

文章编号 1004-924X(2007)03-0356-06

大型精密镜架地面随机微振动响应分析

冯斌¹, 周忆², 张军伟², 彭万彬²

(1 中国工程物理研究院 高温高密度等离子体国家重点实验室, 四川 绵阳 621900;

2 重庆大学 机械工程学院 重庆 400044)

摘要:针对激光惯性约束核聚变的大型精密镜架在环境地面随机微振动下的稳定性问题,建立了精密镜架的有限元动力分析模型。以镜架支撑安装基面上实测的地面振动速度功率谱密度为激励,运用 ANSYS 有限元分析软件的 PSD 分析模块,对该结构系统的随机振动响应进行了分析计算。分析表明:分析计算结果与实验数据吻合,目前的镜架支撑安装地面振动满足镜架稳定性要求。

关键词:大型精密镜架;有限元分析;随机振动

中图分类号:TL632.1 **文献标识码:**A

Analysis on ground random vibration response of large-scale precision mirror mount

FENG Bin¹, ZHOU Yi², ZHANG Jun-wei², PENG Wan-bin²

(1. *National Key Laboratory of Laser Fusion, Chinese Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China;*

2. *College of Mechanical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, China*)

Abstract: Aiming at the stability problem of large-scale precision mirror mount caused by random vibration in the ICF (Inertial Confinement Fusion) facility, the finite element model of a mirror mount was established. The PSD measured on the install base level of the mount as the excitation, the random vibration response of the mount was analyzed with the PSD module of ANSYS. The analyzed results are in good agreement with the experiment values, and the actual vibration of installment base level meets the stability requirements of mirror mount.

Key words: large-scale precision mirror frame; finite-element analysis; random vibration

1 引言

激光惯性约束核聚变装置是一个高精度的大

型光学装置,为保证打靶的成功,要求多路多光程激光在传输过程中偏离靶丸的误差小于数十微米(30 μm),且在打靶过程中要保持稳定。分析得知,激光在传输过程中的各种反射镜对激光传输

偏差的贡献主要在于反射镜在两个方向的转动,而反射镜的平移对传输光路偏差影响很小,计算表明反射镜在打靶过程中的稳定精度应当达到 $1 \mu\text{rad}$ 。由于反射镜的镜架是直接和地面环境联系,地面环境随机振动是引起镜面漂移的主要因素,因此对传输激光的各种大型光学镜架提出了振动稳定性的要求。对镜架稳定性精度的判断可以直接测试镜架的动力响应或对镜架模型输入相应激励求解输出,本文采用的方法是应用有限元分析软件^[1],建立镜架的有限元模型,在分析其固有模态及固有频率的基础上,以实际测量的地动功率谱密度为基础激励,利用有限元随机振动得出结构体有关点的位移响应统计量及响应谱,进而对镜架的设计和地面环境给出了评估参考。

2 反射镜镜架运动方程

激光传输光路中有多种反射镜,图1为编组站反射镜镜架的结构示意图,四块反射镜支撑在一个镜架上,图中只安装了上部的一个镜片。

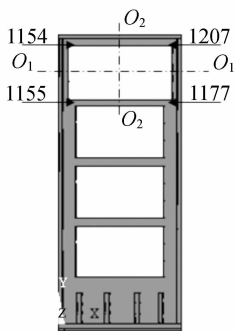


图1 编组站反射镜结构图

Fig. 1 Structure figure of switchyard mirror mount

假定整个镜架结构基础上所有各点的地面运动都是相同的。根据达朗贝尔原理^[2,3,6],有:

$$-M(\ddot{\mathbf{y}} + \mathbf{I}\ddot{\mathbf{y}}_g) - C\dot{\mathbf{y}} - \mathbf{K}\mathbf{y} = \{0\}, \quad (1)$$

上式中的第一项为作用在镜架上的惯性力,而其中的 $-M(\mathbf{I}\ddot{\mathbf{y}}_g)$ 是由地面运动引起的惯性力,即为镜架振动的输入载荷。整理上式得:

$$M\ddot{\mathbf{y}} + C\dot{\mathbf{y}} + \mathbf{K}\mathbf{y} = M\mathbf{I}\ddot{\mathbf{y}}_g, \quad (2)$$

