

文章编号: 0258-7025(2009)08-1986-05

神光 II 升级装置中靶室系统的稳定性设计与分析

黄宏彪^{1,2} 曾台英^{1,2} 张涛^{1,2} 刘志刚¹ 朱健强¹

(¹中国科学院上海光学精密机械研究所高功率激光物理实验室, 上海 201800)
²中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要 从提高结构稳定性的基本理论出发,给出了神光 II 升级惯性约束聚变(ICF)靶室系统的初始结构方案,并利用有限元方法(FEM)对其进行模态分析,找出靶室系统初始结构的薄弱环节,进而对初始方案进行结构稳定性优化,最后对优化方案进行稳定性分析。优化与分析结果表明,当靶室的壁厚 T 为 50 mm,靶室支脚与垂直方向夹角 θ 为 27.2° ,支脚之间布置厚度 B 为 20 mm 筋板,筋板空间距离 H 为 120 mm 时,靶室系统可以获得很好的稳定性,随机激励作用下的平移均方根值为 $1.425 \mu\text{m}$,满足神光 II 升级装置对靶室系统的稳定性指标。

关键词 激光技术; 惯性约束聚变靶室系统; 结构稳定性; 有限元方法; 结构优化

中图分类号 TN248.1 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20093608.1986

Stability Design and Analysis of Target Chamber System in SG II Upgrade Facility

Huang Hongbiao^{1,2} Zeng Taiying^{1,2} Zhang Tao^{1,2} Liu Zhigang¹ Zhu Jianqiang¹

(¹Laboratory of High Power Laser Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)
²Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract Based on the fundamental theory of improving structure stability, an initial structure of target chamber system was designed. With finite-element method (FEM), modal analysis was proceeded for the target chamber system, thus the weak links were found. Based on the weak links of initial structure, the initial structure of target chamber system was optimized. At last, the stability analysis was proceeded for the target chamber system. The results of analysis indicates that the target chamber system can obtain good stability, when the thickness of target chamber (T) is 50 mm, the angle of support leg to vertical direction (θ) is 27.2° , the rib with thickness B of 20 mm is added between the support legs, and the space distance of the rib is 120 mm. The translational displacement root-mean square (RMS) is $1.425 \mu\text{m}$ which satisfies the stability requirement of target chamber system in SG II upgrade facility.

Key words laser technique; ICF target chamber system; structure stability; finite-element method; optimum structure

1 引言

随着高功率激光装置的不断发展,其结构越来越复杂,保证光束指向性不再是简单的调整问题,而是在结构设计和工程实施上必须全面考虑和认真把握的。惯性约束聚变(ICF)装置各光学元件在周围环境激励作用下引起的光束漂移误差是影响光束指

向性的主要原因,因此,为保证光束指向性(打靶精度),关键的问题是要保证各光学元件支撑结构的稳定性^[1~5]。

不同的固体激光装置,对打靶精度的要求也不同,比如:Nova 激光装置要求打靶精度小于 $30 \mu\text{m}$ (F 数:22);OMEGA 激光装置要求打靶精度小于

收稿日期: 2008-09-04; 收到修改稿日期: 2008-11-11

作者简介: 黄宏彪(1976—),男,博士研究生,主要从事高功率激光装置的结构稳定性研究。E-mail: hhb1026@163.com

导师简介: 朱健强(1964—),男,研究员,博士生导师,主要从事高功率激光驱动器的总体光学设计、结构设计以及相关检测技术和测控技术的研究。E-mail: jqzhu@mail.shnc.ac.cn

