

# 高功率固体激光器的大口径反射镜装配误差分析

王 辉<sup>1</sup> 黎 沁<sup>2</sup> 熊 召<sup>2\*</sup> 袁晓东<sup>2</sup> 姚 超<sup>1</sup> 融亦鸣<sup>1</sup>

<sup>1</sup>清华大学机械工程系, 北京 100084

<sup>2</sup>中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 绵阳 621900

**摘要** 从惯性约束聚变系统高功率固体激光驱动器中具有典型意义的大口径激光传输反射镜的装配结构及其技术精度特点出发,分析了其关键面形误差指标的形成原理,研究了反射镜单元的装配预紧基本力学模型。并在此基础上,进一步针对空间安装状态的反射镜面形无法精密检测难题,提出了“精密检测—数值建模”相综合的面形误差分析与预测方法,以期为我国“神光-III”主机装置大口径反射镜的集成化装校工程提供科学指导方法及有力的技术工具。

**关键词** 激光器; 高功率固体激光器; 大口径反射镜; 面形误差; 精密装配

中图分类号 TH161; TN242

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0922004

## Assembly Error Analysis for Large Aperture Transport Mirror in High Power Solid-State Laser System

Wang Hui<sup>1</sup> Li Qin<sup>2</sup> Xiong Zhao<sup>2</sup> Yuan Xiaodong<sup>2</sup> Yao Chao<sup>1</sup> Rong Yiming<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Mechanical Department, Tsinghua University, Beijing 100084, China

<sup>2</sup>Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China

**Abstract** Large aperture transport mirror is a typical unit in the high power solid-state laser system. Firstly, the principles of large aperture transport mirror's wavefront errors are discussed in detail, according to an analysis on its structure and assembly characters. Then, the fundamental mechanics model to evaluate the surface deformation of mounted mirror is given. And furthermore, a technical framework combined with the methods of field optical measurements and 3D numerical modeling is proposed to predicate the surface profile of spatial installed mirror. The proposed method is verified with a case study. And some assembly problems in SG-III's transport mirror are also discussed.

**Key words** lasers; high power laser; transport mirror; surface error; precision assembly

**OCIS codes** 220.2740; 220.4880; 080.4035

### 1 引 言

惯性约束聚变(ICF)用激光驱动器是当前世界上最大型化、最高功率、最为复杂的固体激光系统,所要求的技术精度已经近乎当代机械、光学、材料等工程技术的极限——我国目前正在大力建设的“神光-III”主机装置(SG-III)<sup>[1]</sup>要求48束激光经过近千米的光程之后,在几十个皮秒的时间范围内以30 μm的位置偏差(通常取均方根偏差RMS)击中直径6 m的靶球中心一个毫米量级的靶丸。400 mm口径传输反射镜是激光驱动器中最大的光学器件,在靶区编组传输部分发挥着对激光束进行位置调整、对准方向、光程匹配(每束激光光程相同)的重要功能。要实现激光束的聚焦和打靶性能指标,传输反射镜应具有较可靠的工程装配技术精度。传输反射镜的集成装配也有着非常鲜明的特点:一方面,高功率激光驱动器用大口径反射镜所要求的技术

收稿日期: 2015-04-10; 收到修改稿日期: 2015-06-01

基金项目: 国家自然科学基金(51205221)

作者简介: 王 辉(1977—),男,博士,副研究员,主要从事精密制造与装配工艺、误差形成机理与优化方面的研究。

E-mail: wanghuisx@tsinghua.edu.cn

\*通信联系人。E-mail: xiong\_022111@163.com (通信联系人)

精度已经近乎现有工程能力的极限;另一方面,其装配结构与工艺特点又对性能(精度及其保持性等)有直接的影响。因此,从自身的典型技术特点出发是大口径传输反射镜实现精密可靠的集成化装配的技术前提。

## 2 大口径激光传输反射镜的技术特点及其结构特征

图1所示为“神光-III”主机装置的大口径传输反射镜,包括镀膜的K9玻璃镜体、铝合金镜框、压板及附件等,反射镜由螺钉通过压板辅助固定在镜架上,镜框四周通过对称分布的螺钉(共计96个)将反射镜压紧固定在镜框中。由于反射镜的面形精度要求很高,镜体的紧固力不能太大,但同时为保障镜片的结构稳定,还需要可靠的预紧力,所以其预紧工艺需要非常精细的考虑以达到严苛的技术要求。镜体在完成了精密装配之后,被封装进一个具有模块化的结构、标准化外接接口的箱体之中,成为线性可替换单元(LRU)。通过LRU的设计,大口径光机单元在靶区的精密安装被转化成为基于标准化外接接口的联结、校准工艺。