式中: M ——结构的质量矩阵;

C ——结构的阻尼矩阵;

K ——结构的刚度矩阵;

$\mathbf{y}, \dot{\mathbf{y}}, \ddot{\mathbf{y}}$ ——结构相对于基础的位移、速度、加速度向量;

\mathbf{I} ——与方向有关的单位列向量;

$\ddot{\mathbf{y}}_g$ ——镜架基础的运动加速度。

上述方程(1)的解即为由于地面运动引起镜架结构相对于地面的位移。

以镜架平台三个方向(X, Y, Z 向)的随机地动功率谱为输入,应用 ANSYS 分析软件的谱分析模块,即可得到镜架在随机地动功率谱作用下的响应。

由于需要关心的是镜架在低频振动影响下反射镜的角度漂移,即图1中镜片绕 O_1, O_2 轴转动的角度,反射镜的旋转角度可以通过计算得到。为此,可以在反射镜上四个顶点处选择节点,如图编号为 1154、1155、1177、1207 的四个节点。设各个节点在 X, Y, Z 向功率谱作用下的位移为 S_x, S_y, S_z 。采用均方根的方法,节点的总位移计算如下:

$$S_i = \sqrt{S_x^2 + S_y^2 + S_z^2}, \quad (3)$$

式中, S_i 为编号为 i 节点的总位移。

则镜片的相对转角由下式计算:

$$\theta_i = \frac{S_j - S_i}{l}, \quad (4)$$

式中, θ_i 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。上式表明,镜片的相对转角与所选节点的位移及其之间的距离有关,为反映反射镜角度漂移对稳定性的实际影响,通常应选取镜片支撑处的节点位移。

3 反射镜镜架地面随机运动响应分析

3.1 镜架模型和地动速度谱

分析中为了与实验数据比较,保证实验和分析时采用的模型一致,ANSYS 建模时镜片采用了铝镜,镜架材料为钢,镜架上只安装了一块反射镜。为了分析能在 ANSYS 中顺利进行,对原模型进行了合理的简化。考虑到模型本身的特点,有限元单元选用 SOLID95 以及 SOLID185。图2为简化模型以及网格划分图。

模型材料参数见下表:

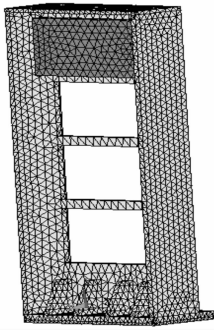


图 2 编组站反射镜架模型网格划分图

Fig. 2 Grid generation figure of switchyard mirror mount model

表 1 材料参数

Tab. 1 Material parameters

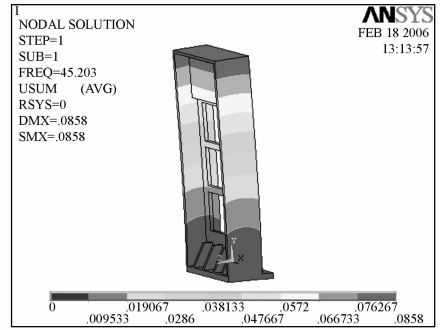
	弹性模量 E	泊松比 μ	密度 $\rho(\text{kg}/\text{m}^3)$
45 钢	2.0e11	0.3	7 800
铝	7.1e10	0.17	2 700

模态即结构的固有频率和振型是进行地震频谱有限元分析的重要前期过程,在大多数有限元程序中,模态求解是一个线性求解过程,当结构中有非线性因素时,应该进行近似线性化处理。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^[4,5]。由于分块兰索斯法求解精度高,计算速度快,在这里选用该法,提取十阶模态,同时扩展十阶模态,采用一致质量矩阵。得到的十阶固有频率如表 2。

表 2 编组站反射镜架的固有频率

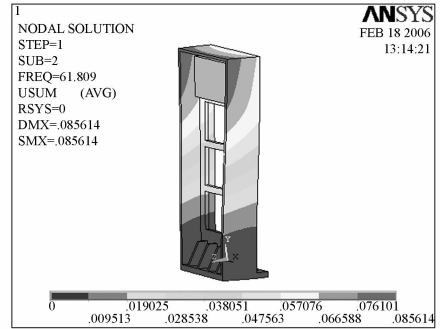
Tab. 2 Nature frequencies of switchyard mirror mounts

