

文章编号: 0258-7025(2009)Supplement 1-0105-05

# 编组站镜架设计参数反演及有限元分析

张军伟<sup>1,2</sup> 周 忆<sup>2</sup> 谢 娜<sup>1</sup> 周 海<sup>1</sup> 林东晖<sup>1</sup> 陈 林<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900; <sup>2</sup> 重庆大学机械工程学院机械电子工程系, 重庆 400044)

**摘要** 惯性约束聚变(ICF)驱动器是一个大型的光学工程,它对内部各类光学元件及其支撑镜架在环境振动载荷激励作用下镜面扰动不能超过  $0.46 \mu\text{rad}$ 。根据稳定性设计要求,采用虚拟激励法及随机振动理论对装置内编组站镜架的结构设计参数进行了反演分析,得出了镜架结构设计参数,设计的镜架固有频率要求不能低于  $14.88 \text{ Hz}$ ;采用数字式地震仪对镜架安装平台的环境随机振动载荷进行了测试,把测试结果作为载荷,采用有限元分析软件对设计的编组站镜架进行了分析计算,计算结果显示镜架在环境振动载荷作用下的响应不超过  $0.2 \mu\text{rad}$ 。计算结果表明设计的镜架满足稳定性设计要求,同时说明根据稳定性设计要求反演镜架结构的设计参数作为设计依据是可行的。

**关键词** 光学设计; 编组站镜架; 虚拟激励; 设计计算; 有限元分析

中图分类号 TB133 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL200936s1.0105

## Design and Analysis of Large-Scale Mirror Frame Based on Structure Stability Index

Zhang Junwei<sup>1,2</sup> Zhou Yi<sup>2</sup> Xie Na<sup>1</sup> Zhou Hai<sup>1</sup> Lin Donghui<sup>1</sup> Chen Lin<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China)  
<sup>2</sup> College of Mechanical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**Abstract** Stability index distribution of high power solid laser facility requires that the rotation of all the optical elements in the facility can not exceed  $0.46 \mu\text{rad}$  when excited by environmental random vibrations. According to the requirement of stability, back inference the nature frequency design requirement of switchyard mirror frame by pseudo excitation method and random vibration theory, which is one of the large-scale mirror frame. Back inference result is that the nature frequency of switchyard mirror frame can not smaller than  $14.88 \text{ Hz}$ . Builds the 3-D model and analyses the mode of switchyard mirror frame, the result has a good agreement with the design calculation. Using the PSD as the excitation which had been measured for 24 hours on the install base level of the mirror frame to analyze random vibration response of the mirror frame by the PSD module of ANSYS, the response result is  $0.2 \mu\text{rad}$ . The result indicates that designed mirror frame can meet the requirement of stability index and also indicate that according to the back inference result design the mirror frame is feasibility at the same time.

**Key words** optical design; switchyard mirror frame; pseudo excitation; design calculation; finite element analysis

## 1 引 言

由于对能源的巨大需求,而核裂变又具有辐射污染比较严重的缺点,目前世界上几个发达国家都在从事受控核聚变的研究。惯性约束聚变是受控核聚变的一种,是当前研究的一个热点。对惯性约束聚变的研究需要建造高功率固体激光装置,它对光路的稳定性有很高的要求,光学元件在打靶前  $1\sim 2 \text{ h}$  和打靶过程中激光束允许偏离已准直的位置不能超过一定值<sup>[1]</sup>。而每路激光涉及到的光学元件有几十个,对光

学元件稳定性指标分配之后,每个光学元件的稳定性要求偏离不超过  $1 \mu\text{m}$ <sup>[2]</sup>。编组站反射镜是高功率固体激光装置中重要的组成部分,编组站光学元件在环境载荷作用下的稳定性指标为  $0.46 \mu\text{rad}$ ,编组站光学元件的稳定性与编组站镜架的稳定性有着密切的关系,尤其是随机振动载荷对光学元件的影响主要是由随机振动对编组站镜架的影响决定的<sup>[3,4]</sup>,因此设计的镜架满足随机振动载荷作用下对镜架稳定性的要求是镜架设计必须要满足的标准。