反射镜单元的装配技术特点还是非常典型的。1)在激光驱动器的最终技术目标下,所要求的大口径传输反射镜技术精度是非常高的,神光III主机装置反射镜的装校精度要求大体上如表1所示,这与美国的国家点火装置(NIF)<sup>[2]</sup>的反射镜技术精度要求近似<sup>[3]</sup>。由于传输反射镜的安装精度是通过零部件的装配工艺实现的,因此,零部件装配工艺的技术影响会进一步反映到激光束的具体性能上去,对物理实验效果产生直接作用。2)大口径传输反射镜在工作状态时,是处于极端特殊的激光强辐射物理环境之下的,极高能量的受激布里渊散射和受激拉曼散射会对镜体产生强烈的热冲击<sup>[4]</sup>。反射镜安装精度(反射镜面的面形精度、指向精度等)的保持性、稳定性等,在根本上讲都受到这种反应环境的极大约束。因此,其装配工艺设计不仅仅是一项精密机械设计,更应考虑到具体物理环境条件的深刻影响<sup>[5]</sup>。

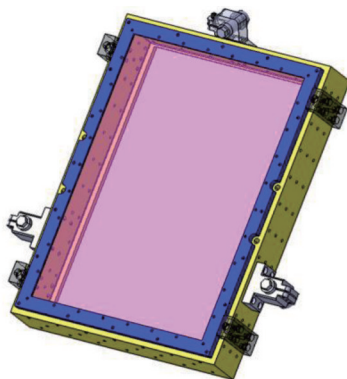


图1 大口径激光传输反射镜的结构

Fig.1 Structure of large aperture laser transport mirror

表1 大口径反射镜的表面误差要求

Table 1 Specifications of transport mirror surface

Surface roughness /nm	< 0.4
Surface misalignment (Normal line) / $\mu$ rad	< 50
Wavefront RMS gradient	< $\lambda/75$ / $\text{cm}^{-1}$
PV(Peak-to-Valley)	< $\lambda/3$
Mount-induced error	< $\lambda/4$
Wavelength of $\phi 600$ mm interferometer, $\lambda = 633$ nm	

研究反射镜安装精度的内在形成规律,需要从其具体的功能需求、制造工艺特点以及工作条件的影响等多个方面进行综合。这正如Jacobs在光学工程名著《Fundamentals of Optical Engineering》中所强调的那样,“在任何的光学器件研制中,光学和机械的考量并非各自独立的,恰恰相反,而是同一个问题的两个方面”。大口径反射镜单元的装配工艺、工作条件、光学性能应当是一个相互密切作用的有机整体。这也是光学/机械一体化理论<sup>[6]</sup>在高功率固体激光驱动器大口径光机系统的结构/性能综合分析研究中愈来愈成为一个关键的学术思想的根源所在。近年来公开的一系列NIF大口径光机单元的结构特征、误差分布及其对光学性能(波前特性)的影响规律<sup>[7-9]</sup>,也为以这一理论方法为依托,开展反射镜单元的装配研究提供了重要借鉴。

### 3 大口径反射镜的误差指标分析

高功率激光驱动器具有光学元件多、光束口径大、光程长和能量高的特点,使得激光束在传输与放大链路上会逐次积累较大的波前像差<sup>[10]</sup>,为了达到极高的激光打靶精度要求,在激光驱动器的制造装配工程上,一个基本的原则就是在系统误差分析中采用从整体性能目标向局部个体指标进行逐次分解的思想,将激光束总体误差目标在整个激光束传输链路上向各类关键光机组件进行分解,以建立各个关键光机单元的误差控制指标<sup>[11-12]</sup>。典型地,大口径光学元件的波前误差特征参数主要包括波峰-波谷(PV)值、波前 RMS、波前 RMS 梯度值等。其中,波前 RMS 是反映光学表面对激光束的散射损耗特性的重要参数,波前 RMS 梯度则是与激光聚焦性能联系最密切的指标<sup>[13-14]</sup>。遵循从整体性能指标向局部个体指标进行逐次分解的原则,对关键光学元件表面误差的具体分析过程可以描述如下<sup>[15]</sup>。假设激光放大传输链路上的大口径光学器件由于近似的制造技术会产生相同的波前斜率特征,则在校正条件下的最终波前斜率( $\alpha_{\text{final}}$ )是所有光学器件波前斜率( $\alpha_i$ )的累积,其关系为

$$\alpha_{x,\text{final}}(x,y) = \sum_1^{N_e} \alpha_{x,i}(x,y), \quad \alpha_{y,\text{final}}(x,y) = \sum_1^{N_e} \alpha_{y,i}(x,y), \quad (1)$$

