

# 大口径光束引导装置设计

卢礼华 张宏志 于福利

哈尔滨工业大学机电工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001

**摘要** 在惯性约束核聚变装置中,为了实现高精度光束焦点位置调整的目的,采用了基于高精度自动调整反射镜进行光束准直引导的方法,进行了理论分析和实验验证,取得了不同驱动方式下电动反射镜的调整精度数据.结果表明:柔性铰链连接直线微位移驱动机构和旋转轴框,能够有效地消除摩擦和间隙等对精度的影响,该电动反射镜能够在 $\pm 15$  mrad的运动范围内实现 $1 \mu\text{rad}$ 激光光束指向调整分辨率,满足了神光-III装置的技术要求.这一结果对大型激光器中高精度光束调整系统的设计是有帮助的.

**关键词** 激光器; 惯性约束核聚变; 精密定位; 电动反射镜

中图分类号 TP23

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0516001

## Design of a Large Aperture Beam Alignment Apparatus

Lu Lihua Zhang Hongzhi Yu Fuli

School of Mechatronics and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China

**Abstract** In inertial confinement fusion (ICF) facilities, a high precision laser alignment apparatus is usually used to focus the laser beams on target with high accuracy. To satisfy the beam adjustment requirements of the SG-III laser facility, one laser alignment apparatus with motorized mirrors is designed and studied theoretically as well as experimentally. It is shown that the pointing accuracy of the laser beam can be achieved by using two different types of the motorized mirrors. The linear drive mechanism proposed by connecting the rotation mechanism through flexible hinges can meet the beam directing requirement with an accuracy of  $1 \mu\text{rad}$  within  $\pm 15$  mrad range and has been verified on the SG-III laser facility.

**Key words** lasers; inertial confinement fusion; precision positioning; motorized mirror

**OCIS codes** 080.4035; 140.3295; 220.4830

## 1 引言

惯性约束激光核聚变(ICF)装置是极其复杂的大型激光系统,如美国的国家点火装置(NIF)和NOVA装置,以及我国的神光-III装置,其中美国NIF装置的激光打靶精度为 $50 \mu\text{m}$ 。在这类激光系统中,基频激光( $1.053 \mu\text{m}$ )经过近百米的光程进入靶场,光束准直引导后通过倍频器将其转换为三倍频光并精确聚焦到靶点<sup>[1]</sup>。

光束准直引导系统的主要任务是在传感器的检测和反馈下,通过精确准直光束指向和透镜移动将激光焦点调整到预定位置<sup>[2-3]</sup>,准直是ICF装置中非常重要的子系统。其中激光光束准直精度依赖于大口径高精度的电动反射镜组件来实现,直接影响ICF装置的打靶精度。由于ICF装置对激光能量要求很高,通常激光光束口径较大,反射镜的反射面达 $500 \text{ mm} \times 500 \text{ mm}$ 以上。

ICF装置中的反射镜按功能划分为电动反射镜和固定反射镜<sup>[4-5]</sup>两大类,按照结构形式划分为串联驱动的有轴式反射镜和并联驱动反射镜两类。光学领域中多数的反射镜口径较小,一般采用并联驱动机构,通过球头和弹簧的铰接结构将精密丝杆的直线位移转化为反射镜的角度<sup>[6]</sup>。由于ICF装置激光光束口径较大,准直装置中的高精度反射镜的口径和重量都较大,为了具有较高的承载能力且满足反射镜背部透光的要

收稿日期: 2014-10-20; 收到修改稿日期: 2014-12-23

基金项目: 国家自然科学基金(51105112)

作者简介: 卢礼华(1977—),男,博士,副教授,主要从事激光惯性约束核聚变相关光学精密机械设计理论方面的研究。

E-mail: lihual@hit.edu.cn

求,通常采用串联驱动的轴承支撑结构反射镜架。以美国 NIF 装置中的有轴式电动反射镜架<sup>[3]</sup>为代表,采用正交轴承支撑结构,由微位移驱动器驱动旋转轴框转动,实现高精度角度调节,步进分辨率达到  $1 \mu\text{rad}$ 。对于大口径的电动反射镜架来说,要实现  $1 \mu\text{rad}$  的高精度角位移控制,控制系统的结构和算法是极其重要的<sup>[7-8]</sup>。对于机械系统来说,摩擦、间隙和弹性变形所导致的定位误差会直接反映到控制精度上。

