

文章编号:1000-582X(2012)07-049-05

大口径光栅拼接装置的微振动响应分析

周 忆^{1a,1b}, 廖云飞^{1b}, 刘有海^{1b}, 罗跃飞^{1b}, 王 道², 周 海²

(1. 重庆大学 a. 机械传动国家重点实验室; b. 机械工程学院, 重庆 400044;
2. 中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 四川 绵阳 610019)

摘 要:针对 2×2 大口径光栅拼接装置在暖通空调振动影响下的稳定性问题,建立了有限元动力分析模型。以实测的震动功率谱密度为激励,运用 ANSYS 软件对其随机振动响应进行分析计算,并与实测结果进行了比较。结果表明,该装置在工作环境中满足稳定性要求。

关键词:光栅拼接装置;有限元分析;振动响应;稳定性

中图分类号:TH632.1

文献标志码:A

The micro-vibration analysis for the large aperture grating tiling device

ZHOU Yi^{1a,1b}, LIAO Yunfei^{1b}, LIU Youhai^{1b}, LUO Yuefei^{1b}, Wang Xiao², ZHOU Hai²

(1a. The State Key Laboratory of Mechanical Transmission; 1b. College of Mechanical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 610019, China)

Abstract: A new grating tiling device with 2×2 gratings is developed to obtain a large aperture grating. For the stability of the device impacted by the HVAC vibration, a dynamic finite element analysis model is established. The random vibration response of the model under the measured power spectral density as stimulus has been carried out by the ANSYS software, and the data has been compared to the experimental data. The results show that the device can meet the stability requirements in the work environment.

Key words: grating tiling device; finite element analysis; vibration; stability

激光惯性约束核聚变(ICF)实验对大口径光栅的获取提出了要求^[1-2]。由于目前的工艺水平尚不能研制出米量级单块大口径光栅,所以这类光栅世界各国都是依靠拼接的手段获得^[3]。中国目前使用的是由 2 块光栅拼接而成的 2×1 光栅,基本满足实验需求。随着实验的进展,需要的光栅口径也越来越大。为此,研制了由 4 块光栅拼接而成的 2×2 阵列光栅。相对于 2×1 光栅,新光栅的稳定性和精度控制都提出了更高的要求。对于 ICF 实验,光栅的位置精度和稳定性对于打靶成败有着至关重要的作

用^[4-5]。为保证打靶成功,要求多路激光光程在传输过程中偏离靶丸的误差小于数十微米(30 μm),且打靶过程中要保持稳定^[6]。由分析得知,激光在传输过程中,光栅对于激光传输偏差的影响主要在于光栅两个方向的转动,而其平移对于传输光路的影响相对较小^[7]。计算表明,光栅在打靶过程中的稳定精度应达到 1 μrad。

为使靶场保持在适宜的温度,暖通空调(HVAC)一直处于开启状态,由此带来的振动会直接影响到靶场中光栅的稳定性。光栅拼接装置的

收稿日期:2012-03-28

基金项目:国家高技术发展计划项目(2007AA804217);中央高校基本科研业务费资助项目(CDJXS11111140)

作者简介:周忆(1957-),女,重庆大学教授,博士,主要从事精密机电系统设计与分析,(E-mail)cdzy@cqu.edu.cn。

稳定性可以通过其动力响应或对其输入相应的激励求解得到^[8]。笔者采用有限元分析软件,建立光栅拼接装置的有限元模型,在对其进行模态分析的基础上,以实验测得的功率谱密度为基础激励,利用有限元随机振动分析得出其相关点的位移响应,进而对光栅的拼接装置的设计和环境要求给出参考依据。

1 拼接光栅装置运动方程

为满足 ICF 装置对大口径衍射光栅的需求,这里设计制作了如图 1 所示的 2×2 光栅拼接装置。在装置的基座上,安装了 4 块衍射光栅。

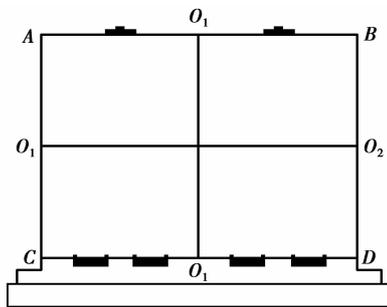


图 1 2×2 光栅拼接装置结构示意图

把 4 块光栅看作是一个整体,并且把整个装置看成是刚性体,即装置上所有点都具有相同的运动状态。根据达朗贝尔原理^[9],有

$$-m(\ddot{\mathbf{u}}\mathbf{I}_g) - \mathbf{C}\dot{\mathbf{u}} - \mathbf{K}\mathbf{u} = \mathbf{0}, \quad (1)$$