进一步可导出最终波前斜率的方差激光链路上个体的总和为

$$\sigma_{\alpha_{x,\text{final}}}^2 = \sigma_{\alpha_{y,\text{final}}}^2 = N_e \sigma_{xy}^2, \quad (2)$$

考虑随机分布下,激光束最终波前斜率特征以 0.8 的概率下符合技术要求,则可以推导出单个光学器件的波前斜率方差( $\sigma_{xy}$ )的估算公式为

$$\sigma_{xy} \leq \frac{\Omega}{\sqrt{-2N_e \ln 0.2}}, \quad (3)$$

式中  $N_e$  代表链路上的光学元件数,  $\Omega$  代表激光束最大允许波前斜率。神光 III 主机装置激光束打靶的聚焦光斑的波前斜率许可上限约为  $60 \mu\text{rad}$ , 因此可以得出链路上各主要光学元件的平均波前 RMS 梯度约为  $\lambda/40 \text{ cm}^{-1}$ , 其中测量激光波长  $\lambda=633 \text{ nm}$ 。

光机单元的位置(对准)误差是影响激光束打靶性能的另一个关键要素。全部激光束打靶的时差限制为  $30 \text{ ps}$ , 要求包括数百个光机单元的千米量级光路只允许几毫米误差。这对光路上各类的光学元件提出了极高的对准精度要求。光学元件的位置偏差会显著降低其对准性能,进而影响波束的初始指向精度和对准精度。在激光链路上,透镜的位置偏差会引起焦点漂移导致激光束会聚性能下降以及光束对靶点的偏移,平面反射镜的倾斜也会导致光束对靶点的偏移。Tietbohl 等<sup>[16]</sup>给出了这些因素下激光束在靶点对准误差积累的评估方法,强调了包括透镜、反射镜等大口径光学元件的装配偏差,如果逆向运用这些方法,则可以成为关键光学元件的对准误差分配提供重要科学指导。

### 4 大口径反射镜的面形误差分析

即使是在高度专业化的大型光学装配中心(OAB)中实现数以吨计的光机单元的精密装配仍然是极具技

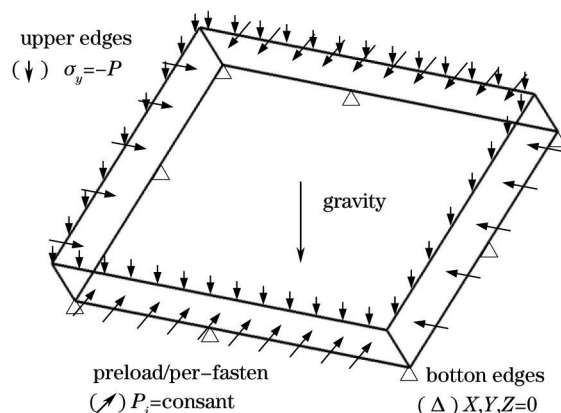


图2 反射镜单元的安装预紧力学模型

Fig.2 Mechanics model of mounted transport mirror

术复杂性的。首要的问题就是装配后的光学元件表面精度。考虑到对光学表面极其精细的误差要求,对像反射镜这样的大口径光机单元而言,预紧力及重力对光学表面变形的影响作用都是必须清晰阐明的。在这里,对其力学体系的建模与分析(特别是数值分析方法)的重要性是不言而喻的。“神光 III”主机装置的大口径传输反射镜采用了框式安装、螺钉紧固的结构,如图 2 所示,其基本的力学模型能够简化为一个矩形弹性体,受重力影响,底部边缘固定,上部边缘承受均匀压力,而周向承受紧固力的作用。

对上述模型的具体技术条件可以描述如下:

载荷边界条件:

在上面四边上,存在一个均匀分布的压力,  $\sigma_z = -P$ ;

在镜体周向四边上,每一个预紧螺钉的预紧载荷  $P_i (i=1, 2, \dots)$  为常量。

位移边界条件:

在底部四边上,自由度为 0, 有  $X=0; Y=0; Z=0$ 。

重力作用:

$F = mg$ , 或表征为镜体内任一点承受均匀体积力

$$q = \rho g \cdot \quad (4)$$

考虑此类矩形板在弹性小变形条件下的静力平衡问题应满足叠加原理,因此,在基本力学模型上,可以视其包括了 3 个简单问题:

1) 简支矩形板受重力作用的变形问题,其基本的方程为<sup>[16]</sup>

$$\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} = \left[ \frac{12(1-\nu^2)}{Eh^3} \right] \rho g h, \quad (5)$$

