

大口径反射镜架特征参数对其动态响应影响分析

张军伟^{1,2} 陈伟¹ 周忆¹ 陈良明² 周海² 林东晖²

(¹重庆大学机械工程学院, 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 621900)

摘要 在惯性约束核聚变(ICF)驱动器中,大口径反射镜是关键的光学器件,其稳定性直接影响着光束的指向和定位精度。随机振动和镜架结构参数是影响大口径反射镜架动态响应的主要因素。为明确随机振动激励大小及镜架特征参数对镜架动态响应的影响,实现对镜架动态响应的控制,采用有限元分析软件对大口径反射镜架在随机振动作用下的响应进行了分析,分析了激励功率谱密度、结构刚性和阻尼比等不同参数对大口径反射镜架动态响应的影响。分析结果表明:减小激励功率谱密度和增大结构刚性对减小大口径反射镜结构响应具有相同的作用,增大结构阻尼比效果最明显,但无论是减小激励功率谱密度、增大结构刚性以及增大结构阻尼比,其作用效果都在递减。

关键词 光学器件; 结构设计; 大口径反射镜架; 随机振动; 动态响应; 阻尼比

中图分类号 TN203 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.s116005

Analysis of the Effect of the Large-Aperture Mirror Mount Parameters on Its Dynamic Response

Zhang Junwei^{1,2} Chen Wei¹ Zhou Yi¹ Chen Liangming² Zhou Hai² Lin Donghui²

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

Abstract In the inertial-confinement fusion (ICF) driver, the large-aperture array mirror mount is an important opto-mechanical system, which affects the beam direction and position precision. Random vibration and the parameters of the large aperture array mirror mount are the main factors that influence the dynamic response of the mirror. The finite element analysis software is used to analyze the relation between the parameters of the excited power spectral density (PSD), the structure elastic modulus, the damp ratio and the structure dynamic response. The results indicate that reducing the excited PSD and increasing the elastic modulus has the same effect on reducing large-aperture mirror mount structure dynamic response, and increasing the damp ratio is the best way. However, the effect of all the methods as reducing excited PSD, increasing elastic modulus and damp ratio is becoming weaker.

Key words optical devices; structure design; large-aperture mirror mount; random vibration; dynamic response; damp ratio

OCIS codes 220.4830; 220.4880; 220.4610

1 引言

激光压缩氘氚靶丸实现受控热核聚变是能源开发的重要研究方向,巨型惯性约束核聚变(ICF)驱动器是开展惯性约束聚变的实验验证平台。ICF驱动器经过多年的发展,已进入以美国国家点火(NIF)装置为代表的二代激光驱动器时代。二代激光驱动器采用多程放大、方口径光束、阵列化设计,具有结构紧凑、技术集成度高等特点。NIF装置是

目前世界上最大的ICF驱动器^[1],2011将进行点火实验。中国目前已建成亚洲最大的二代ICF驱动器——神光-III原型装置^[2]。二代激光驱动器由于采用多程放大构型,对内部光机器件稳定性精度要求高^[3],原型装置对内部大口径光学元件稳定性要求在微米量级,要满足如此高的稳定性要求必须考虑光学元件的环境和支撑结构等条件,进行优化设计^[4]。大口径反射镜是ICF驱动器的重要组成部分

收稿日期: 2011-07-25; 收到修改稿日期: 2011-09-02

基金项目: 国家 863 计划和中国工程物理研究院技术基础基金资助课题。

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

件,也是 ICF 驱动器中用的较多的光学元件,其稳定性直接影响光束的指向和定位精度^[5]。大口径反射镜架设计的主要任务是控制其在随机振动激励下的动态响应。大口径反射镜的动态响应由激励功率谱密度的大小和反射镜镜架的结构参数共同决定。明确各参数(激励功率谱密度、结构刚性和阻尼比)与镜架结构动态响应之间的关系是开展镜架动态响应控制的基础。