式中第 1 项为惯性力,其中 $-\mathbf{m}\dot{\mathbf{I}}_g$ 是有装置基座引起的惯性力,即为装置的输入载荷。整理可得

$$\mathbf{m}\ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{u}} + \mathbf{K}\mathbf{u} = -\mathbf{m}\dot{\mathbf{I}}_g, \quad (2)$$

式中: \mathbf{m} 为装置的质量矩阵; \mathbf{C} 为装置的阻尼矩阵; \mathbf{K} 为装置的刚度矩阵; \mathbf{u} , $\dot{\mathbf{u}}$, $\ddot{\mathbf{u}}$ 分别为装置的位移、速度、加速度矩阵; \mathbf{I} 为与方向有关的单位列向量; $\dot{\mathbf{u}}_g$ 为装置基座的加速度。

方程(2)的解,即为来自基座的激励所引起的光栅拼接装置的位移。

在装置的三维(X 、 Y 、 Z 方向)以振动功率谱为输入激励,在 ANSYS 中进行分析,即可得到装置的响应结果。

这里希望得到的是衍射光栅在振动影响下的角度偏移,即图 1 中光栅绕 O_1 、 O_2 轴的偏转角度,而在 ANSYS 中,实体建模只支持 X 、 Y 、 Z 方向的位移求解,而不能得到节点的旋转角度,所以该角度只能通

过计算获得^[10]。设其 4 个顶点为 A 、 B 、 C 、 D ;再设各个点在 X 、 Y 、 Z 方向的位移为 S_x 、 S_y 、 S_z ,由式(3)可得该点的总位移

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

式中: $i = A$ 、 B 、 C 、 D ; S_i 为顶点 A 、 B 、 C 、 D 的总位移。

则光栅的相对转角可由式(4)计算得到

$$\theta_{ij} = \frac{S_i - S_j}{l_{ij}}, \quad (4)$$

式中: θ_{ij} 为编号为 i 和 j 两点的相对转角($i, j = A, B, C, D$); l_{ij} 为两点之间的距离。显然,其转角和测点的位移及距离直接相关。

2 拼接光栅装置的模态分析

模态结构的固有频率和振型是进行谐响应分析和振动瞬态响应分析的重要前期过程^[11-12]。这里,对本光栅拼接装置进行模态分析,以考察其固有频率及各阶振型。在 ANSYS 中,模态求解是一个线性过程,使用小挠度理论且不包含阻尼和激励^[13]。

即 $\mathbf{C}=\mathbf{0}$, $\mathbf{I}=\mathbf{0}$,代入式(2)得

$$\mathbf{m}\ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{K}\mathbf{u} = \mathbf{0}.$$

为了得到尽量准确的结果,保证实验和分析所采用的模型尽量一致,ANSYS 模型在该装置的各种接头、支架、轴套、光栅等部位分别采用了不锈钢、铝合金、铜和玻璃等不同材料。为使 ANSYS 能够顺利进行计算并且提高计算效率,根据模型本身的特点,对原模型进行了合理的简化。图 2 为模型的网格划分图,表 1 给出了材料的参数。