式中  $w$  为板面法向的位移,  $h$  为板厚,  $\rho$ 、 $E$ 、 $\nu$  分别为材料的密度、弹性模量和泊松比。此处材料为 H-K9L 玻璃,  $\rho$ 、 $E$ 、 $\nu$  相应的值分别为  $2520 \text{ kg/m}^3$ 、 $79 \text{ GPa}$  和  $0.211$ 。

2) 简支矩形板上沿受压变形问题。由于压力穿过了简支边,所以压力对于镜面的实际弯曲作用很小,可以忽略。

3) 矩形板周向受均匀压力的变形问题,其基本方程为<sup>[17]</sup>

$$\frac{Eh^2}{12(1-\nu^2)} \left( \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} \right) + \sigma_x \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \sigma_y \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} = 0. \quad (6)$$

上述分析是对大口径反射镜的面形误差进行精细化分析的理论基础。在实际的应用中,对反射镜在预紧后的面形变化问题可以灵活运用现在广泛应用有限元分析软件(如 ANSYS®等),快速获得较高质量的数值结果。

## 5 空间难测量状态的反射镜波前误差分析与预测

位于靶区编组站的大口径传输反射镜单元,在实际安装中通常是处于  $\pm 45^\circ$  的姿态,发挥着将平行激光束转换为上下半球均匀排布并精确对准对直径 6 m 的靶球中心的关键作用。考虑到反射镜单元极高的波前误差要求以及当前所用的  $\phi 600 \text{ mm}$  级大口径干涉仪只能将工件竖直安装在工作台上才能进行精密检测(如图 3 所示),因此,在靶区实际安装状态下反射镜单元的确切面形在没有工程上成熟的精密高效仪器设备进行测量<sup>[18]</sup>。为解决这一问题,提出一种根据在激光装配大厅完成的反射镜单元面形检测数据对空间难测量状态的反射镜波前误差进行预测的方法。这一方法的基本思路如图 4 所示,将标准位置下的精密检测与空间难测量状态下的数值分析方法相结合,以镜面三维形貌特征建模和表面受力变形分析方法为基础,以镜面的面形特征数据为核心,主要执行如下几个步骤:

1) 结合大口径反射镜的装配技术要求,分析重力作用对镜面变形的影响。重力作用下,处于空间状态(记为角度  $\theta$ )的名义镜面( $R_0$ )可以表示为

$$z'(\theta) = f'(x, y), (x, y) \in R_0. \quad (7)$$

由于反射镜有着极高的加工制造技术精度要求,其表面误差相对零件的结构尺寸是非常细小的。因此,这种误差波动对于重力变形的影响是相对很小的,基于名义尺寸镜体计算的镜面重力变形是完全可以适用于现场应用的镜体实例。

2) 在干涉仪的标准工位 ( $\theta = \frac{\pi}{2}$ ) 完成对未装配的裸镜和安装预紧后的镜面进行竖直状态的镜面测量,

获取镜体实例的表面数据。实际镜面( $R_c$ )可以表示为

$$z^*(i) = f^*(x, y), (x, y) \in R_c, \quad (8)$$

其中  $i=1,2$  分别表示裸镜和装配预紧状态。

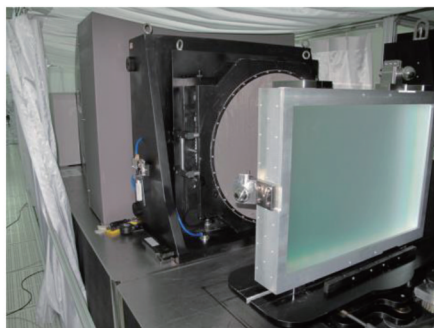


图3 大口径反射镜的面形测量

Fig.3 Surface profile of measurement transport mirror

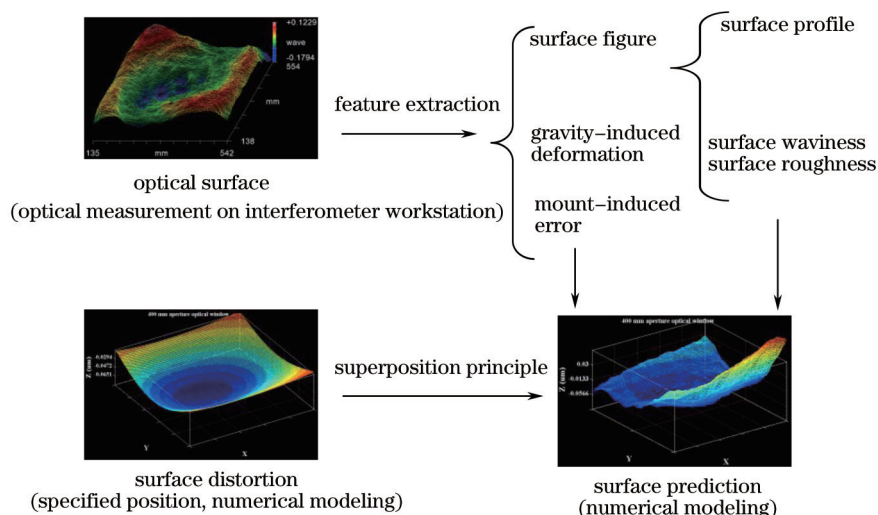


图4 空间安装位置下的反射镜单元表面变形预测

Fig.4 Surface deformation modeling of mounted transport mirror at spatial position