**基金项目:** 国家高技术发展计划资助课题。

**作者简介:** 张军伟(1981—),男,博士研究生,主要从事机电系统方面的研究。E-mail: zjw425@163.com

**导师简介:** 周 忆(1957—),女,博士,教授,主要从事精密设计、加工等方面的研究。E-mail: zccy\_6722@163.com

## 2 镜架结构稳定性设计要求的反演

编组站镜架位于靶场内,每个镜架需要支撑四块大口径光学元件,大口径光学元件(图1)通光口径为  $0.54 \text{ m} \times 0.36 \text{ m} \times 0.06 \text{ m}$ 。要求四块光学元件从上到下依次排开,根据稳定性指标分配理论的结果,每个光学元件在随机振动载荷作用下镜面扰动不能超过  $0.46 \mu\text{rad}$ 。研究表明光学元件对光路传输的影响主要是镜面绕  $x, y$  两个坐标轴的旋转,绕垂直镜面坐标轴的旋转以及镜面的平移对光束造成的影响可以忽略<sup>[3]</sup>。光学元件在随机振动载荷作用下的稳定性主要是由镜架决定的,对光学元件稳定性的要求也即是对光学镜架稳定性的要求。假设靶场内随机振动加速度率谱设计为  $1 \times 10^{-10} \text{ g}^2/\text{Hz}$ ,镜架的设计要求要先根据加速度功率谱进行反演计算。

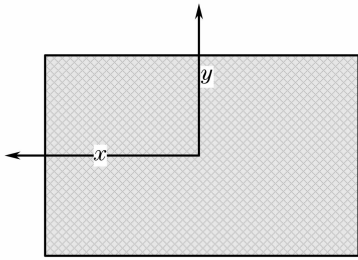


图1 光学元件平面图

Fig. 1 Sketch map of optic element

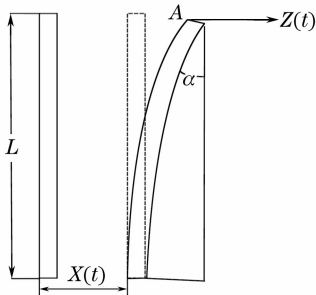


图2 镜架简化模型

Fig. 2 Simplified model of mirror frame

镜架采用板式结构,由于大口径光学元件宽为  $0.36 \text{ m}$ ,镜架的高设计为  $1.7 \text{ m}$  左右,材料拟采用45钢。为了计算对镜架的刚度要求,把镜架先简化为如图2中的板,图2中  $X(t)$  为地面振动位移,板上点A的运动位移为  $Z(t)$ ,则板上点A的振动方程可以表示为<sup>[6]</sup>,

$$\ddot{y} + 2\xi\omega_n\dot{y} + \omega_n^2 y = -\ddot{x}(t), \quad (1)$$

式中  $y = Z(t) - X(t)$ ,  $\omega_n = \sqrt{k/m}$  为固有频率,  $\xi = \frac{c}{2\omega_n m} = \frac{c}{2\sqrt{km}}$  为阻尼比。

假设激励谱为  $S_0$ ,根据虚拟激励法构造水平加

速度

$$\ddot{\tilde{x}}(t) = \sqrt{S_0} \exp(i\omega t), \quad (2)$$

将其代入(1)式得

$$\ddot{y} + 2\xi\omega_n\dot{y} + \omega_n^2 y = -\sqrt{S_0} \exp(i\omega t), \quad (3)$$

由于右端为简谐载荷,得其解为

$$\tilde{y} = \frac{-\sqrt{S_0} \exp(i\omega t)}{\omega_n^2 - \omega^2 + j2\xi\omega_n\omega}, \quad (4)$$

于是由虚拟激励法推导出模型的响应功率谱为

$$S_y(\omega) = \tilde{y}^* \tilde{y} = \frac{S_0}{(\omega_n^2 - \omega^2)^2 + 4\xi^2\omega_n^2\omega^2}. \quad (5)$$

输出均方值为

$$\begin{aligned} \varphi_y^2 &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S_y(\omega) d\omega = \\ &= \frac{S_0}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{(\omega_n^2 - \omega^2)^2 + 4\xi^2\omega_n^2\omega^2} d\omega. \end{aligned} \quad (6)$$

根据特殊积分公式

$$H(\omega) = \frac{j\omega B_1 + B_0}{-\omega^2 A_2 + j\omega A_1 + A_0}, \quad (7)$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} |H(\omega)|^2 d\omega = \pi \frac{(B_0^2/A_0)A_2 + B_1^2}{A_1 A_2},$$

