

文章编号 1004-924X(2008)02-0179-05

大口径反射镜组件设计及稳定性研究

傅学农,陈晓娟,吴文凯,徐元利

(中国工程物理研究院 总体工程研究所,四川 绵阳 621900)

摘要:针对惯性约束聚变(ICF)装置中使用数量较多的大口径反射镜组件结构,在满足物理功能要求的前提下,根据其稳定性及定位、安装、调整和变形等要求,运用运动学原理及模块化设计思想,设计了一个典型的反射镜组件结构,并对组件结构进行了力学分析及实验。计算和实验结果表明,该组件满足稳定性要求,其定位和重复定位精度 $<10 \mu\text{rad}$,安装调整方便可靠,满足设计要求。

关键词:惯性约束聚变(ICF);大口径反射镜支承;运动学支承;稳定性

中图分类号:TL632;TH703 **文献标识码:**A

Design of large aperture mirror support and its stability

FU Xue-nong, CHEN Xiao-juan, WU Wen-kai, XU Yuan-li

(*Institute of System Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China*)

Abstract: On basis of the schemes of adjustable kinematic mounts and integrative design, a large aperture mirror support for the target area of Inertial Confinement Fusion(ICF) facility was analyzed to solve some problems on stability, exact constrain, fast installation and easy adjustment. Then the structure characteristic and mechanical analysis were introduced, and the experiment of sample confirms feasibility of the design. Analysis and experimental results indicate that the sample satisfies the requirement for system's stability, the accuracy of orientation and relocation of the mount is less than $10 \mu\text{rad}$.

Key words: Inertial Confinement Fusion(ICF); large aperture mirror support; kinematic mount; stability

1 引言

用于高能量密度物理实验的惯性约束聚变(ICF)装置的高精度大口径反射镜主要完成激光束的引导和传输,其数量众多,安装复杂,反射镜及镜架组件结构的稳定性直接影响最终的打靶精

度,一般对反射镜组件结构稳定性的要求是保证所有激励源引起的反射镜片漂移的均方根值 $<0.6 \mu\text{rad}$ (重点考虑旋转量)。同时,为了控制光学系统中光束的波前质量,对厚重的大口径反射镜片的面变形要求严格,不仅加工苛刻,还要求由重力和装夹应力引起的反射波前畸变误差 $<\lambda/3$ ($\lambda=632.8 \text{ nm}$),整个激光装置的内部洁净

度为百级,在维修更换反射镜时要求速度快并且保证复位后的定位精度,而重复定位精度需 $<20 \mu\text{rad}$ 。本文采用模块化方法,缩短更换镜片时间,并且依据精确定位原理,设计了运动学支承结构,从而可同时保证反射镜片的精确定位和准确复位。反射镜需保证二维正交手动调节,要求调整精度 $<30''$,二维正交性 $<10''$ 。

2 结构设计

整个支承结构由反射镜框组件、运动学定位调整支承、反射镜架和密封罩等组成(见图 1)。反射镜架为不锈钢型材焊接刚架,镜架上焊有出入光管道接口;密封罩与镜架通过快速联接件连接,与管道一起构成光束传输的密闭通道。

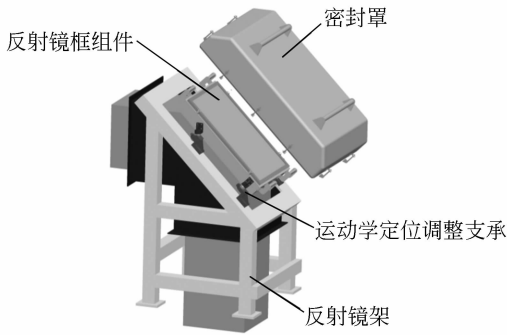


图 1 反射镜架结构

Fig. 1 Structure of mirror support

2.1 可调整运动学支承结构

整个结构的设计关键之一是运动学定位调整支承,运动学支承的设计原理源于精确约束理论,即为了准确定位两个物体,需要约束 6 个相关的自由度,因此两个物体间要求 6 点接触以限制要约束的 6 个自由度。运动学支承通过两物体间 6