本文以我国的神光-III 装置的激光准直系统为研究对象,通过精度分析提出了电动反射镜的设计要求,设计了两种正交轴式二维电动反射镜架,分别是柔性铰链连接直线驱动器和旋转轴框与球头、弹簧铰链连接直线驱动器和旋转轴框,基于运动学和弹性力学对所设计的正交轴式电动反射镜架进行分析,并通过实验验证该电动反射镜架驱动机构的精度实现能力。

## 2 主要研究内容

### 2.1 总体结构设计

在神光-III 装置中,激光光束在进入靶室之前要经过光束引导装置和终端光学组件,如图 1 所示。激光光束引导装置包括 2 块固定反射镜和 2 块电动反射镜,两块电动反射镜结构相同,均具有俯仰和偏摆二维转动自由度,用于精确调整光束指向。终端光学组件的主要功能是激光频率转换和聚焦,实现焦点沿光轴方向的调整,即焦斑大小的调整。通过视觉传感器检测激光焦点在靶球上的位置和大小,反馈控制光束引导反射镜和终端光学组件,从而实现激光焦点位置的精确三维调整。

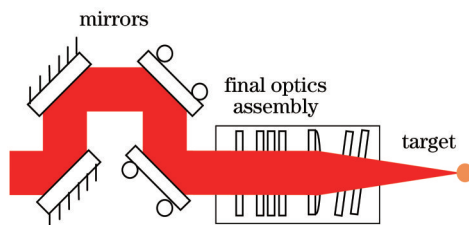


图 1 激光准直引导原理图

Fig.1 Sketch of the laser alignment system

惯性约束激光核聚变要求多束激光精确的聚焦到靶球上,并具有很高空间对称性。由于光点引导过程中光点、靶和激光引导传感器精度主要取决于系统的复位精度,其误差项包括:入射光线角度误差(由零位角误差和反射镜伺服误差组成)、靶尺寸误差、光点位置定位误差、靶空间位置定位误差、靶检测仪对激光引导传感器的定位误差、靶传感器的中心位置误差等<sup>[9]</sup>。光点的引导依靠激光引导传感器实现,目前电荷耦合器件(CCD)激光引导传感器能够实现的最高像素为  $8 \mu\text{m} \times 8 \mu\text{m}$ 。由于电动反射镜与靶球的距离约为  $10 \text{ m}$ ,为了满足  $8 \mu\text{m}$  的光点步进调整,则激光光束引导需要实现的分辨率为

$$\frac{8 \times 10^{-6} \text{ m}}{10 \text{ m}} = 0.8 \times 10^{-6} \text{ rad} . \quad (1)$$

根据(1)式计算结果,在设计中提出电动反射镜的步进分辨率要优于  $1 \mu\text{rad}$ 。

电动反射镜架由两个结构相同、轴线正交的回转机构串联构成,每个自由度都包括旋转框和直线位移驱动器两部分。电动反射镜架的角度调整结构原理如图 2 所示。

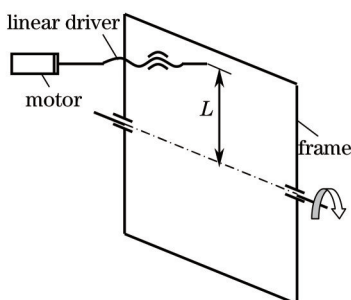


图 2 反射镜机械结构原理图

Fig.2 Structure sketch of the motorized mirror

旋转框通过高精度轴承实现回转支撑,通过轴承的安装调整保证轴系的高精度和无间隙,由于轴系的回转范围很小,有效行程内回转跳动误差预计小于 $0.1\ \mu\text{m}$ ,可以忽略不计。直线位移驱动器采用步进电机驱动,通过行星减速器连接高精度消隙丝杠实现滑块直线运动,滑块安装在直线滚动导轨上,且与回转框之间通过铰链连接,从而将驱动器的直线位移转换为对应旋转框的角位移。由于反射镜的调整范围较小,一般为几十个毫弧度,因此几何非线性的影响是可以忽略的。ICF装置中电动反射镜的驱动半径 $L$ 大于 $300\ \text{mm}$ ,因此直线位移驱动器的步进分辨率要优于 $0.3\ \mu\text{m}$ 。