$$\text{得} \quad \varphi_y^2 = \frac{S_0}{4\xi(2\pi f_n)^3}. \quad (8)$$

式中  $S_0$  为环境振动的加速度功率谱。

随机振动响应均值为零,均方根值  $\varphi_y$  也既是均方差值。由于镜架的转角  $\alpha$  很小,它可以由

$$\alpha = y/L \quad (9)$$

得到。

根据(8)式,(9)式,假设  $S_0$  为  $1 \times 10^{-10} \text{ g}^2/\text{Hz}$ ,可得  $f_n = 14.8824 \text{ Hz}$ 。此固有频率为在当前的环境载荷作用下,镜架响应满足要求,镜架设计必须达到的固有频率。但是在实际的工程建设中,为了增加可靠度,通常取最低要求的两倍甚至三倍作为设计标准,满足根据  $3\sigma$  设计原则其设计的可靠度可以达到  $99.74\%$ 。镜架的固有频率要设计为计算频率的三倍,即设计的镜架固有频率要达到  $44.6471 \text{ Hz}$ 。当然,在高功率固体激光装置中, $3\sigma$  设计原则并不常用,一方面可靠度的增加意味着成本的增加,尤其是可靠度达到一定要求之后,可靠度的增加就可能造成成本的几何量级的增加<sup>[5]</sup>;另一方面高功率固体激光装置是一个试验装置,它允许一定的失败,片面的追求可靠度也没有实际意义。目前高功率固体激光装置打靶成功率能达到  $2\sigma$  就基本能满足要求了。

### 3 镜架的初步设计

根据上述分析,设计的镜架结构如图 3 所示,两边采用两支撑板纵向布置可以增加镜架的刚度,有效减小绕  $x$  轴的旋转角。

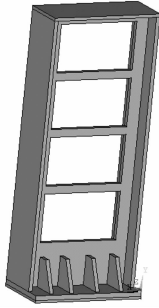


图 3 镜架三维模型

Fig. 3 Mirror frame 3-D mode

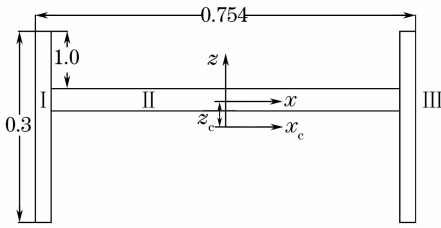


图 4 镜架截面图

Fig. 4 Mirror frame section sketch

初步设计的镜架具体尺寸如下:图 4 左右两个支撑板厚为 0.025 m,宽为 0.3 m,中间板厚为 0.03 m,板宽为 0.704 m,高为 1.72 m。为了计算模型的固有频率,要先计算模型的惯性矩,把模型简化成三块

板支撑,图 4 中 I, II, III 编组站镜架对光路的传输影响比较大的是绕  $x$  轴(图 1)的旋转,其他两个方向的变形对光束的影响可以忽略,因此,主要计算对形心轴  $x_c$  的惯性矩  $I_{x_c}$ 。图 4 中截面图关于  $z$  轴对称,图形的形心必然在截面轴上,

$$z_c = \frac{A_I z_I + A_{II} z_{II} + A_{III} z_{III}}{A_I + A_{II} + A_{III}} = 0.0145 \text{ m.} \quad (10)$$

使用平移轴公式,整个图形对  $x_c$  轴惯性矩为

$$I_y = I_y^I + I_y^{II} + I_y^{III} = 1.1498 \times 10^{-4} \text{ m}^4. \quad (11)$$

则模型的固有频率为

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{3EI/L^3}{m/2}} = 45.7677.$$

计算结果显示,初步设计的镜架尺寸可以满足要求。

为了对上述计算结果进行检验,采用有限元分析软件 ANSYS 对镜架进行模态分析。模态求解的方法很多,ANSYS 有限元程序提供了 7 种方法,即子空间法、分块 Lanczos 法、Power Dynamics 法、缩减法、非对称法、阻尼法和 QR 阻尼法。由于分块兰索斯法(Block Lanczos)求解精度高,计算速度快,在这里选用该法,提取 10 阶模态采用一致质量矩阵<sup>[7]</sup>。得到的 10 阶固有频率见表 1。