3) 对光学元件表面的面形精密测量结果进行数值分解,提取几类基本特征数据。主要包括镜面的实际面形  $z_0$  和预紧力导致的镜面变形  $z_2$

$$\begin{cases} z_0 = z^*(1) - z'(\pi/2) \\ z_2 = z^*(2) - z^*(1) \end{cases} \quad (9)$$

4) 考虑到空间姿态下的光学元件表面特征是镜面的实际面形、预紧变形及重力变形等要素的合成,根据叠加原理并运用数值方法进行数据融合和三维特征重建,得出空间难测量状态下反射镜光学表面的形貌特征

$$z_3 = z_0 + z_2 + z'(\theta). \quad (10)$$

在此基础上,还可以进一步建立影响反射镜波前性能对各类工程因素(如预紧力、加工误差等参数)的敏感性矩阵,深入探究多种工程因素综合影响下反射镜波前性能的一般性规律。

## 6 案例分析与讨论

神光-III 主机装置的大口径传输反射镜的结构尺寸为  $610 \text{ mm} \times 440 \text{ mm} \times 85 \text{ mm}$ , 以此为实例,运用上述建模分析方法并结合一系列的现场实验工作,从多个方面对相关的研究方法加以验证,并就现有工艺的技术特点及其对反射镜安装精度的影响做进一步的分析讨论。

首先,结合大口径反射镜的装配技术要求,分析重力作用对镜面变形的影响。如图5所示,采用 ANSYS Workbench 15.0 计算反射镜在  $45^\circ$  安装姿态以及水平、竖直两种在精密检测装调中比较常用的姿态下的重力变形。结果表明,水平位置和  $45^\circ$  安装位置下的镜面重力变形作用是非常明显的, PV 值大体上分别为  $\lambda/5$  和

$\lambda/7$ , 相对于镜面 PV 值  $\lambda/3$  的技术要求, 必须予以重点考虑; 而处于竖直状态的镜面变形则只有几个纳米的水平, 与镜面误差要求比是可以忽略的(这样的误差量级比干涉仪的常用测量误差也小很多)。这实际上指明了  $\phi 600$  mm 口径干涉仪进行标准位置检测得到的镜面数据可以作为镜面的实际面形加以应用。