在直线位移驱动器的运动精度足够高的情况下,旋转框的转角精度主要受到旋转轴系和连接铰链的影响,对于旋转轴系精度的研究已经非常充分,因此,在电动反射镜的设计中,铰链是电动反射镜架精度实现的关键。研制完成的两种电动反射镜驱动局部结构照片如图3所示。球头铰链连接方式如图3(a)所示,依靠球头相对于接触平面的转动和滑动实现直线位移和角位移的传递,需要拉紧弹簧来保证球头和旋转框紧密接触,依靠球头推动镜架转动,回程则依靠弹簧的拉紧力。柔性铰链连接方式,如图3(b)所示,通过柔性铰链的弹性变形来实现直线位移和角位移的传递,具有无间隙、无摩擦的特点,理论上可以实现高精度运动。

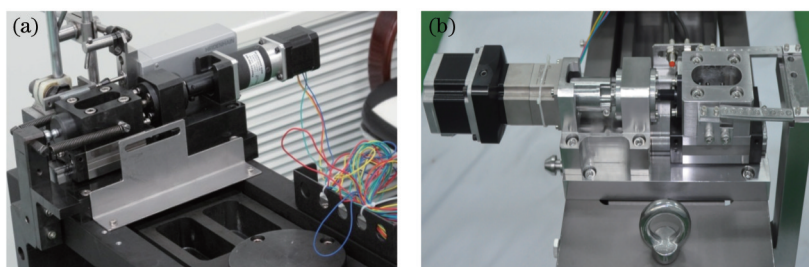


图3 反射镜机械驱动结构。(a)球头铰链连接驱动器;(b)柔性铰链连接驱动器

Fig.3 Photos of the motorized mirrors. (a) Driver with ball contact; (b) driver with flexible hinge

对于柔性铰链来说,其弯曲刚度是整个设计的关键,弯曲刚度低有利于消除材料弯曲变形对精度的影响,运动范围大且转角线性度高;但是弯曲刚度低往往伴随着轴向刚度也低,容易导致拉压轴向变形较大甚至产生受压屈曲,影响重复定位精度和稳定性。同时两个铰点的距离也直接影响到镜架转角的非线性。通过对柔性铰链进行分析和优化设计,最终确定采用直角型柔性铰链,柔性铰链的宽度为 $10\ \text{mm}$ ,铰链长度为 $0.75\ \text{mm}$ ,厚度为 $0.3\ \text{mm}$ 。

## 2.2 有限元分析

有限元(FE)方法采用数值计算方法求解连续体变形问题,具有应用范围广和精度高的优点,在ICF领域的固定反射镜架稳定性分析中已经获得了应用并验证了有效性<sup>[10]</sup>。其在合理简化的基础上建立如图4所示的两种电动反射镜架三维有限元模型,正交旋转框结构完全相同,轴承采用弹簧单元模拟。柔性铰链连接驱动器模型中的柔性铰链采用精确的实体模型模拟,柔性铰链的宽度为 $10\ \text{mm}$ ,铰链长度为 $0.75\ \text{mm}$ ,厚度为 $0.3\ \text{mm}$ ,见图4(b)。球头铰链连接驱动器模型中球头和轴框平面之间采用接触单元,见图4(c),球头和轴框材料为淬火钢,查机械设计手册确定其摩擦系数 $0.1$ ,施加恒定刚度的弹簧预紧力。

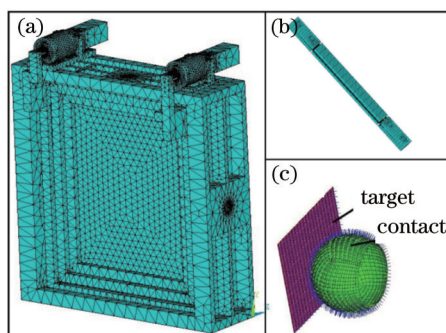


图4 电动反射镜架有限元模型图。(a)整体有限元模型;(b)柔性铰链模型;(c)球铰接触模型

Fig.4 FE model of the motorized mirror. (a) FE model of the mirror; (b) model of the flexible hinge; (c) model of the ball hinge