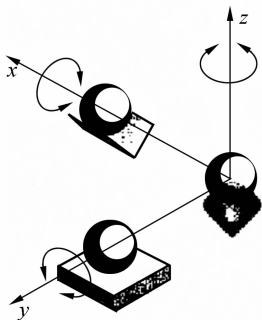


图 2 运动学支承原理图

Fig. 2 Principle drawing of kinematic mounts

个接触区域实现刚性和可重复定位,其原理如图 2 所示。上侧物体与 3 个定位球相连,下侧物体与圆锥、V 型槽和平面块相连。圆锥块约束上侧物体的 3 个平移自由度(沿 x 、 y 、 z 轴),V 型槽(V 型块对称中心面与圆锥轴线共面)约束上侧物体的两个转动自由度(绕 y 、 z 轴),平面块约束绕 x 轴的转动,这样上侧物体的 6 个自由度就被精确约束了。

2.1.1 定位精度分析

在定位精度分析中假设接触物体是刚性的,弹性变形仅发生在接触区域,另外不考虑接触点摩擦力的影响,分析过程见图 3。可以利用结构的几何关系矩阵来分析运动学支承的定位精度。分析的 3 个步骤为:接触力的确定,接触点变形计算,总体定位误差的确定。

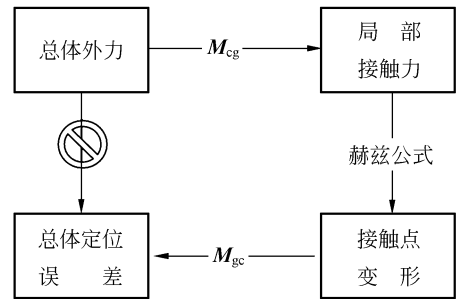


图 3 分析过程框图

Fig. 3 Block diagram of analysis process

首先,根据结构的坐标系列出力平衡和力矩平衡方程:

$$\left. \begin{aligned} \sum_{i=1}^6 \mathbf{F}_i &= \sum_{i=1}^6 \mathbf{n}_i f_i = \mathbf{F}_a \\ \sum_{i=1}^6 \mathbf{r}_i \times \mathbf{F}_i &= \sum_{i=1}^6 \mathbf{r}_i \times \mathbf{n}_i f_i = \mathbf{T}_a \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

式中: \mathbf{F}_i —接触点接触力的矢量;

\mathbf{n}_i —接触力的方向向量;

f_i —接触力的幅值;

\mathbf{F}_a —外力;

\mathbf{r}_i —接触力施力点力矩臂;

\mathbf{T}_a —外力矩。

公式(1)合并简化可得:

$$\mathbf{S}\mathbf{F}_c = \mathbf{F}_g, \quad (2)$$

式中: \mathbf{S} —结构几何关系矩阵;

\mathbf{F}_c —各接触点接触力矩阵;

\mathbf{F}_g —外力和外力矩矩阵。

作为精确约束的系统 ($n=6-d$),矩阵为方

阵,接触力可由下式得出:

$$\mathbf{F}_c = \mathbf{S}^{-1} \mathbf{F}_g = \mathbf{M}_{cg} \mathbf{F}_g, \quad (3)$$

式中: \mathbf{M}_{cg} 为从“总体”坐标到“局部”坐标的转换矩阵。

接触点变形即两物体接触表面最大应力和接触后相对位移由赫兹公式得到。

总体定位误差可以根据能量守恒定律系统的弹性势能的增量等于外力做功得到:

$$W = \frac{1}{2} \boldsymbol{\delta}_c^T \mathbf{F}_c = \frac{1}{2} \boldsymbol{\delta}_g^T \mathbf{F}_g, \quad (4)$$

式中: \mathbf{F}_c —接触力;

$\boldsymbol{\delta}_c$ —接触变形;

\mathbf{F}_g —施加的外力;

$\boldsymbol{\delta}_g$ —总体定位误差。

设定总体定位误差为:

$$\boldsymbol{\delta}_g = \begin{pmatrix} \boldsymbol{\delta} \\ \boldsymbol{\varepsilon} \end{pmatrix}, \quad (5)$$

式中: $\boldsymbol{\delta}$ —为平移误差;

$\boldsymbol{\varepsilon}$ —为旋转误差。

合并公式(3)和公式(4)可得到总体定位误差

$\boldsymbol{\delta}_g$:

$$\boldsymbol{\delta}_g = \mathbf{M}_{cg}^T \boldsymbol{\delta}_c = \mathbf{M}_{gc} \boldsymbol{\delta}_c, \quad (6)$$

