 Flexure element deformation nephogram

当  $b$  不变,不同  $L$  系列,取不同  $h$  时的最大变形值曲线和谐振频率如图 7(a)和(b).

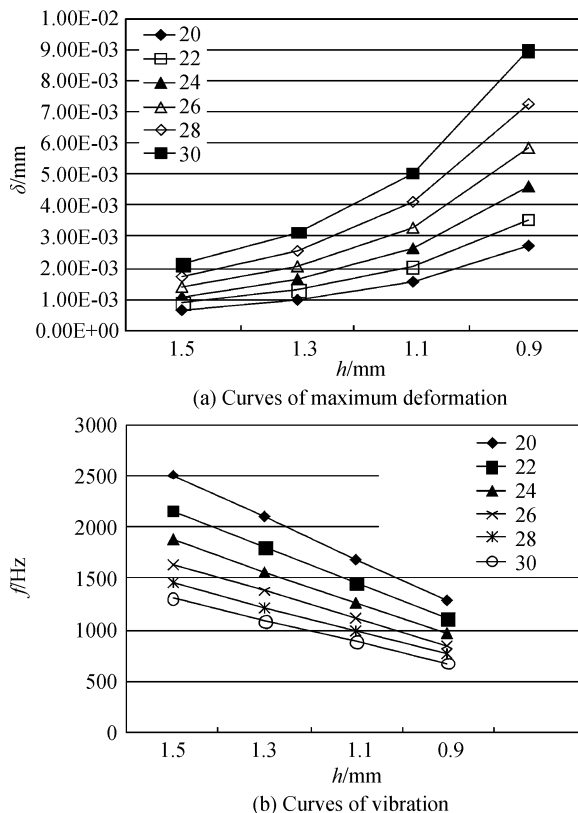


图 7 最大变形和谐振频率变化趋势  
Fig. 7 Direction of maximum deformation and vibration for series  $L$  of different  $h$

由图 7 可见,随着  $h$  的减小,弹性元件的变形急剧增大,这与理论计算中的挠度  $f \propto h^3$  相吻合;而谐振频率随着  $h$  的减小,呈线性减小. 在整个倾斜调整结构中,两个弹性元件为并联关系,所以取  $L=28$ ,  $h=0.9$  可以满足  $\pm 1^\circ$  的调整范围,准确度达到角秒级,而且可以满足结构的刚度要求.

#### 3.2 谐振频率计算

谐振频率是由结构的材料、形状及尺寸等因素决定的. 刚性越差,结构的谐振频率越低,反之亦然. 在理论计算中,必须对结构进行简化,否则无法建立理论模型,这样必然造成计算结果与实测存在一定的偏差. 利用有限元法对结构进行分析,建立精确的结构模型,计算结果相对更加准确.

根据实际状态约束 2 维倾斜调整结构,计算其谐振频率,前 3 阶谐振频率分别为 1 354. 4 Hz、1 782. 2 Hz和 4 464. 4 Hz,其中一阶振型云图见图 8.

对于相互垂直的平移台结构,垂直支架是整个结构的基础,因此对它的刚度要求比较高. 而由于它是悬臂支撑方式,所以需要在悬臂支撑位置进行优化设计以提高其刚度. 通过在悬臂相交位置设置加强筋,并对其外形尺寸进行了反复优化,使其谐振频率达到 374. 68 Hz,变形云图如图 9.