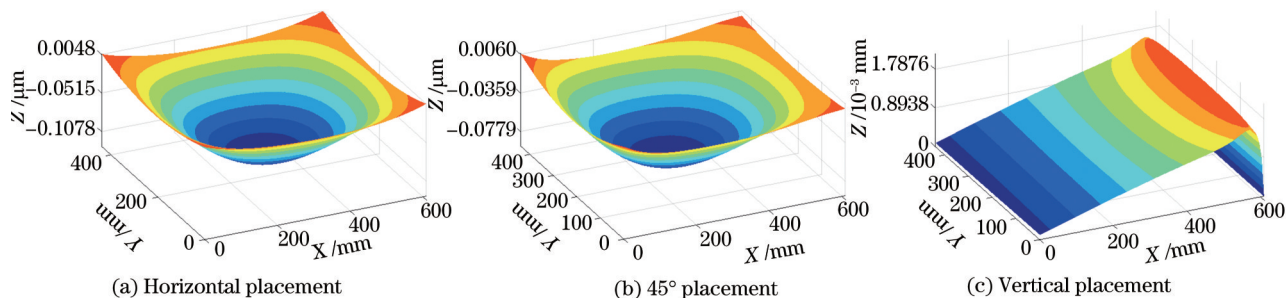


图 5 重力作用下的反射镜表面变形

Fig.5 Gravity-induced surface deformation of transport mirror

其次, 按照未装配的裸镜和安装预紧后的镜体两个状态, 采用  $\phi 600$  mm 大口径干涉仪对反射镜实例进行镜面测量(竖直状态), 以获取现场数据。图 6 所示为反射镜实例在两种状态下的面形测量数据, 其 PV 值分别为  $\lambda/3$  和  $3\lambda/5$ 。按照前述方法对处于空间  $45^\circ$  安装状态下的镜体面形进行计算, 预期的镜面数据如图 7 所示, 表明在  $400$  mm 通光窗口内的 PV 值约为  $3\lambda/4$ , 实际上已经超过误差许可范围。这里需要注意的一个问题是有效数据域。由于干涉仪的有效测量区域  $R_c$  的范围为  $400$  mm $\times$  $400$  mm, 而实际反射镜的镜面  $R_0$  为  $610$  mm $\times$  $440$  mm。在实际应用中, 主要通光窗口的大小大体上也是  $400$  mm 范围, 因此, 数值计算过程中, 最终安装状态( $45^\circ$  倾斜)下的镜面特征应表征为

$$z'(\pi/4)|_{R_c} + z^*(2)|_{R_c} = \begin{cases} \varphi(x, y), & (x, y) \in R_c \\ \text{invalid}, & (x, y) \notin R_c \end{cases} \quad (11)$$

式中,  $Z'(\pi/4)|_{R_c}$  表示对名义镜面取  $R_c$  重力下的面形,  $Z^*(2)|_{R_c}$  表示对干涉仪实测镜面  $R_c$  取面形数据

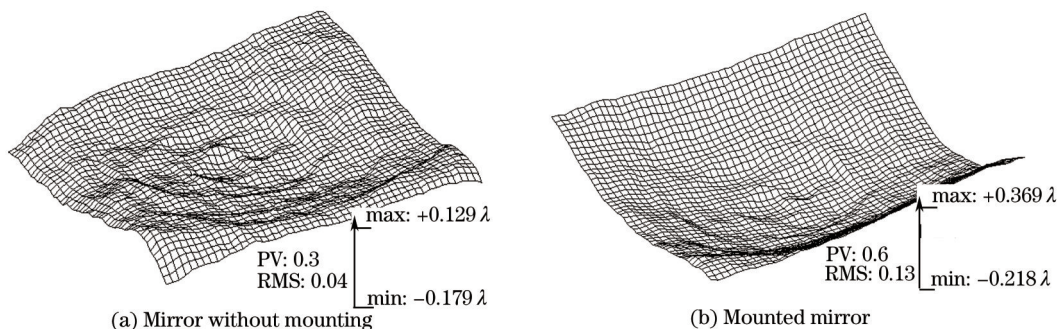


图 6 反射镜表面的干涉仪测量数据

Fig.6 Mirror surface data from  $\phi 600$  mm interferometer

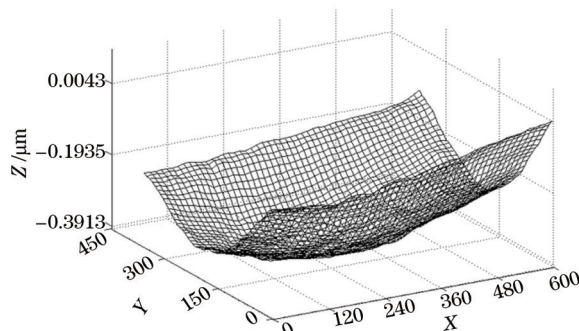


图 7  $45^\circ$  安装姿态下的反射镜面形

Fig.7 Surface deformation of mounted mirror at  $45^\circ$  spatial orientation

第三,由于预紧力作用下的镜面变形可以通过对安装预紧后的镜面和未装配的裸镜镜面取差值来获得,如(9)式所述,发现预紧力作用下的镜面变形可以达到约 $0.27\lambda$ ,这也是相当高的。从工艺上讲,如果能够降低预紧力,对减少面形误差应有帮助,但这可能会影响反射镜单元的结构稳定。因此进一步开展了针对现场工况的实验研究,测量从光学大厅向靶区大厅运送反射镜单元的过程中的振动冲击作用并对反射镜单元的结构稳定加以判断。数据及现场实验如图8所示,初步分析表明,如果考虑到镜体输送、安装过程的机械冲击及长期运行中的机械振动、热等外部激励,潜在的预紧力消减幅度至多在20%范围。因此,在当前装配设计方案降低预紧力来改善镜面变形的技术前景并不大。