本文使用有限元方法对各参数与大口径反射镜动态响应的关系进行了分析,明确了镜架不同特征参数对大口径镜架动态响应的影响。

2 随机振动响应理论分析

对多自由度系统而言,采用解析法进行求解不仅求解困难,而且结果误差较大,并且随着自由度的增多使求解更加困难。有限元法的出现可以有效解决多自由度的求解问题,多自由度系统在动力作用下的响应,根据达朗贝尔方程有^[4]

$$M\ddot{\mathbf{y}}(t) + C\dot{\mathbf{y}}(t) + K\mathbf{y}(t) = \mathbf{x}(t), \quad (1)$$

式中 $\mathbf{y}(t)$ 为节点响应位移向量; $\dot{\mathbf{y}}(t)$ 和 $\ddot{\mathbf{y}}(t)$ 分别为 $\mathbf{y}(t)$ 的一阶和二阶导数; $\mathbf{x}(t)$ 为系统的振动激励力向量。

M 、 K 、 C 分别为系统的质量矩阵、刚度矩阵和阻尼矩阵。

应用模态叠加方法,系统位移响应为

$$\mathbf{S}_{yy}(\omega) = \Phi \mathbf{H}_q^*(\omega) \Phi^T \mathbf{S}_{xx}(\omega) \Phi \mathbf{H}_q(\omega) \Phi^T, \quad (2)$$

式中 $\mathbf{S}_{xx}(\omega)$ 、 $\mathbf{S}_{yy}(\omega)$ 分别为激励力和响应位移的功率谱密度矩阵,其对角元素为自功率谱密度,非对角元素为互功率谱密度; Φ 、 $\mathbf{H}_q(\omega)$ 分别为位移振型矩阵和模态频响函数矩阵; * 表示复数共轭; ω 为角频率。

3 各参数对大口径反射镜动态响应影响的分析

3.1 大口径反射镜有限元模型及模态分析

目前的大型激光装置都是由多路甚至上百路激光构成,这些激光在靶场中需要改变传输方向以便激光汇聚到靶点,对氘氚靶丸进行压缩。大口径反射镜架是用来改变激光传输方向的光学系统,原型装置中大口径反射镜架采用阵列化设计,每个大口径反射镜架由 4 个大口径光学元件和镜架组成。图 1(a) 为大口径反射镜架及光学元件的三维模型,采用带中节点的 Solid95 单元对模型进行网格划分,得到图 1(b) 所示的大口径反射镜架及光学元件

的有限元模型。

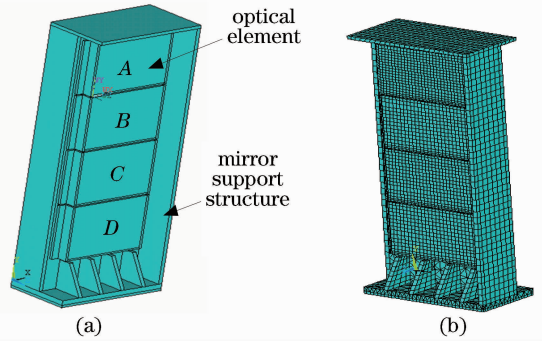


图 1 大口径反射镜架的(a)三维模型和(b)有限元模型
Fig. 1 (a) Three-dimensional and (b) finite element model of large-aperture mirror mount

大口径反射镜架光学元件尺寸为 $0.54 \text{ m} \times 0.34 \text{ m} \times 0.06 \text{ m}$,材料为 K9 玻璃,镜架材料为 45 钢。提取镜架 10 阶模态,为方便谱分析的求解同时扩展 10 阶模态,采用一致质量矩阵,得到大口径反射镜架结构前 10 阶固有频率,如表 1 所示。

表 1 大口径反射镜架 10 阶的固有频率

Table 1 Natural frequency of ten orders of the large-aperture mirror mount

Order	Natural frequency /Hz	Order	Natural frequency /Hz
1	29.816	6	278.99
2	56.779	7	328.08
3	89.545	8	357.14
4	192.90	9	382.59
5	264.23	10	4226.39