式中: \mathbf{M}_{gc} 为从“局部”坐标到“总体”坐标的转换矩阵。

根据以上公式得到运动学支承结构的定位精度可达到 μm 级,根据参考文献[1]经实验验证转角的重定位精度约为 $10 \mu\text{rad}$,小于设计指标 $20 \mu\text{rad}$ 。

2.1.2 反射镜框组件的安装调整

所有结构部件安装到位后,需要对每块反射镜进行转动调节以满足光路准直的要求,在反射镜支承结构中设计了可调的运动学支承部件(见图4),此部件的定位块与镜框组件相连接,3个球头安装在反射镜架上。由于此类反射镜结构在工作时为倾斜放置,采用运动学支承 V 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。为了提供平衡对称的支承力,镜框侧下方设计为两个对称的平面块。反射镜架上的球头轴在固定球头轴支座内可调整高低,与之接触的 V 槽-圆锥-平面块带动反射镜转动。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的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。在其它 3 对配对接触并调整定位以及保证不影响其它 3 对配对的情况下,调整第 4 个球头与配对的平面块接触。通过之前的预研试验与计算结果分析,此结构的调整精度 $< 30''$,二维正交性 $< 1.5''$,满足设计要求。

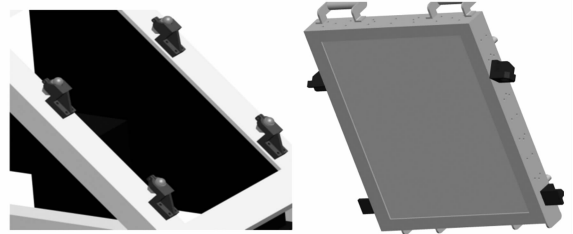


图 4 可调整运动学支承结构

Fig. 4 Adjustable kinematic mounts

2.2 反射镜框组件

反射镜框组件作为通用部件,通过运动学支承安装在反射镜架上,在维修更换时,只需将需要更换的反射镜框组件移至洁净间,将调试好的镜框组件快速安装至原位置即可,由于采用运动学支承结构,可保证重复定位精度。

反射镜框内镶反射镜片,为了实现夹持反射镜片的应力最小,将硅胶薄垫片铺垫在反射镜片表面与框架之间,以减少夹持应力,同时框的四周开有小孔,装入镜片后在小孔内注入硅胶,粘接内框与反射镜片侧壁,可有效降低夹持应力。经过 Pro/E-mechanica 分析,合适选择反射镜框四周注胶孔的孔径,可有效降低反射镜的静态变形量,反射镜片的静态变形量经计算为 $0.36 \mu\text{m}$ 。

2.3 镜架支承结构

整个支承结构设计的另一个关键是反射镜架,它支承反射镜框组件,而反射镜的变形是设计中关注的焦点,设计时应控制与之相连的所有结构部件的变形量。

反射镜及镜架的稳定性要求实际上是为了控制所反射的激光光束的准直精度和角偏移量在允许的范围,准直精度受反射镜角度调节精度影响,角偏移受镜片和其支撑件的随机振动、实验室环境变化的影响,当反射镜安装调整到位后,稳定性主要体现在光束偏移量的大小上。在计算过程中涉及到激励源的特性和结构系统的特性,本文取随机振动输入,功率谱密度函数为 $1.0 \times 10^{-10} \text{ g}^2/\text{Hz}$ ($1 \text{ Hz} \sim 200 \text{ Hz}$) 的平直谱。结构系统特性包括反射镜及镜架结构的质量、刚度、阻尼

特性等,对于镜架支承结构,镜架的阻尼已定,无法改变,要设计出较为理想的结构系统,就应尽量提高结构自身的刚度。

本文主要考虑反射镜及镜架自身结构对稳定性的影响,为确保反射镜框组件的稳定性以及在有限的空间内安装反射镜架,一方面要求其结构紧凑,又要求其刚度尽量大,我们设计了 3 种镜架结构,其侧视图见图 5,对它们分别进行力学性能分析并进行优选。

通过对以上 3 种反射镜架结构进行分析计算,反射镜架(a)、(b)、(c)的基频分别为 29.5、31.8 和 28.8 Hz。反射镜框组件安装在结构的上斜杆处,分析上斜杆的最大变形量分别为 0.7、0.2 和 0.2 μm ,均发生在上斜杆中部。综合考虑,反射镜架 b 的基频最高,上斜杆静变形较小,刚性最好,因此优先选取图 5 中的反射镜架(b)。