SET	TIME/FREQ
1	45.203
2	61.809
3	84.655
4	291.65
5	353.21
6	376.00
7	411.80
8	429.74
9	469.26
10	598.92



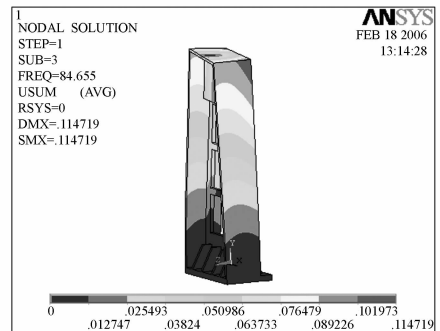
一阶模态

First order mode



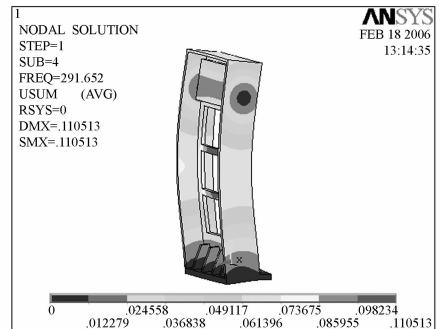
二阶模态

Second order mode



三阶模态

Third order mode



四阶模态

Fourth order mode

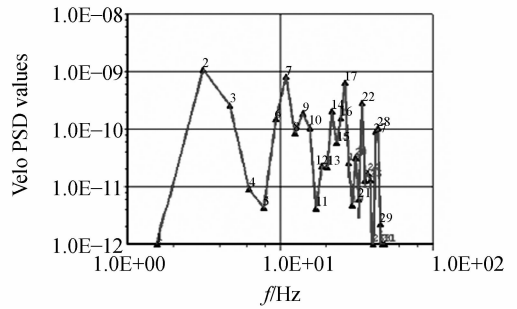
图 3 1—4 阶模态下的变形云图

Fig. 3 Mode contours from the first to the fourth

考虑到实验测得的地震谱频率都是低于 50 Hz 的,在这里选用前四阶模态已能满足要求。

图 3 为镜架模型 1~4 阶模态下的变形云图,根据模态的结果,X 及 Z 向的激励对前后俯仰振型的响应很大,这也是影响镜架稳定精度的最主要激励方式。

ANSYS 随机振动谱分析是该软件谱分析的一种,是一种定性分析,分析的输入输出数据都只代表它们在一特定值时发生的可能性^[5]。激励功率谱密度有位移功率谱密度、速度功率谱密度、加速度功率谱密度、力功率谱密度等形式^[6]。本文以速度功率谱密度为激励,采用 PSD 响应分析。这里所用激励谱是用数字式流动地震仪测得的镜架基座的速度功率谱,测试的频率范围为 0~48 Hz。测试方向为 X 向(东西)、Y 向(垂直)、Z 向(南北)。为消除地震仪本身在低频的影响,对采集的数据采用高通滤波。分析时,分别把 X 向、Y 向、Z 向激励的速度功率谱施加于镜架安装基面一周的约束节点上。镜架安装基面约束节点所施加的 0~48 Hz 速度功率谱 X 向、Y 向、Z 向曲线见图 4。



Z 向频谱图
Z direction PSD

图 4 镜架平台随机地面运动功率谱

Fig. 4 Random vibration PSD of the mirror support plane

3.2 镜架响应和漂移分析

随机振动谱分析结果是该激励条件下的概率统计值,包括节点六个自由度的位移、速度及加速度的均方根值,也可得到单元应力的均方根结果^[7-9]。在时间历程后处理器中,可处理得出特定节点的位移、速度及加速度响应谱。通常只对所感兴趣的局部及特定节点的响应做分析处理并给出结果。采用国际公制单位,位移单位为 m;加速度单位为 g;位移功率谱单位为 m^2/Hz ;加速度功率谱单位为 g^2/Hz 。