模态分析结果表明,大口径反射镜架一阶固有频率为 29.818 Hz,大口径反射镜架的低阶模态对镜架的响应起着主要的作用,大口径反射镜架的 1 阶模态为俯仰,2 阶模态为扭转,3 阶模态为俯仰加扭转,4 阶模态为弯曲。靶场激励功率谱密度频率范围为 $1 \sim 200 \text{ Hz}$,因此镜架的前 4 阶模态对镜架响应起主要作用。图 2 为镜架模型 1~4 阶模态的变形云图。根据大口径反射镜变形对光束指向的影响分析,1 阶和 2 阶模态变形对光束指向影响最大。

表 1 中得到的大口径反射镜架固有频率是根据工程设计中使用的材料参数以及大口径反射镜架初步设计结构得到的模态分析结构。实际上大口径反射镜架在随机振动激励下稳定性响应不仅与激励功率谱密度有关,同时还与光学元件及其支撑结构本身特征频率和阻尼等特征参数有密切的关系。

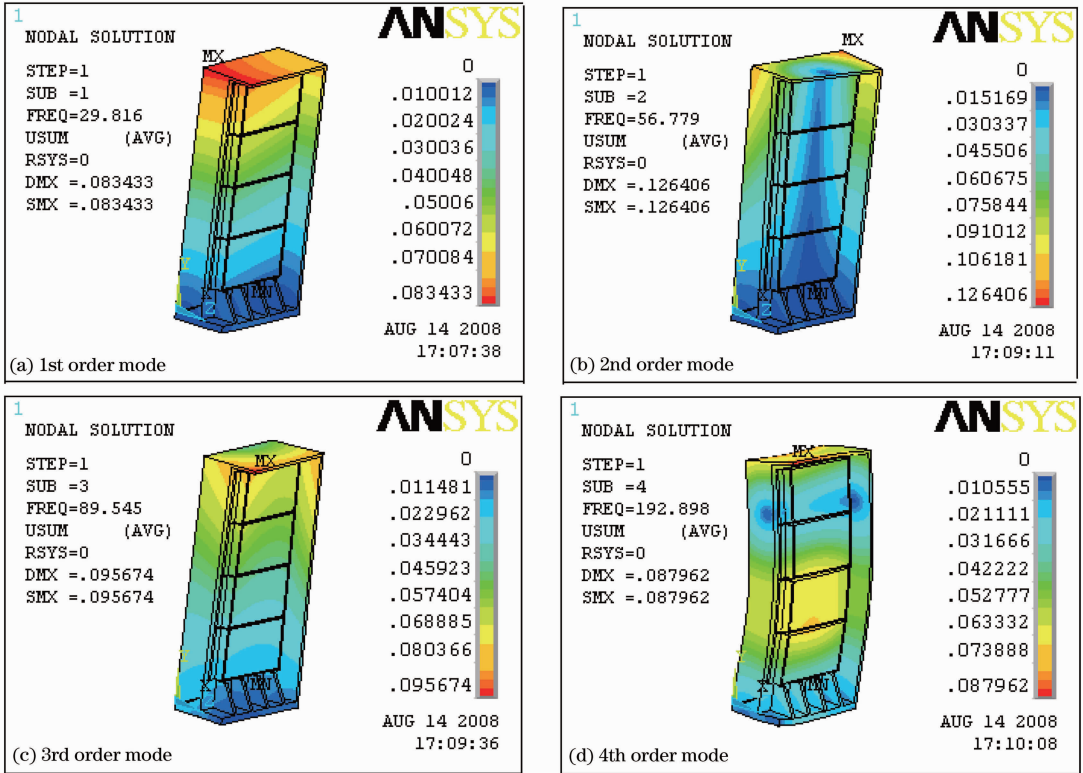


图 2 大口径反射镜架前四阶模态

Fig. 2 The first four order modes of large-aperture mirror mount