15 μm (F 数: 6.4); NIF 激光装置要求打靶精度小于 50 μm (F 数: 12.4)^[6~8]; 神光 II 升级装置要求打靶精度小于 30 μm (F 数: 5)^[8]。为了实现打靶精度指标, 需要研究各光学元件的稳定性, 根据误差分析理论, 为实现神光 II 装置的打靶精度 (小于 30 μm), 分配到升级 ICF 靶室系统的动态稳定性指标为: 最大平移误差不大于 5 μm ^[9,10]。在工程实施之前对其进行稳定性设计及分析具有很重要的意义, 不但能满足神光 II 装置打靶对升级 ICF 靶室系统的稳定性指标要求, 还能节省材料成本。本文从提高结构稳定性的基本理论出发, 采用有限元方法^[11~15], 对升级 ICF 靶室系统进行了稳定性设计, 得出了稳定性优化方案, 并进行了随机激励作用下的功率谱密度 (power spectral density, PSD) 响应分析, 满足了神光 II 升级装置对 ICF 升级靶室系统的稳定性指标。

2 结构稳定性理论

衡量结构稳定性的常用指标为动刚度, 其在数值上等于机械结构产生单位振幅所需的动态力。机械结构在动态力作用下, 动刚度越大, 振动量越小; 反之, 动刚度越小, 振动量越大。机械结构的动刚度, 不仅与它的静刚度有关, 还与它的质量、阻尼和振动频率有关。因此, 分析机械结构的振型及其动刚度特性, 研究提高动刚度的途径, 就能较合理地设计结构、消除结构中的薄弱环节、增强机构的抗振能力, 从而减小振动、避免自振、降低噪声以及减少材料消耗 (降低成本) 等^[16]。

机械结构的动刚度取决于机械结构本身的参数——静刚度、阻尼比和频率比。以单自由度系统为例, 动刚度的幅频特性为

$$k_{d0} = k \sqrt{(1 - \lambda^2)^2 + 2(\zeta\lambda)^2}, \quad (1)$$

式中 k 为静刚度, λ 为频率比, ζ 为阻尼比。根据 (1) 式, 可以做出动刚度与频率比 λ 的关系曲线, 即幅频特性曲线, 如图 1 所示。由图可知, 影响结构动刚度的几个参数 (静刚度、阻尼比、频率比) 在不同频率比范围内的影响是不同的, 在准静态区, 动刚度主要取决于静态刚度 k 和固有频率 ω_0 ; 在共振区, 动刚度主要取决于静刚度 k 和阻尼比 ζ ; 在惯性区, 动刚度主要取决于质量 m 。

经现场测试, 神光 II 升级装置靶场地面激励频率主要集中在 20 Hz 以下的低频段, 因此, 提高 ICF 升级靶室系统结构稳定性的目标为提高结构静刚度

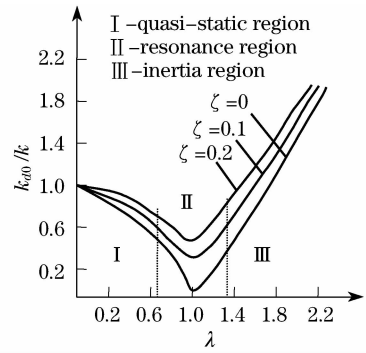


图 1 受迫振动的动刚度幅频特性曲线

Fig. 1 Dynamics stiffness versus frequency ratio in forced vibration system

和固有频率, 使第一阶固有频率大于 20 Hz。

3 ICF 靶室系统稳定性设计

图 2 为神光 II ICF 升级靶室系统的初始结构简化图。

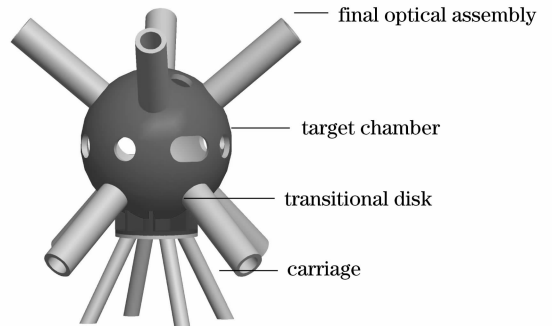


图 2 ICF 升级靶室系统初始结构

Fig. 2 Initial structure of target chamber system in upgrade facility

如图 2 所示, ICF 升级靶室系统主要由靶室、过渡盘和支撑架 3 部分组成。由于终端光学组件的质量较大 (500 kg), 与靶室法兰口对接后会影 响整体的稳定性, 因此将其与靶室系统视为一体进行研究。靶室、终端光学组件和过渡盘的材料为防锈铝, 支撑架材料为结构钢。由于 ICF 升级靶室法兰口较多, 为了简化分析, 模型中只建立了其中口径较大的法兰口, 并且不考虑法兰盖板对结构稳定性的影响。ICF 升级靶室系统初始简化结构中几个重要几何参数如表 1 所示。