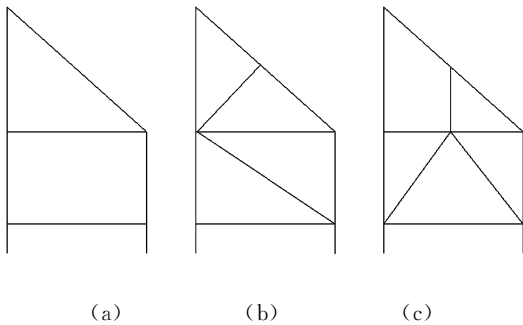


图 5 反射镜架结构简图

Fig. 5 Structure diagram of mirror support

3 支承结构稳定性分析与实验

3.1 力学计算及分析

建立反射镜及镜架结构的有限元模型,分别对其进行了静力分析和随机振动响应分析。

在重力作用下,反射镜镜片最大位移为 11.3 μm (图 6、图 7)。镜片的位移大部分为镜架变形引起的,镜片本身变形较小,镜片法向方向面变形约为 0.36 μm ,此类反射镜的面变形超出设计指标(0.15 μm)。

由模态分析结果可知,反射镜及镜架结构的基频为 27.7 Hz,众多反射镜中,有的安装于大型空间刚架上部或高层建筑物上。高层空间结构的柔度要大些,反射镜及镜架结构的刚度应远大于

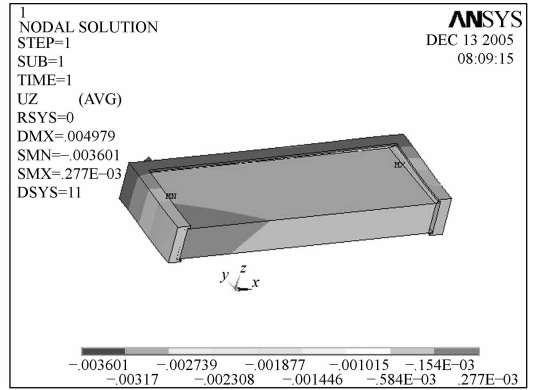


图 6 镜框组件法线方向位移

Fig. 6 Deformation of mirror frame(normal direction)

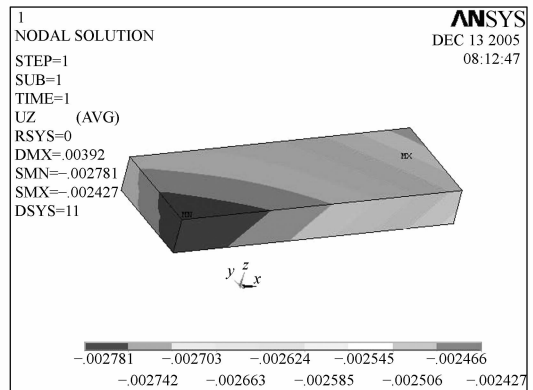


图 7 镜片法线方向位移

Fig. 7 Deformation of mirror (normal direction)

这些基础结构件的刚度。一般认为:当反射镜组件的基频远高于支撑结构的基频时,支撑结构对镜片的动力学响应的影响较小。ICF 装置设计中一般要求反射镜及镜架的基频比支撑结构的基频高 5~10 倍。基础刚架的基频约为 7 Hz,计算所得的所设计结构的基频基本满足要求。

随机振动分析时应该在 3 个方向加基础激励,反射镜镜片最大转角(绕镜面法向)为 0.06 μrad ,绕镜片长度方向的转角很小,可忽略不计,镜片的转动计算值小于设计指标(转角 0.6 μrad)。

3.2 组件模态试验

对组件进行模态试验(图 8),从试验结果可以看出,反射镜架整体沿镜片短轴方向 1 阶弯曲频率为 27.8 Hz(图 9),整体沿镜片前后方向 1 阶弯曲频率为 36.2 Hz。