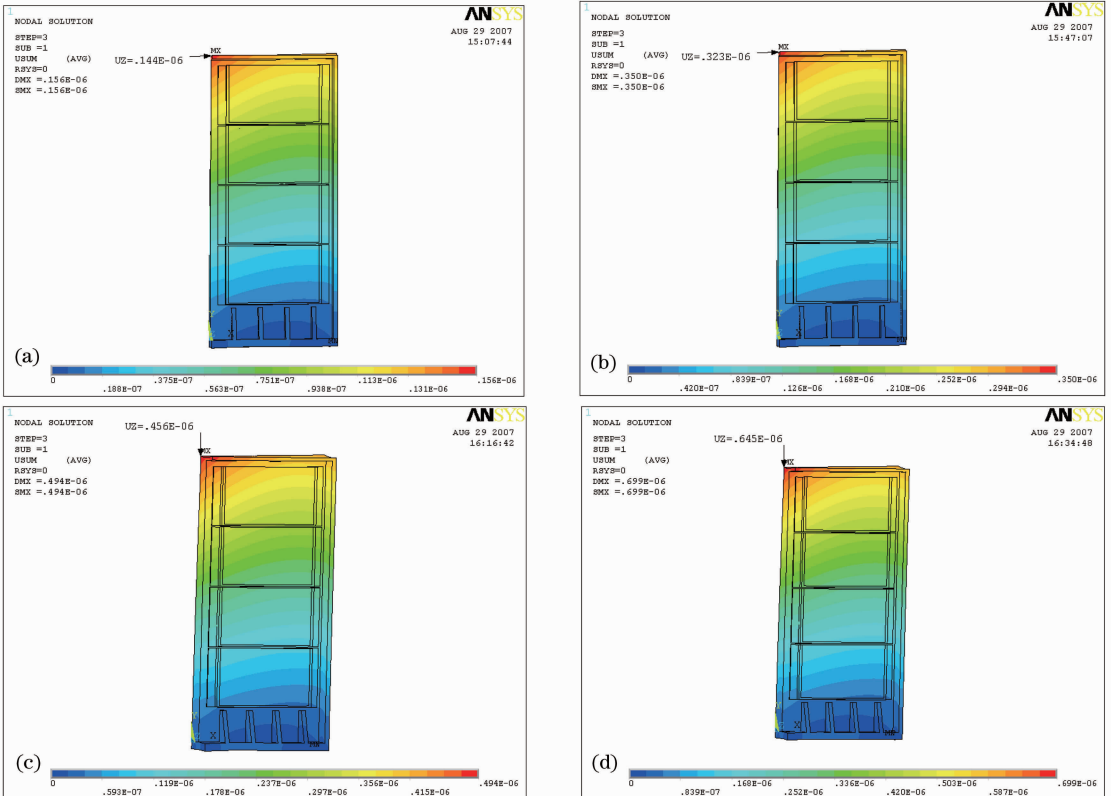


图 3 与不同激励对应的响应云图

Fig. 3 Response contour under different excitation

3.2 激励功率谱密度与响应之间的关系

NIF 装置在工程设计中推荐的功率谱密度在 1~200 Hz 范围为 $10^{-10} \text{ g}^2/\text{Hz}$ 。在本课题分析中, 激励谱激励谱范围为 1~200 Hz, 改变加速度功率谱密度的谱值。结构的模态参数见表 1。采用有限元法分析不同激励功率谱密度下结构响应。图 3 为不同激励功率谱密度对应的大口径反射镜架响应。

由图 3 可见在不同的激励功率谱密度作用下, 大口径反射镜架动态响应云图是一致的, 不同的只是响应的具体数值, 这说明在其他参数一定的情况下, 大口径反射镜架的响应与激励功率谱密度之间的关系是一定的。图 4 是根据施加不同的激励功率谱密度得到节点的最大变形与激励功率谱密度之间的关系曲线。