为了对初始结构进行稳定性优化, 需对其进行模态分析, 找出其薄弱环节, 进而对结构进行优化。图 3 为初始结构的第一阶模态振型, 对应的模态频率为 10.29 Hz。

表 1 ICF 升级靶室系统初始结构几何参数

Table 1 Geometric parameters of target chamber system in upgrade facility

| Inner diameter of target chamber /mm | Thickness of target chamber T /mm | Outer diameter of carriage /mm | Thickness of carriage /mm | Setting angle of carriage $\theta/(\circ)$ |
|--------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|---------------------------|--|
| $\phi 2400$ | 93 | $\phi 260$ | 20 | 15 |

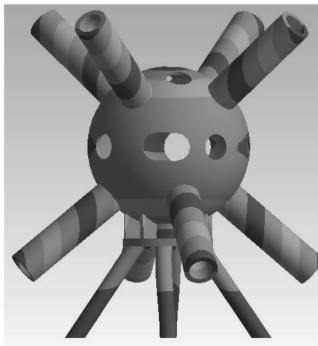


图 3 ICF 升级靶室系统初始结构第一阶模态振型

Fig. 3 First mode shape of target chamber system in upgrade facility

由模态振型可以看出,第一阶振型主要为绕垂直轴的转动,ICF 升级靶室系统的薄弱环节在支撑架,并且第一阶固有频率(10.29 Hz)处于靶场地面激励频率范围内(<20 Hz),容易产生共振。由于靶室系统基本处于刚体转动状态,因此,可以将 ICF 靶室系统简化为一质量与弹簧组合的单自由度振动系统,如图 4 所示。

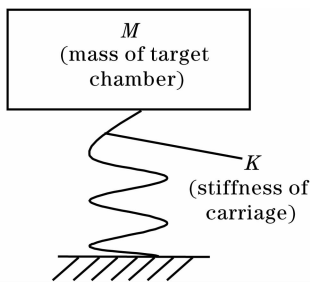


图 4 ICF 升级靶室系统的简化力学模型

Fig. 4 Simplified mechanical model of target chamber system in upgrade facility

为了提高结构稳定性,需提高其静刚度和固有频率。由振动理论可知,对于质量与弹簧组合系统,其固有频率可表示为

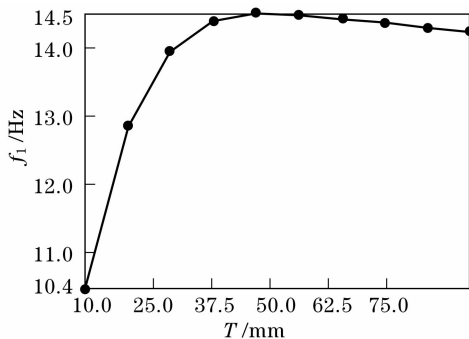
$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}, \quad (2)$$

由(2)式可知,提高静刚度和减小质量都可以提高固有频率,因此,减小靶室质量和提高支撑架刚度都可以起到提高固有频率的效果。

3.1 靶室壁厚优化

减小靶室质量可以提高固有频率,而靶室为薄

壳结构,减小质量可以从减小壳体壁厚 T 着手,这样不但提高了系统固有频率,还降低了材料成本。在靶室壁厚优化过程中,设定壁厚 T 为优化参数,将经验公式计算所得壁厚(93 mm)作为优化范围上限,其优化范围下限取 10 mm。靶室壁厚 T 与第一阶固有频率 f_1 的关系变化曲线如图 5 所示。