镜框上下摆动的频率为 114 Hz,是结构整

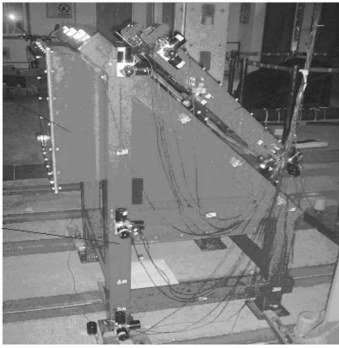


图8 反射镜组件试验状态

Fig. 8 Experiment of mirror support

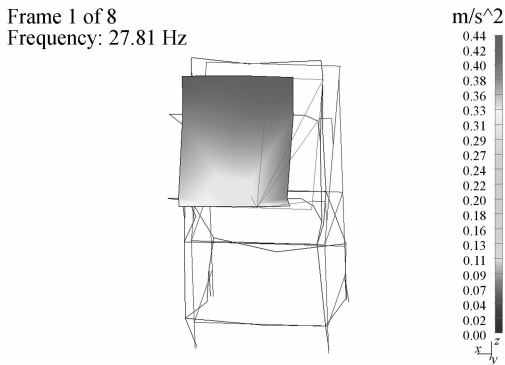


图9 模态试验1阶振型

Fig. 9 The first mode shape of mode test

体1阶弯曲频率的4倍左右,镜框与镜架之间的运动学支承连接方式满足动力学设计的要求。

镜架的实际工作状态是通过地脚螺栓固定在地基上的,而在试验中是采用压板连接的形式固定在地基上的,两种连接形式存在差异,实际工作状态下连接形式的连接刚度要大,因此,反射镜架实际工作状态下的模态频率要比试验中的高。

参考文献:

- [1] 吴文凯. 反射镜用 Kelvin 支承定位精度研究[J]. 机械设计与研究, 2002,06: 50-52.
WU W K. Research on accuracy of relocation of mirrors Kelvin mount[J]. *Machine Design and Research*, 2002,06: 50-52. (in Chinese)
- [2] SLOCUM A H. Design of three-groove kinematic coupling[J]. *Prec. Eng.*, 1992,14(2):67-73.
- [3] HALE L C. *Principles and Techniques for Design Precision Machines*[M]. California: University of California, 1998:10.
- [4] SCMICCHEN P. Analysis of kinematic systems;a generalized approach[J]. *Prec. Eng.*, 1992,19(1): 11-18.
- [5] SLOCUM A H, DOTNMZE A. Kinematic couplings for precision fixturing-part II: Experimental determination of repeatability and stiffness[J]. *Prec. Eng.*, 1988,10:115-122.

4 结 论

此大口径反射镜组件结构设计作为用于 ICF 装置的预研项目,在设计中保证性能指标要求,综合考虑加工、安装和维护等工程实现问题,以做到加工经济可靠,安装维护简单可行:

(1)反射镜支承结构在满足物理要求和使用的要求的基础上,重点满足稳定性指标的要求。反射镜的平移对光路的影响较小,而反射镜的角度误差由于反射镜对于变形有双倍误差及光路较长的因素,因此反射镜的转动量对于光路影响较大,在设计中应着重考虑。镜片的最大转角 $0.06 \mu\text{rad}$,小于设计指标 $0.6 \mu\text{rad}$ (反射镜组件结构的稳定性要求是保证所有激励源引起的反射镜片的漂移的均方根值应 $<0.6 \mu\text{rad}$);

(2)基于反射镜组件的模块化设计,实现了快速维修更换镜片的可行性,且操作方便;维护时间的缩短,减小了对镜箱内部洁净的破坏,确保光学元器件的安全运行;

(3)在连接处采用不同于传统连接方式的可调整运动学支承结构,运动学支承在较低的加工精度下,转角的可重复定位精度约为 $10 \mu\text{rad}$ (试验数据),满足快速定位和准确复位的安装调整要求(重复定位精度 $<100 \mu\text{rad}$);

(4)此种结构镜片的静态变形量经计算为 $0.36 \mu\text{m}$,超出 $0.15 \mu\text{m}$ 的设计指标。在结构改进工作中考虑在镜片背部增加背支撑,经初步计算在镜片背部适当位置增加支撑点可使镜片的静态变形量小于设计指标,但增加背支撑的方式、位置和个数的尝试需在下一步工程工作中进行;

(5)对结构组件进行力学分析及实验研究,最终表明结构满足稳定性要求,从而验证了设计的合理性,为类似结构的设计提供了参考。