可见随着激励谱的增大, 大口径反射镜架响应在逐渐增加, 但增加的趋势在变缓, 即激励功率谱密度与大口径反射镜架的响应是非线性的关系, 随着激励功率谱密度的增大, 大口径反射镜架动态响应的增量在减小。

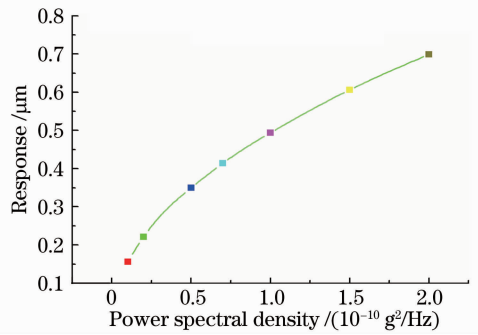


图 4 激励功率谱密度与响应之间关系

Fig. 4 Relation between response and excitation power spectral density

3.3 刚度与响应之间的关系

结构刚度对结构响应的影响可以采用相同的模型通过改变材料的弹性模量改变结构的刚度来分析。模型采用固定阻尼比为 0.005, 模型的激励谱在每个方向上都是 $10^{-10} \text{ g}^2/\text{Hz}$ 。图 5 是改变大口径反射镜架材料的弹性模量之后, 得到的大口径反射镜架的动态响应云图。