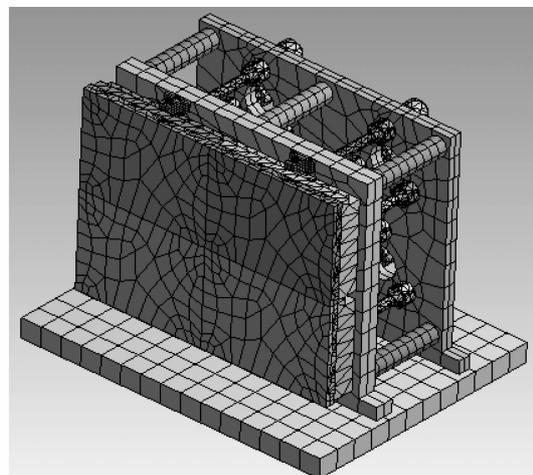


图 2 光栅拼接装置模型网格划分图

表 1 材料参数

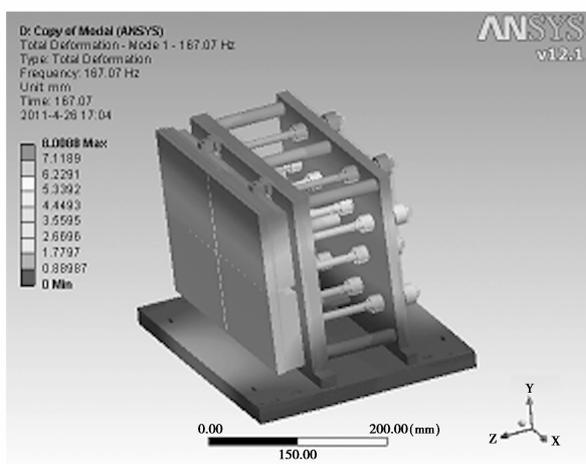
材料	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量/MPa	泊松比
不锈钢	7 750	1.93E+05	0.31
铝合金	2 770	7.10E+04	0.33
铜	8 300	1.10E+05	0.34

表 2 光栅拼接装置的固有频率

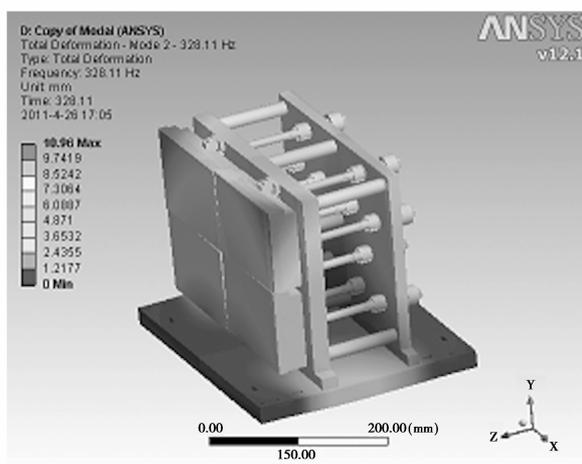
模态	频率/Hz	模态	频率/Hz
1	167.07	9	890.61
2	328.11	10	898.18
3	378.01	11	961.65
4	391.49	12	1 018.70
5	662.70	13	1 263.50
6	788.57	14	1 271.00
7	795.37	15	1 337.50
8	833.70	16	1 340.80

在有限元分析中,由于 Lanczos 法求解精度高、计算速度快^[14],所以用该方法进行求解。这里提取了前 16 阶模态(如表 2 所示)。

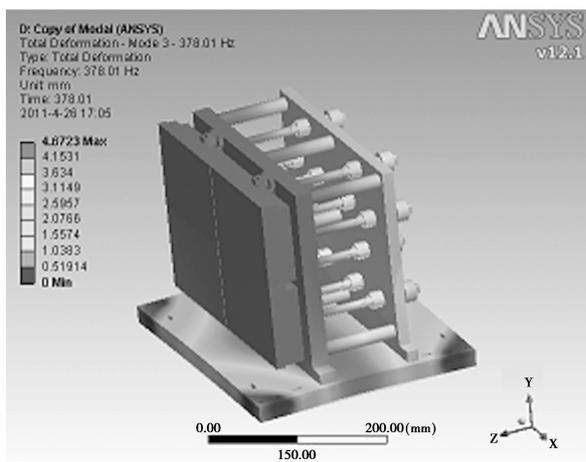
图 3 展示了分析得到的前 4 阶模态的振型云图。



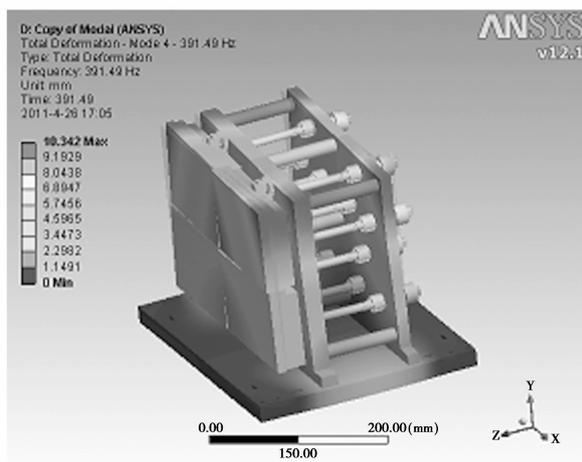
1阶模态



2阶模态



3阶模态



4阶模态

图 3 前 4 阶模态的振型云图

由实验测得的主要频率都在 20 Hz 左右(见图 4~6),而根据模态分析的结果可知,其 1 阶模态已达到 167.07 Hz,所以该光栅拼接装置在工作的时候不会发生谐振。由 1~4 阶模态的变形云图可知,由于激励源的作用,光栅面主要发生了俯仰形式的位移,这也是影响拼接装置的主要激励方式。