图 5 靶室壁厚 T 与第一阶固有频率 f_1 的关系变化曲线
ig. 5 First mode frequency versus thickness of target chamber

从图 5 可知,当靶室壁厚 $T=46.8$ mm 时(取整为 50 mm),靶室系统第一阶固有频率可以获得极大值 14.5 Hz。

由于在打靶过程中,靶室处于高真空状态($<1 \times 10^{-3}$ Pa),真空压力会使靶室产生较大的静态变形和应力集中,甚至会产生屈曲,因此,有必要对靶室进行静态稳定性校验。主要包括特征值屈曲载荷校验、应力极限校验和实验允许最大静态位移校验,其中,神光 II 升级装置允许 ICF 靶室系统的最大静态位移量为 3 mm。校验结果如表 2 所示。

由表 2 数据可知,当靶室壁厚 T 取 50 mm 时,满足静态稳定性的各项指标。

3.2 支撑脚安装角度优化

由材料力学理论可知,对于一端固支的杆状结构,其扭转刚度主要由杆的截面矩和杆的长度决定,对于靶室支撑架,可以将其近似为一变截面杆,因此,增加支撑脚安装角度可以增加其截面矩,从而增加扭转刚度,但由于靶室系统高度保持 3 m 不变,从而使支撑脚的长度也随着增加,这样会造成扭转刚度的损失,由此可见,一定存在某一角度使支撑架扭转刚度最优,即固有频率(第一阶)最高。图 6 为支撑脚安装角度 θ 与固有频率 f_1 的关系曲线。

表 2 ICF 靶室系统静态稳定性校验

Table 2 Static stability check of target chamber system

| Buckling load check | Yield stress check | Max displacement tolerance check |
|--|--|---|
| pressure load: 1.0×10^5 Pa | yield stress limit: 310×10^6 Pa | max displacement tolerance: 3 mm |
| calculated buckling load: 2.48×10^7 Pa | calculated max stress: 3.6×10^6 Pa | calculated max displacement: 0.15 mm |
| safety coefficient: $n=248$ | safety coefficient: $n=86$ | safety coefficient: $n=20$ |

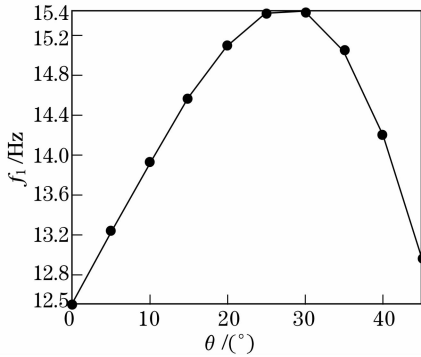


图 6 支撑脚安装角度 θ 与第一阶固有频率的关系曲线

ig. 6 First mode frequency versus setting angle of carriage

由图 6 可知,当支撑脚安装角度 $\theta=27.2^\circ$ 时,ICF 靶室系统可以获得固有频率峰值 15.4 Hz。

3.3 增加横向加强筋板

通过靶室壁厚与支撑脚安装角度优化后,ICF 升级靶室系统的第一阶固有频率为 15.4 Hz,仍然处于共振频率范围内 (<20 Hz),为使靶室系统不产生共振,需要提高第一阶固有频率,使其大于 20 Hz。具体方法为:在支撑脚之间焊接横向加强筋,增加其扭转刚度,从而提高固有频率。图 7 为横向加强筋示意图。