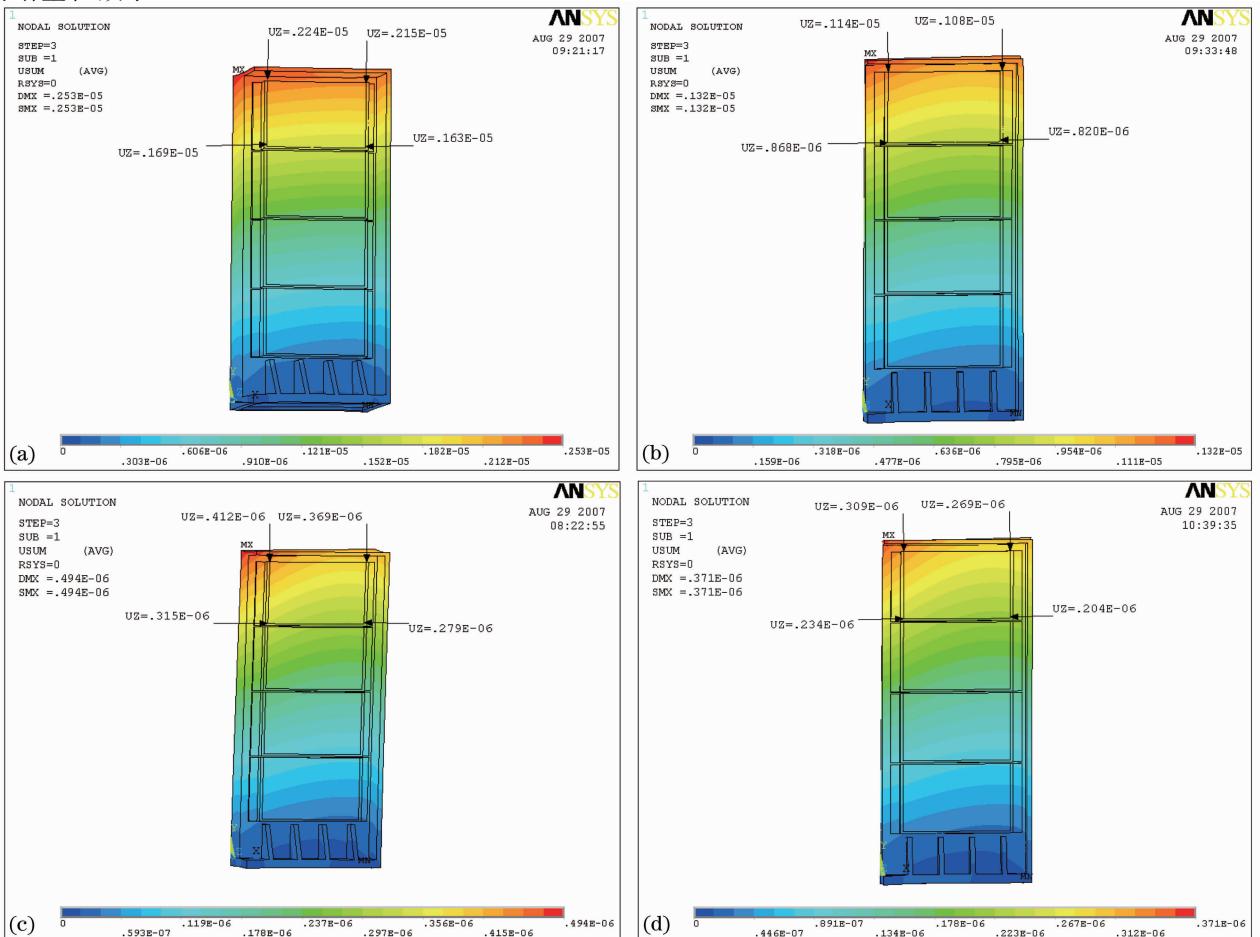


图 5 大口径反射镜架结构动态响应云图

Fig. 5 Structure dynamic response contour of the large-aperture mirror mount

由图 5 可见,给定大口径反射镜架材料设定不同的弹性模量,大口径反射镜架动态响应云图是一致的,区别是格节点的绝对数值不同,相对值是不变的。这说明在其他参数一定的情况下,大口径反射镜架的响应与材料弹性模量的关系是一定的。改变结构材料的弹性模量,结构的直接表现是固有频率

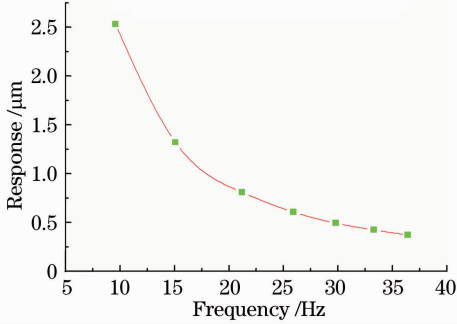


图 6 基频与结构响应关系曲线

Fig. 6 Relation between fundamental frequency and structural response

的降低。结构刚性的改变与结构的基频有密切的关系。图 6 和图 7 分别为结构弹性模量的改变与结构响应之间关系曲线。

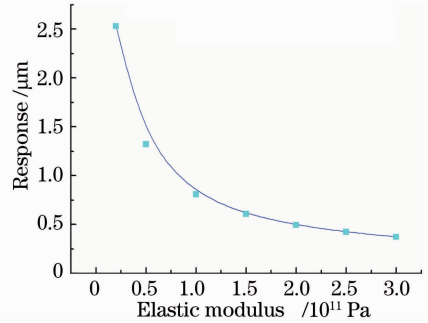
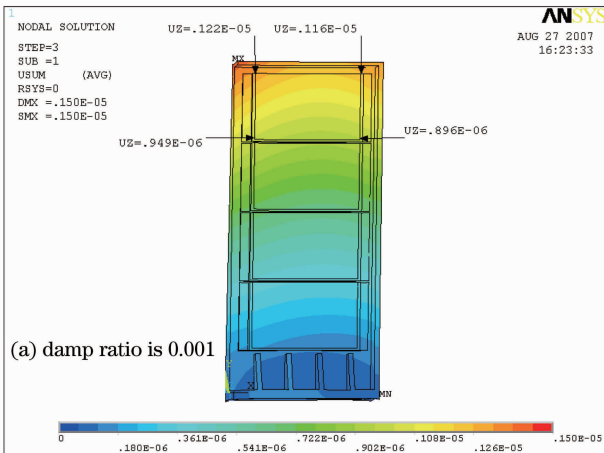