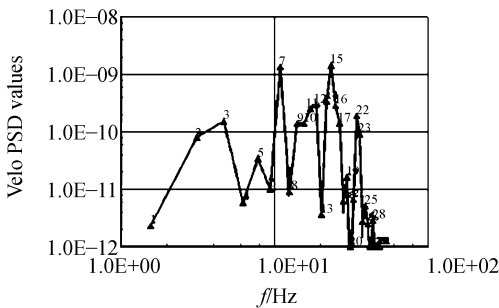
由于所关心的是镜架受地动低频振动影响下,反射镜绕的变形情况,即反射镜的相对转角大小,而在 ANSYS 中,实体建模只支持三个自由度的求解,即 X、Y、Z 向位移运动,而不能得到节点的旋转角度。因此,反射镜的旋转角度只有通过计算得到。为此,我们在反射镜上选择了四个顶点,它们的节点编号为:1154、1155、1177、1207,它们的位置如图 1。

以镜架安装平台三个方向的随机地动功率谱为输入,得到镜架对应节点 X、Y、Z 向的位移响应及总位移如表 3:

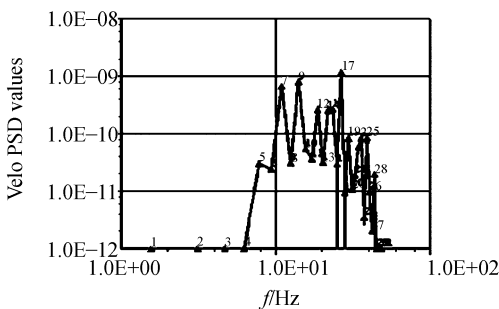
表 3 镜架位移响应分析值

Tab. 3 Result of displacement

节点	S_x	S_y	S_z	S_i
1154	0.26898E-07	0.67329E-08	0.25193E-06	2.5345e-007
1155	0.25719E-07	0.60715E-08	0.18812E-06	1.8997e-007
1177	0.23699E-07	0.67642E-08	0.18817E-06	1.8978e-007
1207	0.24708E-07	0.73469E-08	0.25190E-06	2.5322e-007



X 向频谱图
X direction PSD



Y 向频谱图
Y direction PSD

得出以上节点位移值后,代入式(4)计算镜片绕 O_1 轴的转角($l=0.266\text{ m}$),即节点 1154 和 1155 的转角为:

$$(2.534\ 5e-007 - 1.899\ 7e-007)/0.265 = 2.395e-007(\text{rad}) = 0.239\ 5\ \mu\text{rad}$$

按反射镜稳定性要求,上述计算结果满足反射镜在打靶过程中 $1\ \mu\text{rad}$ 的稳定性指标要求。

在计算分析基础上,对镜架进行了振动响应测试,实验采用了加速度传感器测量镜架上相应节点的位移,试验测点分布如图 5 所示,试验结果如表 4。

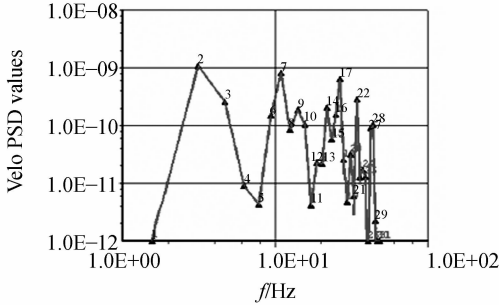


图 5 编组站反射镜测点布置示意图

Fig. 5 Distribution sketch of measuring points on reflector

表 4 编组站反射镜振动测量结果

Tab. 4 Measuring results of reflector's vibration

测点	加速度均方根值 m/s ²	位移均方根值 m	测点描述
4x	4.268e-003	2.119e-007	最上镜架垂直镜面
5x	4.964e-003	2.715e-007	最上镜架垂直镜面
6x	5.605e-003	3.011e-007	最上镜架垂直镜面

测点 4 和 5 的相对转角用公式(4)计算为:
 $(2.715e-007 - 2.119e-007)/0.266 = 2.24e-007(\text{rad}) = 0.224\ \mu\text{rad}$