3 装置的响应及其分析

在模态分析的基础上,根据实验数据,对光栅拼接装置进行了随机振动分析。实验采用的是海泰多通道便携式数据采集分析系统,使用地震仪进行信号采集。将采集到的信号做 FFT 变换,得到其频谱图如图 4~6。

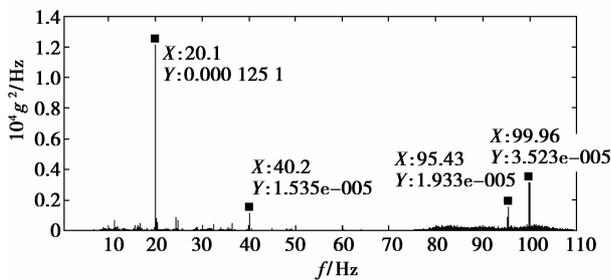


图 4 x 方向加速度功率谱密度

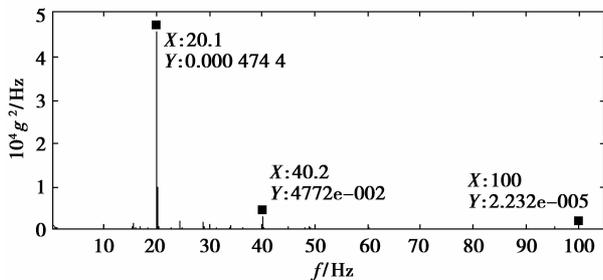


图 5 y 方向加速度功率谱密度

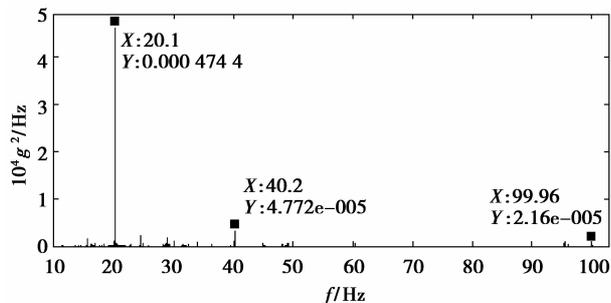


图 6 z 方向加速度功率谱密度

以加速度功率谱密度(PSD)为激励,进行 PSD 响应分析。

对其做频谱分析可得 X、Y、Z 方向上的频谱图。从图上可以清晰的看出,在 20.1 Hz 的地方,频率的幅度最大,且远远大于其他频率。从频谱成分上看,可以认为,20.1 Hz 处的激励为最主要的激励,而其他的频率成分是来自环境、人员等次要的随机扰动。而这一频率也被认为是暖通空调的电机频率。

为便于分析,这里仅取 20.1 Hz 处的数据,将其作为激励源施加到光栅拼接装置的模型上。

该分析虽然是以实验结果为激励的随机振动分析,但是由于只考察了最主要的振动因素,即最影响最大的频率分量,所以该分析也可以认为是一个谱响应分析。

这里特别关心的是光栅拼接装置受到暖通空调振动影响的时候,衍射光栅绕轴转动的情况,即衍射光栅的相对转角大小。如前所述,其相对转角可由计算得到。分析数值见表 3。

表 3 光栅拼接装置位移响应仿真计算值 mm

测点	S_x/nm	S_y/nm	S_z/nm	S_i/nm
A	28.847 0	35.548	71.996 0	85.318 43
B	29.066 0	35.718	72.140 0	85.584 97
C	7.239 9	33.976	4.183 0	34.989 74
D	7.154 5	34.511	4.236 7	35.498 53

将以上测点的位移代入式(4)计算光栅绕 O_2 的转角 θ_{AC} ,即

$$\theta_{AC} = \frac{S_A - S_C}{l_{AC}} = \frac{85.318 43 - 34.989 74}{300 \times 10^6} = 0.167 7281 \times 10^{-6} (\text{rad}).$$

上述计算结果显示光栅在打靶过程中,满足稳定性要求($0.68 \mu\text{rad}$)^[15]。在计算分析基础上,对拼接装置进行了振动响应测试。实验采用加速度传感器测量该拼接装置上 A 点和 C 点的加速度和位移。结果如表 4 所示。

表 4 光栅拼接装置位移实测值

测点	S_x/nm	S_y/nm	S_z/nm	S_i/nm
A	99.22	88.48	83.34	156.904 00
C	13.04	12.31	22.91	29.093 74

$$\theta_{AC} = \frac{S_A - S_C}{l_{AC}} = \frac{156.904 - 29.093 74}{300 \times 10^6} = 0.426 034 \times 10^{-6} (\text{rad}).$$