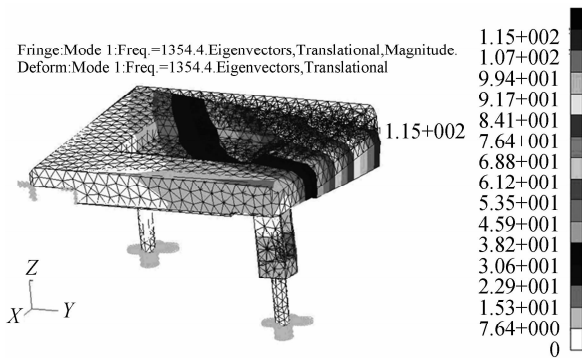


图8 一阶振型云图

Fig. 8 Nephogram of first order vibration model

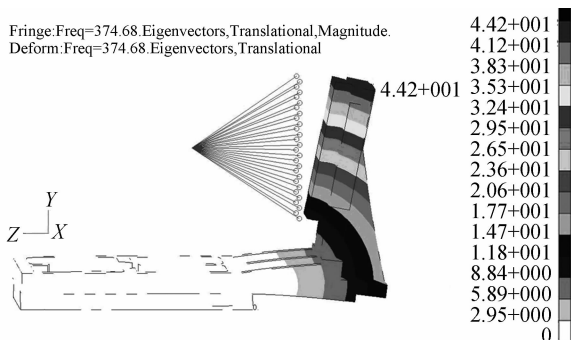


图9 垂直支架振型云图

Fig. 9 Vibration model of perpendicular support

## 4 结论

1) 设计了一套可以实现4个自由度精调的平台, 倾斜调整准确度达到角秒级, 并对常用调整结构形式进行了分析。

2) 对倾斜精调结构中的弹性元件进行了理论分析、仿真和优化, 使其满足准确度和刚度要求。

3) 借助有限元分析软件对设计的各精调结构的模态仿真分析, 结果表明满足正常使用要求。

该结构与全约束传统结构相比, 满足一般功能要求, 准确度高, 在装调和使用方面均具有突出的便捷性, 整个设计方法可作为同类产品的设计参考。

### 参考文献

- [1] YODER P R Jr. 光机系统设计[M]. 周海亮, 程云芳, 译. 3版. 北京: 机械工业出版社, 2008.
- [2] WANG Hong-wei, RUAN Ping, XU Guang-zhou, *et al.* Design and research of rip/tilt mirror in a space telescope correlation tracking system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(9): 2368-2371.  
王宏伟, 阮萍, 徐广州, 等. 某空间望远镜相关跟踪系统摆镜的设计与研究[J]. 光子学报, 2009, **38**(9): 2368-2371.
- [3] FU Liang-liang, HE Xin, LIAN Feng-hui. Design and analysis of minitype reflected mirror supporting structure project[J]. *Optical Technique*, 2008, **34**(4): 531-534.  
付亮亮, 何欣, 廉凤慧. 小型反射镜支撑方案的设计与分析[J]. 光学技术, 2008, **34**(4): 531-534.
- [4] FU Xue-nong, CHEN Xiao-juan, WU Wen-kai, *et al.* Design of large aperture mirror support and its stability[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, **16**(2): 179-183.  
傅学农, 陈晓娟, 吴文凯, 等. 大口径反射镜组件设计及稳定性研究[J]. 光学精密工程, 2008, **16**(2): 179: 183.
- [5] 张英会, 刘辉航, 王德成. 弹簧手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008.
- [6] SEBASTIAN R. Successful positioning requires an understanding of positioner limitations, along with the requirements and constraints of the application [J/OL]. *Oemagazine*, 2004-04-31 [2010-03-15]. <http://spie.org/x17134.xml?ArticleID=x17134>.

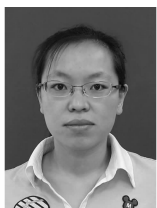
## Design of Multiple DOF Fine Tuning Mechanism for 45° Tilting Mirror

ZHANG Li-min, WU Yuan-hao

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

**Abstract:** Aiming at overcoming difficulties in requirements satisfaction of the tolerance by simple connecting the optical components with their mechanical supports in the accurate-fine optical system, which means it will cost extremely expectation to the accuracy of mechanical process and adjustments, a fine tuning supporting mechanism to the 45° tilting mirror which can split or deflect the beam in optical system is presented. By employing multiple DOF tuning mechanism, it can set the 2-D tilt and take displacements in the direction normal to beam path at the same time. Flexible element is designed to improve the adjusting accuracy to the magnitude of second. Dovetail groove rail displacement technique is considered to save the cost of fund and time in machining process, and its displacement rang is 0~10 mm. Detailed analysis and discussions are presented in the key part of the mechanism by finite element analysis software. The whole research technique can be a fine reference to the optic-mechanical system of the same kinds and has great application value in beam setting of optical system.

**Key words:** 45° tilting mirror; Multiple Degree Of Freedom (DOF) tuning; Flexible element; Dovetail groove rail



**ZHANG Li-min** was born in 1981. She received her Ph. D. degree from the Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences in 2008. Now she is an assistant professor and her research interests focus on fine mechanics design about optical system.