图 5 为镜架模型 1~4 阶模态下的变形云图。

对靶场实测数据进行分析,发现靶场环境载荷频率集中在 0~50 Hz 范围内,从对镜架的模态分析结果中可以看出,4 阶模态镜架的固有频率已经达

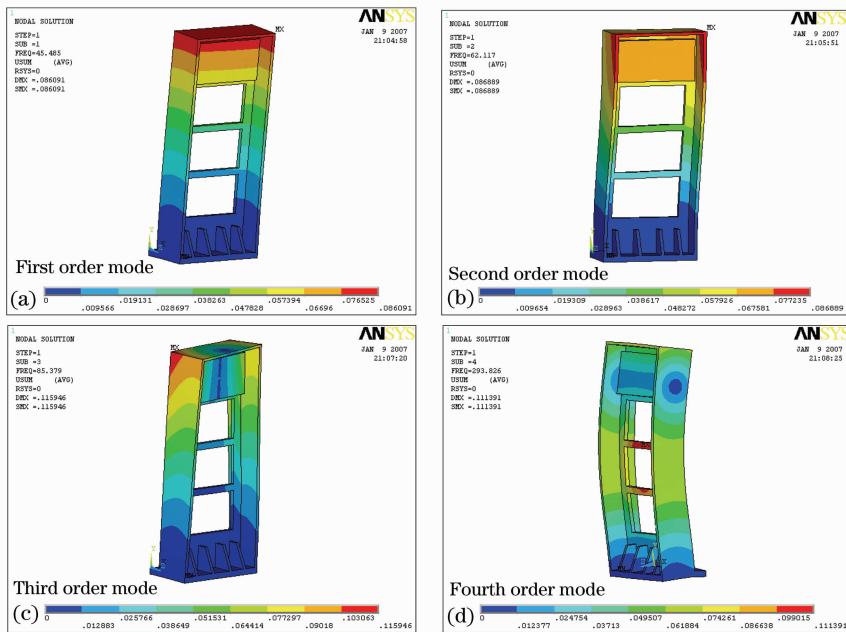


图 5 镜架 1~4 阶模态云图

Fig. 5 Mode contour from the first to the fourth

到 293.83 Hz,因此在这里只详细分析前 4 阶模态。从镜架的模态分析云图(图 5)中可以看出,镜架的 1 阶模态是镜架的俯仰模态,该阶模态与设计要求的模态比较接近,说明镜架的固有频率满足设计要求。镜架的 2 阶模态是镜架的横向摆动,镜架这样运动的结果是光学元件一起与镜架横向摆动,但镜架的横向摆动对光路传输影响不大。3 阶和 4 阶模态固有频率尽管对光路传输有影响,但考虑到靶场随机振动实验测得的地震谱频率都是低于 50 Hz 的,因此随机振动对镜架的影响主要是  $z$  向的随机振动,计算时施加  $Z$  随机振动功率谱即可以满足计算要求。

表 1 编组站反射镜架的固有频率

Table 1 Nature frequency of switchyard mirror mount

SET	FREQ	SET	FREQ
1	45.5	6	377.5
2	62.1	7	415.4
3	85.4	8	439.6
4	293.8	9	489.8
5	355.4	10	602.1

### 4 镜架在随机振动载荷作用下的影响分析

采用 TDS3.0 数字地震处理系统软件对记录的环境地面运动信号进行作谱分析处理,得到的功率谱图如图 6 所示。

采用处理软件得到的功率谱数据是 1/3 倍频程数据,在进行谱分析时倍频程数据取值间隔太大,不能准确反映出地面运动的变化,因此采用了测试信号的 FFT 数据,在 FFT 数据里每隔一段频率取一个值,经过转化就可以得到功率谱数据,如图 7 所示,该频谱数据即可用于精密光学支撑结构的振动分析。

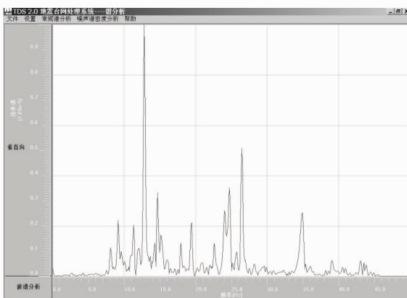


图 6 地面运动速度功率谱图

Fig. 6 Figure of ground velocity power spectral density

在上述实验记录和数据处理的基础上,用得到的频谱数据作为系统输入载荷作用于支撑结构上,应用有限元分析方法分析了一种反射镜镜架在地面

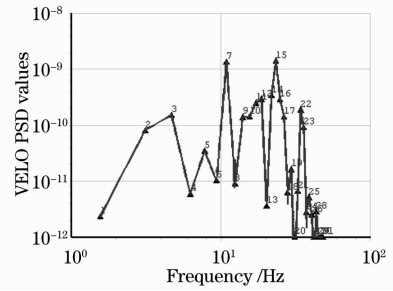


图 7 做谱分析用的频谱图

Fig. 7 Spectrum used in spectrum analysis

微振动作用下的振动情况。有限元单元选用 SOLID95 以及 SOLID185,选用分块兰索斯法作为模态提取的方法。提取 10 阶模态,同时扩展 10 阶模态,采用一致质量矩阵。在得到镜架的模态分析之后进行谱分析,采用 PSD 方法。经过计算就可以得到镜架上各个节点在地面运动谱作用下的位移,图 9 是反射镜镜架在地面运动谱作用下的位移云图。