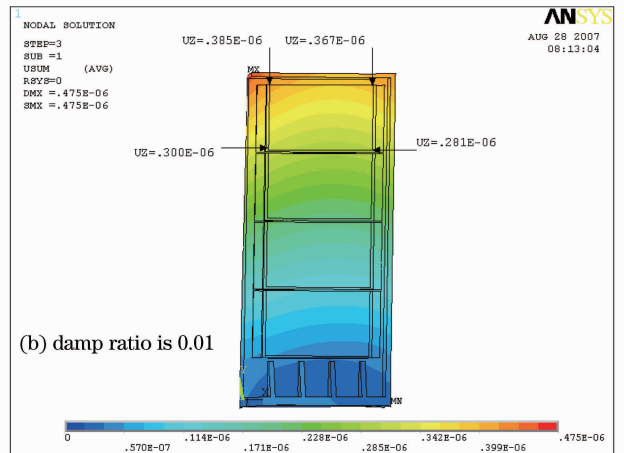
图 7 弹性模量与结构响应关系曲线

Fig. 7 Relation between elastic modulus and structural response

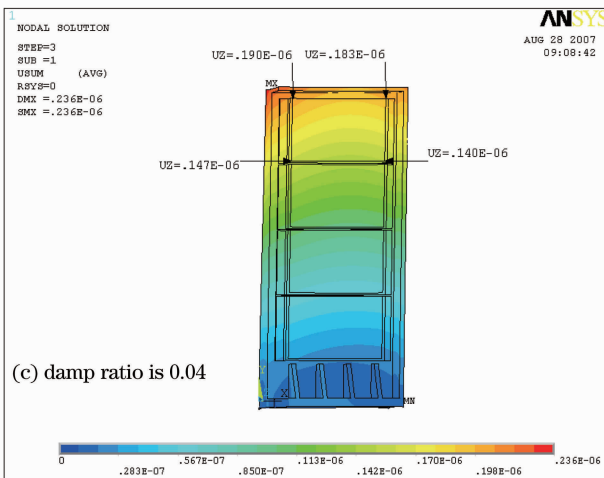
对比图 6 和图 7 可以发现,基频与结构响应关系曲线与材料弹性模量与结构响应关系曲线非常相似,这说明材料的弹性模量与结构的基频具有线性



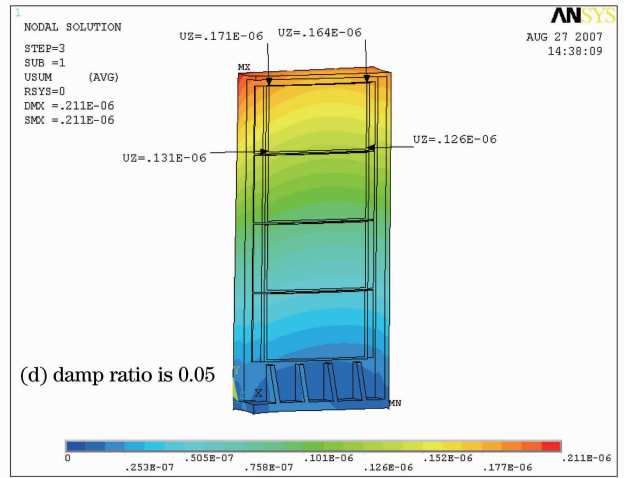
(a) damp ratio is 0.001



(b) damp ratio is 0.01



(c) damp ratio is 0.04



(d) damp ratio is 0.05

图 8 不同阻尼比下的结构响应

Fig. 8 Structural response with different damp ratio

的关系,它们之间的比值接近定值。由基频与结构响应之间的关系曲线还是可以发现,对多自由度系统而言,在平均功率谱密度的激励下,通过提高模型的基频来减小结构的响应是可行的,提高基频的措施包括提高材料的弹性模量和降低结构的等效密度等,但是随着基频的提高,成本会快速增加,而其效果在降低。