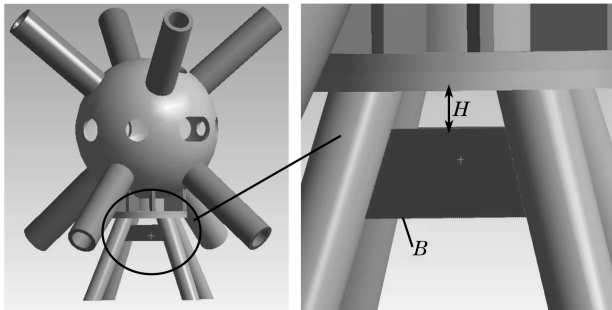


图 7 加强筋示意图

Fig. 7 Diagrammatic sketch of rib reinforcement

加强筋初始厚度 B 为 5 mm,上沿平面与支撑脚顶部平面的初始距离 H 为 200 mm,加强筋宽度 W 为固定值 400 mm。以厚度 B 和空间距离 H 为优化参数,以第一阶固有频率值 f_1 为优化目标进行优化,图 8 为第一阶固有频率 f_1 与厚度 B 及距离

H 的三维关系曲面。

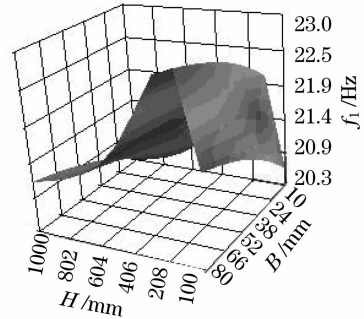


图 8 第一阶固有频率 f_1 与厚度 B 及距离 H 的三维关系曲面

Fig. 8 First mode frequency versus thickness and distance of rib reinforcement

由图 8 可知,距离 H 对 ICF 靶室系统第一阶固有频率 f_1 影响比较敏感,并且当 $H=120$ mm 时存在极值,而厚度 B 对第一阶固有频率影响较小,当厚度取 20 mm, H 为 120 mm 时,第一阶固有频率为 21.8 Hz >20 Hz,从而使其不与地面激励信号产生共振。

4 ICF 靶室系统稳定性分析

通过 ICF 靶室系统的稳定性设计,其稳定性优化方案为:1) 靶室壁厚 $T=50$ mm;2) 支撑脚安装角度(与垂直方向夹角) $\theta=27.2^\circ$;3) 横向加强筋板厚度 $B=20$ mm,筋板上沿离支撑架顶部距离 H 为 120 mm。为了评估 ICF 靶室系统优化方案的稳定性是否满足神光 II 升级装置打靶精度对 ICF 靶室系统的稳定性要求,需要对其进行稳定性分析,分析内容为地面随机激励作用下的 PSD 动态响应分析。输入信号为随机加速度 PSD 函数,加速度 PSD 值为 10^{-10} g^2/Hz ,频率范围为 1~50 Hz。图 9 为随机激励作用下 ICF 升级靶室系统 PSD 动态响应分析结果。

由图 9 可知,ICF 升级靶室系统在随机激励作用下的动态位移响应最大值为 $\sigma=0.475$ μm ,由于

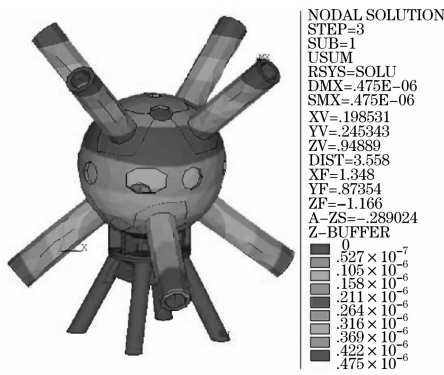


图 9 ICF 升级靶室系统 PSD 动态位移响应云图

Fig. 9 Dynamical displacement PSD response of target chamber system in upgrade facility

分析结果为统计值(RMS),为保证计算结果有较大的置信概率,这里取动态位移响应最大值为 $3\sigma = 1.425 \mu\text{m}$,置信概率为 99.7%。