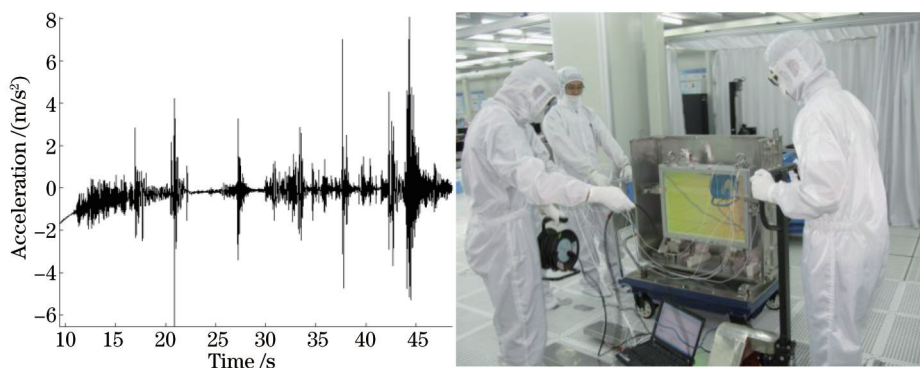


图8 运输过程中反射镜振动冲击作用检测

Fig.8 Vibrations and shocks measurement during transporting optical unit

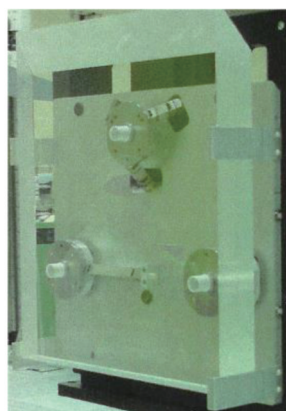


图9 NIF装置中的反射镜

Fig.9 Laser transport mirror of NIF

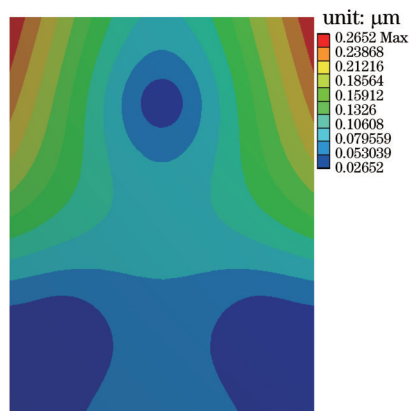


图10 NIF反射镜在安装状态下的变形

Fig.10 Surface deformation of NIF's transport mirror at installed position

为了进一步确定相关结果,检查了近两年来在光学装配大厅中完成的反射镜面形检测数据,其结果也反映出当前的反射镜预紧面形确实存在控制不够稳定、频繁超差的情况。究其技术原因,一个很重要的因素在于当前的反射镜装配结构采用框式安装、螺钉紧固的方式的确还存在一些内在不足,特别是螺纹预紧力极大地受螺纹接触面的摩擦状态的影响,因而很不稳定(对这一问题另有专文研究,这里不做细述)。将“神光III”主机装置的传输反射镜与NIF装置的传输反射镜的技术状态做了一个初步对比,以期发现两种不同装配设计的特点。NIF的反射镜(BK7玻璃镜体)尺寸约为 $680\text{ mm}\times 525\text{ mm}\times 80\text{ mm}$ ,采用了背后3点定位并胀紧安装、四周自由的装配设计方式(图9),定位与安装(胀紧)同时通过3个深为 $50\text{ mm}$ 的定位孔完成,因而取消了镜框。其重力对面形的影响作用如图10所示。比较而言,“神光III”主机装置的传输反射镜变形最大的是镜体中心区域,但中心区域却是关键的反射平面;而NIF反射镜的最大变形区在周边,中心通光区域变形较小,更具工程合理性。进一步,由于镜体采用点联结、少接触的装配模式,冷却散热性能好,能够降低由于高能量的受激布里渊散射和受激拉曼散射引起的光学表面热致畸变。因此,“神光III”主机装置的大口径传输反射镜的装配技术的确有较大的技术改进与提升的必要,而NIF装置反射镜的装配设计方式也提供了一个可借鉴的思路。

## 7 结 论

大口径激光传输反射镜是高功率激光驱动器中的代表性光机单元之一,其设计、制造及装配的技术水平对高功率激光的聚焦打靶性能有着关键性的影响。从大口径激光传输反射镜的技术特点及其结构特征出发,首先从总体视角下探究了反射镜单元波前误差指标的精细化表征及其原理。进而,提出了反射镜单元的装配预紧基本力学模型,并在此基础上,从镜体装校中的弹性小变形条件出发,提出面向空间难测量状态的反射镜波前误差分析与预测方法,为神光-III主机装置大口径反射镜的集成化装配/校验工作提供一个有力工具。