3.4 阻尼比与结构响应之间的关系

模型的固有频率如表 1 所示,模型在 1~200 Hz 范围的激励功率谱密度为 $10^{-10} \text{ g}^2/\text{Hz}$ 。图 8 为不同阻尼比下的结构动态响应。根据不同的阻尼比,选取大口径反射镜架在环境振动激励下的最大响应,图 9 为不同阻尼比下的结构响应曲线。由图 9 可见,随着阻尼比的增大结构的响应迅速减小,尤其是阻尼比在小于 0.01 时通过增大结构的阻尼比对减小结构的动态响应效果比较明显。分析发现结构的响应平方与阻尼比成反比。

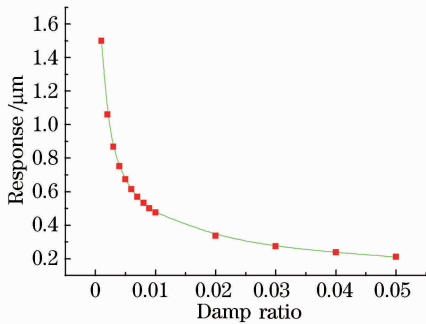


图 9 阻尼比与结构响应曲线

Fig. 9 Curve of structural response curve to different damp ratio

4 结 论

随着激励功率谱密度的增加,大口径反射镜架动态

响应增大,而随着大口径反射镜架刚性、阻尼比的增加,大口径反射镜架的响应在减小。从激励功率谱密度、基频以及阻尼比与大口径反射镜架动态响应关系曲线来看,减小激励功率谱密度和增大系统基频对减小大口径反射镜架的动态响应具有相近的效果,但都不如增加系统阻尼比效果明显。因此,减小系统动态响应,增大系统的阻尼比是减小大口径反射镜动态响应最有效的手段。但是从各参数与光学元件动态响应的关系来看,改变单一因素的边际效应在逐渐降低,而同是成本迅速增加,减小系统的动态响应,需要对阻尼、基频及隔振进行综合考虑。

参 考 文 献

- 1 D. J. Trummer, R. J. Foley, G. S. Shaw. Stability of optical elements in the NIF target area building[C]. *SPIE*, **3492**: 363~371
- 2 X. Zhang, F. Jing, Z. Sui *et al.*. Preliminary design of technical integration line (TIL) for SG-III laser facility[C]. *SPIE*, 1999, **3492**: 877~893
- 3 T. C. Sommer, E. S. Blis. Beam positioning[C]. *SPIE*, 1999, **3492**: 112~135
- 4 Zhang Dongfeng, Dai Yaping, Yin Xianhua *et al.*. Error analysis for the optical system of target area on high power laser facility [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(12): 1425~1428
赵东峰,戴亚平,尹宪华等. 高功率激光装置靶场光学系统的误差分析[J]. *中国激光*, 2004, **31**(12): 1425~1428
- 5 Zhang Junwei, Zhou Yi, Zhou Hai *et al.*. Influences of switchyard mirror mount on beam direction under micro vibration excitation[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2008, **20**(5): 779~783
张军伟,周 忆,周 海等. 微振动激励作用下编组站镜架对光束指向的影响[J]. *强激光与粒子束*, 2008, **20**(5): 779~783
- 6 Zhu Xuewang, Liu QInglin. On equivalent simulation of random vibration excitation dynamics in engineering[J]. *J. Experimental Mechanics*, 2007, **22**(6): 568~574
朱学旺,刘青林. 随机振动载荷动力学等效的一种工程实现方法[J]. *实验力学*, 2007, **22**(6): 568~574

栏目编辑: 胡 冰