计算结果和实验结果存在一定差异,这是由于

试验测试的光栅拼接装置的位移不仅仅受空调振动的影响,还包括其他诸如地面振动、噪声、温度梯度等其他影响,仿真分析中只考虑了随机振动的作用。从数量级上看,测试的数据表明分析过程和结果基本正确,同时也表明对于本光栅拼接装置,空调振动对其稳定性起着主要作用。

4 结 论

光栅拼接装置的振动响应分析是稳定性分析的一个重要环节,应用有限元分析软件,采用实测得到的功率谱作为激励输入,计算分析得到光栅的转角为 $0.167\ 728\ 1\ \mu\text{rad}$,而实验得到的相对转角为 $0.426\ 034\ \mu\text{rad}$ 。实验与分析得到的数据数量级是一样的,考虑到仿真分析是理想状态,而实验是多种影响的综合结果,所以可以认为计算分析是有效的。这为讨论通过拼接获得大口径光栅提供了参考依据;所做的计算和实验结果也表明该光栅拼接装置和安装环境满足稳定性的要求。

参考文献:

- [1] Qiao J, Kalb A, Canning D, et al. Development and demonstration of large-aperture tiled-grating compressors for the OMEGA EP petawatt-class laser system[J]. LLE Review, 2008, 115: 113-119.
- [2] Hornung M, Bödefeld R, Siebold M, et al. Alignment of a tiled-grating compressor in a high-power chirped-pulse amplification laser system[J]. Applied Optics, 2007, 46(30): 7432-7435.
- [3] Zuegel J D, Borneis S, Barty C, et al. Laser challenges for fast ignition[J]. Fusion Science and Technology, 2006, 49(3): 453-482.
- [4] Yang Y C, Wang X, Zhang J W, et al. Automatic phase-locked control of grating tiling[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2012, 50(2): 262-267.
- [5] Moses E I. The national ignition facility high-energy ultraviolet laser system[J]. Optical Materials, 2004, 26(4): 515-521.
- [6] 周忆, 杨淑娟, 张军伟, 等. 惯性约束聚变靶场编组站大口径光学元件的热变形分析[J]. 中国激光, 2010, 37(1): 125-130.
ZHOU Yi, YANG Shujuan, ZHANG Junwei, et al. Thermal transfiguration analysis for the large aperture optical element of switchyard in ICF driver target area[J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 37(1): 125-130.
- [7] 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.
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.
- [8] 刘文, 林腾蛟, 李润方, 等. 冲击谱激励下齿轮系统的动力学性能[J]. 重庆大学学报, 2010, 33(1): 7-11.
LIU Wen, LIN Tengjiao, LI Runfang, et al. Dynamics performance analysis on gear system under shock spectrum[J]. Journal of Chongqing University, 2010, 33(1): 7-11.
- [9] Tsetserukou D, Kawakami N, Tachi S. Design, control and evaluation of a whole-sensitive robot arm for physical human-robot interaction[J]. International Journal of Humanoid Robotics, 2009, 6(4): 699-725.
- [10] Hua X G, Chen Z Q. Full-order and multimode flutter analysis using ANSYS[J]. Finite Elements in Analysis and Design, 2008, 44 (9/10): 537-551.
- [11] Singh G, Lyengar N G R, Venkateswara R G. Large amplitude free vibration of simply supported antisymmetric cross-ply plates [J]. AIAA Journal, 1991, 29 (5): 784-790.
- [12] de la Fuente E, Sanz M A, Hernando J L. Exact reliability calculation with quadratic failure indices in random vibration[J]. Engineering Structures, 2010, 32 (3): 793-799.
- [13] 曾攀. 工程有限元方法[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [14] 尹刚. 高重合度齿轮应力场有限元分析[J]. 重庆大学学报, 2010, 33(7): 53-57.
YIN Gang. Finite element analysis of high contact-ratio gear stress field[J]. Journal of Chongqing University, 2010, 33(7): 7-11.
- [15] Trummer D J, Foley R J, Shaw G S. Stability of optical elements in the NIF target area building[C/OL]//3rd Annual International Conference on Solid State Lasers for Application to Interial Confinement Fusion (ICF), Monterey, CA, June 7-12, 1998[2012-03-02]. <https://e-reports-ext.llnl.gov/pdf/234103.pdf>.

(编辑 张 苹)