比较计算结果和实验结果,有微小的误差,这是由于实验测试的镜架位移值实际上不仅仅是地面振动的影响,还包括环境其它激励因素(如噪声、风振等),实验测试结果是这些激励因素的综合作用效果,而分析中只考虑了随机振动的作用。测试的数据表明分析过程和结果是正确的,同时也表明对于这类镜架,其它环境激励因素的影响较小。

4 结 论

大型镜架的地面微动响应分析是稳定性分析计算的重要环节,应用有限元分析软件,输入采用了实际测试的地面运动功率谱,计算得到编组站反射镜的相对转角为 $0.239\ 5\ \mu\text{rad}$,而实验测试计算的相对转角为 $0.224\ \mu\text{rad}$,实验与测试数据吻合得很好,表明计算分析是有效的,为在系统设计阶段给出环境和有关结构的关键技术指标,提高系统稳定性、降低工程成本提供了有效的依据;所做的计算和实验结果也表明目前镜架的安装环境地面振动满足镜架稳定性的要求。

参考文献:

[1] 牛晓明. CAE 技术在空间相机光机结构设计中的应用[J]. 光学 精密工程, 1999, 7(6): 23-28.
 NIU X M. Application of CAE in the design of optical and mechanical structure for space camera[J]. *Opt. precision Eng.*, 1999, 7(6): 23-28. (in Chinese)

[2] 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.
 DU P A, GAN E ZH, YU Y T. *Finite Element Method: Theory, Model Building and Application*[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2004.

[3] J·H·金斯伯格, 白化同, 李俊宝. 机械与结构振动: 理论与应用[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2005.
 GINSBERG J H, BAI H T, LI J B. *Mechanical and Structural Vibrations Theory and Application*[M]. Beijing: China Astronautic Publishing House, 2005.

[4] 李建丰, 徐鸿, 王楠, 等. 设备地震响应的频谱分析法[J]. 北京化工大学学报, 2003, 30(1): 57-60.
 LI J F, XU H, WANG N, et al.. Spectrum analysis method for seismic response of equipment[J]. *J. Beijing*

Univ. Chem. Technol., 2003, 30(1):57-60. (in Chinese)

- [5] 刘士华,赵德胜,谭天水,等. ANSYS在钢架结构随机振动分析中的应用[J]. *机械*, 2004, 31(4):54-56.
LIU SH H, ZHAO D SH, TAN T SH, *et al.*. Application of ANSYS in random vibration analysis of steel-truss structure [J]. *Mechanical*, 2004, 31(4):54-56. (in Chinese)
- [6] NICKERSON, MARK D. Finite element analysis of the Gemini laser launch telescope subjected to random vibration [J]. *SPIE*, 2004, 1105-1116.
- [7] 戴湘和,张宪宏. 随机地震模型及反应谱分析[J]. *地震工程与工程振动*, 1995, 15(2):118-127.
DAI X H, ZHANG X H. A random seismic model and analysis of response spectra[J]. *Earthq. Eng. Eng. Vib.*, 1995, 15(2):118-127. (in Chinese)
- [8] 刘宏伟,张芹,丁亚林,等. 基于有限元分析的长条状主镜支撑结构设计[J]. *光学精密工程*, 2003, 11(6):555-559.
LIU H W, ZHANG Q, DING Y L, *et al.*. Design of strip primary mirror supporting structure based on finite element analysis[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2003, 11(6):555-559. (in Chinese)
- [9] 胡企千,刘梅. 空间太阳望远镜镜筒桁架的优化[J]. *光学精密工程*, 2003, 11(2):151-156.
HU Q Q, LIU M. Optimization of tube truss for space solar telescope[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2003, 11(2):151-156. (in Chinese)

作者简介:冯 斌(1975—),男,中国工程物理研究院高温高密度等离子体国家重点实验室助研,主要研究方向为光学工程、激光技术及应用, E-mail: fengbin_mail@tom.com

周 忆,女,重庆大学机械工程学院机械电子工程系博士,教授,主要研究方向为精密机械、机械电子工程, E-mail: zy@cme.cqu.edu.cn

张军伟,男,重庆大学机械工程学院机械电子工程系在读博士, E-mail: zjw425@163.com