进一步,我国的聚变装置研究受制于时间短促、基础薄弱、研究力量小等历史现实条件约束,在ICF大口径光机单元的装配原理研究、误差与性能分析基础理论等方面的工作基础还很不足。这也是目前大口径光机单元的总装校性能表现不高,在精度及其可靠性、保持性上存在困难的内在原因。因此,应结合我国在高功率激光驱动器大口径光机单元关键装配理论方面的迫切需求,深入研究大口径光机单元装配误差形成的根本机制这一重要问题,揭示关键误差与典型光学性能的内在影响关系、特殊激光物理工作条件对装配结构的影响规律,掌握大口径光机单元装配结构的先进设计方法。这不仅对“神光III”主机装置和下一代点火装置的自主研制,也对于更广范围内的大型精密光机系统的集成装校工程有重要的借鉴意义。

## 参 考 文 献

- 1 Zheng Wanguo, Deng Ying, Zhou Wei, *et al.*. Development of laser technology in research center of laser fusion[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2013, 25(12): 3082-3090.  
郑万国, 邓颖, 周维, 等. 激光聚变研究中心激光技术研究进展[J]. 强激光与粒子束, 2013, 25(12): 3082-3090.
- 2 G H Miller, E I Moses, Craig R. Wuest. The national ignition facility[J]. Optical Engineering, 2004, 43(12): 2841-2853.
- 3 P R Wilkins, P D Knight, R E English, *et al.*. NIF optical specifications and means to quantify mounting stresses[C]. ASPE, 1999, 1-4.
- 4 D J Strozzi, E A Williams, D E Hinkel, *et al.*. Ray-based calculations of backscatter in laser fusion targets[J]. Physics of Plasmas, 2008, 15(10): 102703.
- 5 C J Stolz, J A Menapace, F Y Génin, *et al.*. Influence of BK7 Substrate Solarization on the Performance of Hafnia and Silica Multilayer Mirrors[C]. SPIE, 2003, 4932: 38-47.
- 6 K B Doyle, V L Genberg, G J Michels. Integrated Optomechanical Analysis[M]. 2nd edition, Bellingham: SPIE Press, 2002.
- 7 P A Hurst, E L Grasz, H Wong, *et al.*. Optical assembly and alignment for the national ignition facility project[C]. SPIE, 1998, 3264: 86-92.
- 8 M I Kaufman, J R Celeste, B C Frogget, *et al.*. Optomechanical considerations for the VISAR diagnostic at the national ignition facility (NIF)[C]. SPIE, 2006, 6289: 628906.
- 9 M I Kaufman, R M Malone, B C Frogget, *et al.*. Optomechanical design of a prompt gamma reaction history diagnostic[C]. SPIE, 2009, 7424: 74240M.
- 10 Guo Ailin, Zhu Haidong, Tang Shiwang, *et al.*. Residual wavefront aberration of high-power laser facility[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(8): 0814002.  
郭爱林, 朱海东, 唐仕旺, 等. 高功率激光驱动器波前残余像差研究[J]. 光学学报, 2013, 33(8): 0814002.
- 11 D M Aikens. Origin and evolution of the optics specifications for the national ignition facility[C]. SPIE, 1995, 2536: 2-12.
- 12 Shi Zhiquan, Peng Hansheng, Su Jingqin. Beam positioning error budget in ICF driver[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2002, 14(2): 275-278.  
师智全, 彭翰生, 粟敬钦. ICF驱动器光束定位误差估计[J]. 强激光与粒子束, 2002, 14(2): 275-278.
- 13 D M Aikens, C R Wolfe, J K Lawson. Use of power spectral density (PSD) functions in specifying optics for the National Ignition Facility[C]. SPIE, 1995, 2576: 281-292.
- 14 Liu Hongjie. Research on the Middle-High Frequency Components of Phase Error in High Power Laser Beam[D]. Mianyang: China Academy of Engineering Physics, 2005.  
刘红婕. 高功率激光束中高频位相畸变特性的研究[D]. 绵阳: 中国工程物理研究院, 2005.
- 15 J K Lawson, D M Aikens, R E English, *et al.*. Surface figure and roughness tolerances for NIF optics and the interpretation of the gradient, P-V wavefront, and RMS specifications[C]. SPIE, 1999, 3782: 510-517.
- 16 G L Tietbohl, C S Stanley. Stability design considerations for mirror support systems in ICF lasers[C]. SPIE, 1997: 649-660.
- 17 Wang Longfu. Theory of Elasticity[M]. 2nd edition. Beijing: Scientific Press, 1984.  
王龙甫. 弹性理论[M]. 第2版. 北京: 科学出版社, 1984.
- 18 Chen Haiping, Li Jiabin, Liu Changchun, *et al.*. Research on angle measure error based on method of angle difference[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(10): 1012003.  
陈海平, 李佳斌, 刘长春, 等. 基于角差法面形测量装置的测角误差研究[J]. 光学学报, 2014, 34(10): 1012003.

栏目编辑: 宋梅梅