5 结 论

利用有限元方法对 ICF 升级靶室系统进行了模态分析,找出靶室系统初始结构的薄弱环节,进而对初始方案进行结构稳定性优化,优化参数主要包括靶室壁厚 T ,支撑脚安装角度 θ 和横向加强筋的厚度 B 及空间距离 H ,最后对优化方案进行稳定性分析。优化与分析结果表明,当靶室壁厚为 50 mm,靶室支脚与垂直方向夹角 θ 为 27.2° ,支脚之间布置厚度 B 为 20 mm,空间距离 H 为 120 mm 的筋板时,靶室系统可以获得很好的稳定性,随机激励作用下的位移响应均方根值(RMS)为 $1.425 \mu\text{m}$,满足神光 II 升级装置对 ICF 靶室系统的稳定性指标,为神光 II ICF 升级靶室系统的工程设计及实施提供了稳定性依据。

参 考 文 献

- G. L. Tietbohl, S. C. Sommer. Stability design considerations for mirror support systems in ICF lasers[C]. *SPIE*, 1997, **3047**: 649~660
- V. Karpenko, W. Gibson, A. McDonald *et al.*. Target Area Systems[R]. UCRL-LR-105821-97-3, 166~179
- D. S. Ng, V. P. Karpenko, R. Wavrik. Target Area Structural Support Systems Design to Achieve the Micron-level Stability Requirement of the NIF[R]. UCRL-JC-115586, 1994, 1~5

- Mansour Tabatabaie, Stanley C. Sommer. Analysis of soil-structure interaction due to ambient vibration[C]. *Society of Mechanical Engineering/Japan Society of Mechanical Engineering Joint Pressure Vessels and Piping Conference*. San Diego, California, 1998, 26~30
- D. J. Trummer, R. J. Foley, G. S. Shaw. Stability of optical elements in the NIF target area building[C]. *SPIE*, 1999, **3492**: 363~371
- J. E. Murray, M. C. Rushford *et al.*. Precision Beam Pointing [R]. ICF Quarterly Report October-December 1993, **4**: 18~24
- J. M. Soares, R. L. McCrory, C. P. Verdon *et al.*. Direct-drive laser-fusion experiments with the OMEGA, 60-beam, >40 kJ, ultraviolet laser system[J]. *Phys. Plasmas*, 1996, **3**: 2108~2112
- J. Murray, J. Auerbach, J. Hunt *et al.*. Laser requirements and performance[R]. ICF Annual Report, 1997, 99~105
- Shi Zhiqian, 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
- Zhao Dongfeng, Dai Yaping, Yin Xianhua *et al.*. Error analysis for the optical system of target area on high power laser facility [J]. *Chinese J. Laser*, 2004, **32**(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, **32**(12): 1425~1428
- Qiao Zhanfeng, Zhao Dongfeng, Dai Yaping *et al.*. Stability analysis of final optical system of additional beam in "Shengguang-II" laser facility[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, **18**(3): 419~422
- 乔战峰, 赵东峰, 戴亚平 等. "神光-II" 第九路终端光学系统稳定性分析[J]. *强激光与粒子束*, 2006, **18**(3): 419~422
- Zhang Quanhui, Dai Yaping, Xie Hu *et al.*. Deformation analysis of large aperture mirror in ICF with FEM[C]. *Collection of Theses on High Power Laser and Plasma Physics*, 1999, 23~26
- 张全慧, 戴亚平, 谢虎 等. ICF 中大口径反射镜变形的有限元模拟计算[J]. *高功率激光及等离子体物理论文集*, 1999, 23~26
- 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
- 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
- Zeng Taiying, Huang Hongbiao, Zhang Tao *et al.*. Stability design and analysis of spatial filter system in Shengguang II facility[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2007, **19**(7): 1139~1143
- 曾台英, 黄宏彪, 张涛 等. 神光 II 装置中空间滤波器系统的稳定性设计与分析[J]. *强激光与粒子束*, 2007, **19**(7): 1139~1143
- G. I. Broman, A. P. Jonsson, M. P. Hermann. Determining dynamic characteristics of bellows by manipulated beam finite elements of commercial software[J]. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2000, **77**(8): 445~453
- Qu Weide, Tang Hengling. *Machine Vibration Handbook*[M]. China Machine Press, 2000. 737~795
- 屈维德, 唐恒龄. *机械振动手册*[M]. 机械工业出版社, 2000. 737~795