有限元分析软件采用 ANSYS, 在考虑到弹性变形和摩擦接触的基础上, 给直线驱动器输入步进直线位移, 得到两种铰链连接方式下反射镜架的步进稳态误差如图 5 所示。可以看出, 球头铰链连接驱动器所能够实现的反射镜转角稳态误差大于  $60 \mu\text{rad}$ , 柔性铰链连接驱动器所能够实现的反射镜转角稳态误差小于  $1 \mu\text{rad}$ 。

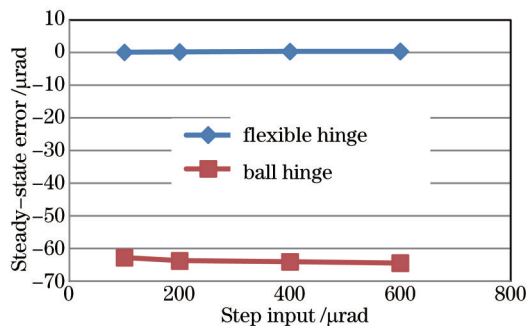


图 5 仿真得到的步进稳态误差  
Fig.5 Step position errors of simulation

### 3 实验与结果分析

针对所设计的两种电动反射镜架进行运动精度的实验研究, 通过计算机上的测试软件对电机输入所需的位移值, 使直线位移驱动器驱动旋转框作回转运动, 采用分辨率为  $0.01''$  的光电自准直仪测量电动反射镜架的角位移输出。

实验中将电动反射镜架的行程等分成 3 段, 每段内分别进行步距为  $1 \mu\text{rad}$  的步进实验, 连续测量 20 次; 每段内分别进行步长  $3031 \mu\text{rad}$  的重复定位实验, 连续测量 10 次, 记录自准直仪读数, 分别得到柔性铰链连接式电动反射镜架的步进输出和重复定位误差见图 6。

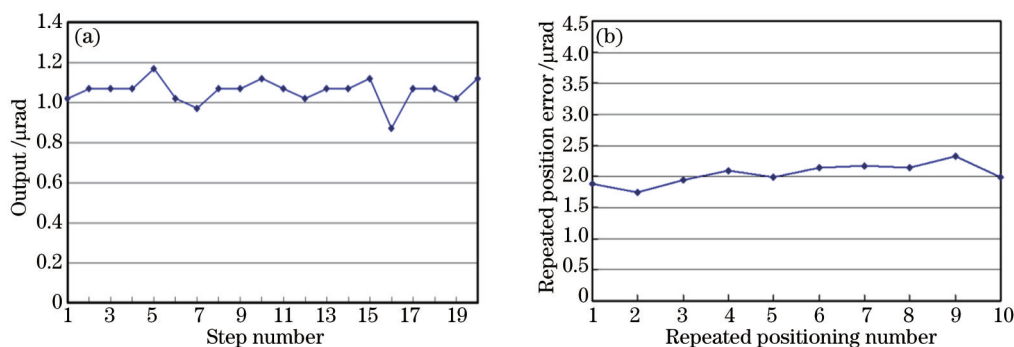


图 6 实验结果。(a) 步进定位; (b) 重复定位

Fig.6 Experiment results. (a) Step positioning; (b) repeated positioning

从实验结果可以看出, 柔性铰链连接驱动器能够精确实现  $1 \mu\text{rad}$  的步进角度调整, 且稳态误差不超过  $0.2 \mu\text{rad}$ 。而步长为  $3031 \mu\text{rad}$  的重复定位精度优于  $2.5 \mu\text{rad}$ , 且每次重复定位误差的变动量不超过  $0.5 \mu\text{rad}$ 。