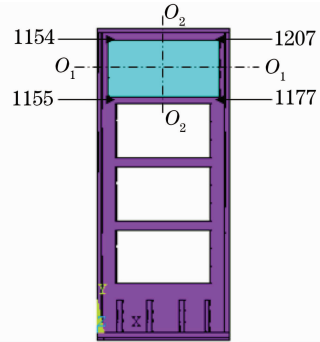


图 8 选取的节点编号

Fig. 8 Number of select nodes

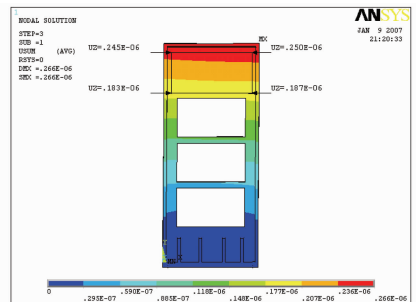


图 9 反射镜镜架位移云图和图 8 中选取的节点位移图

Fig. 9 Nodes displacement of the mirror mount

从图中可以直接读出指定节点的位移,图中所示各点的位移均小于  $0.3 \times 10^{-6}$  m,计算镜面转角的公式为

$$\theta_i = (S_i - S_j) / l \text{ (rad)}, \quad (10)$$

式中  $\theta_i$  为节点编号为  $i$  和  $j$  的相对转角,  $S_i, S_j$  分别为节点  $i$  和节点  $j$  的位移,  $l$  为两节点之间的距离。

节点 1154 和节点 1155 以及节点 1207 和节点 1177 之间的转角都是  $0.172 \mu\text{rad}$ , 计算结果小于设计要求的  $0.46 \mu\text{rad}$ , 表明设计的镜架满足要求。

## 5 结 论

编组站镜架的稳定性与光路的传输有着直接的关系, 由于高功率固体激光装置的建设还处于摸索阶段, 以前没有对编组站镜架的设计要求进行具体的研究。本文根据高功率固体激光装置光路稳定性指标划分结果, 采用虚拟激励理论反演镜架的设计要求, 并用有限元理论对反演结果进行了验证; 对设计的镜架, 采用镜架安装平台实测随机振动载荷的方法结合 ANSYS 谱分析模块对镜架在靶场随机载荷作用下的响应进行了分析。分析结果表明, 镜架满足设计要求, 同时也说明根据稳定性指标分配结果反演镜架的设计要求是可行的。

## 参 考 文 献

- 1 Stanley C. Sommer, Erlan S. Blis. Beam positioning[J]. *The International Society for Optical Engineering*, 1999, **3492**: 112~135
- 2 David J. Trummer, Richard J. Foley, Gene S. Shaw. Stability of optical elements in the NIF target area building[C]. *SPIE*, 1999, **3492**: 363~371
- 3 Shi Zhiqian. Analysis and Research on Optical Element Structure Stability of Large Scale Solid State Laser Facility[D]. Mianyang: China Academy of Engineering Physics, 师智全. 大型固体激光装置光学元件结构稳定性分析研究[D]. 绵阳: 中国工程物理研究院
- 4 Zhou Yi, Zhang Junwei, Feng Bin *et al.*. The application of digital seismograph in the microvibration analysis of the precision optical equipment [J]. *J. Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 2006, **38**(6): 144~147  
周 忆, 张军伟, 冯 斌 等. 数字地震仪在精密光学支撑结构微振动分析中的应用[J]. *四川大学学报(工程科学版)*, 2006, **38**(6): 144~147
- 5 Sun Quan, Zhong Zheng, Zhao Jianyin *et al.*. System reliability indexes of SG-III prototype [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2004, **41**(2): 6~7  
孙 权, 钟 征, 赵建印 等. 神光-III 原型装置系统可靠性评价指标[J]. *激光与光电子学进展*, 2004, **41**(2): 6~7
- 6 Ling Jiahao, Zhang Yahui. Pseudo Excitation Method of Random Vibration[M]. Beijing: Science Press, 2004  
林家浩, 张亚辉. 随机振动的虚拟激励法[M]. 北京: 科学出版社, 2004
- 7 Du Pingan, Gan Ezhong, Yu Yating. Theory, Modeling and Application of Finite Element Method [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2004. 8  
杜平安, 甘娥忠, 于亚婷. 有限元法——原理、建模及应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2004. 8