球头铰链连接式电动反射镜架进行了同样的实验研究,  $1 \mu\text{rad}$  步进响应显示其最大稳态误差达到  $0.8 \mu\text{rad}$ ; 而步长为  $3031 \mu\text{rad}$  的重复定位精度最大约为  $40 \mu\text{rad}$ 。

可以看出, 由于摩擦力是导致系统稳态误差的主要原因, 球头接触铰链连接方式由于存在球头和接触面的摩擦, 而且随着驱动器行程的变化接触面摩擦力也在变化, 导致很难实现微弧度量级的定位。而柔性铰链由于不存在摩擦等非线性环节, 极大地减小了整个回转过程中的结构变形和间隙的影响, 能够实现  $1 \mu\text{rad}$  的精密驱动。

### 4 结 论

通过对 ICF 激光高精度准直引导反射镜进行设计, 建立了电动反射镜的有限元模型, 并针对两种驱动机构——球头铰链连接式和柔性铰链式进行仿真计算, 仿真结果和步进精度与重复定位精度的实验结果证

明,柔性铰链连接式反射镜架  $1\ \mu\text{rad}$  步进响应的误差不超过  $0.2\ \mu\text{rad}$ ,重复定位精度不超过  $2.5\ \mu\text{rad}$ 。柔性铰链连接式电动反射镜架应用在了我国神光-III装置中,激光引导传感器显示光点能够实现  $1\ \text{pixel}$  的精度引导,满足了设计要求。

## 参 考 文 献

- 1 Hogan W J, Moses E I, Warner B E, *et al.*. The national ignition facility[J]. Nuclear Fusion, 2001, 41(5): 567-573.
- 2 P Di Nicola, D Kalantar, T Mccarville, *et al.*. Beam and target alignment at the national ignition facility using the target alignment sensor[C]. SPIE, 2012, 85050: 85050B.
- 3 Liu Daizhong, Xu Renfang, Fan Dianyuan. Design and performance of a video-based laser beam automatic alignment system[J]. Chinese Optics Letters, 2004, 2(2): 92-94.
- 4 Fu Xuenong, Chen Xiaojuan, Wu Wenkai, *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 Liu Zhigang, Zhu Jianqiang. A novel structure of array reflector mount used in inertial confinement fusion[J]. Acta Photonica Sinica, 2008, 37(1): 164-166.  
刘志刚,朱健强.一种ICF用新型可阵列反射镜架结构[J].光子学报,2008,37(1):164-166.
- 6 Wu Junyong, Sun Rui. Design and accuracy analysis for a large diameter multidimensional reflected mirror rim[J]. Laser & Infrared, 2011, 41(9): 1010-1013.  
吴军勇,孙蕊.大口径多维调整反射镜架的设计及精度分析[J].激光与红外,2011,41(9):1010-1013.
- 7 Shao Zhongxi, Fu Yunzhong, Fu Hongya, *et al.*. Development of terminal optical module and reflector mount control system[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2013, 45(1): 67-71.  
邵忠喜,付云忠,富宏亚,等.终端光学组件及反射镜架控制系统的开发[J].哈尔滨工业大学学报,2013,45(1):67-71.
- 8 Peng Shuping, Wang Weiguo, Yu Hongjun. Design of a control system of fast reflector in a laser autocollimator[J]. Laser Technology, 2013, 37(4): 431-436.  
彭树萍,王伟国,于洪君.激光对准快速反射镜控制系统的设计[J].激光技术,2013,37(4):431-436.
- 9 Liu Guodong, Pu Zhaobang, Zhang Zuo, *et al.*. Study on the method of multipath laser directing in ICF[J]. Optical Technique, 2004, 30(2): 232-234.  
刘国栋,浦昭邦,张琢,等.惯性约束核聚变多路打靶激光光束引导方法的研究[J].光学技术,2004,30(2):232-234.
- 10 Chen Xueqian, Du Qiang, Chen Xiaojuan, *et al.*. Finite element modeling study on kinematic interface joints of reflector systems[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2011, 23(7): 1835-1838.  
陈学前,杜强,陈晓娟,等.反射镜架系统运动学支撑连接的有限元建模[J].强激光与粒子束,2011,23(7):1835-1838.

栏目编辑:韩峰