

文章编号 1004-924X(2018)11-2695-08

惯性约束聚变装置真空靶室组件 结构稳定性优化设计

黄 湛, 苏瑞峰*, 吴文凯, 胡 杰

(中国工程物理研究院 总体工程研究所, 四川 绵阳 621999)

摘要:真空靶室组件的结构稳定性对惯性约束聚变(ICF)装置的束靶耦合精度有重要影响,本文对真空靶室组件的结构稳定性进行优化设计。首先研究真空靶室组件的动态特性,求解其固有频率和振型;其次,分析支墩不同结构参数对真空靶室组件前三阶固有频率的影响,并由此建立结构参数影响固有频率的数学模型;最后,进行真空靶室组件的结构稳定性设计优化,求解真空靶室组件的最优结构。结果表明,优化后真空靶室组件的一阶固有频率为 14.44 Hz,满足 ICF 装置的设计要求。

关键词:ICF 装置;真空靶室组件;结构稳定性

中图分类号:TH122 文献标识码:A doi:10.3788/OPE.20182611.2695

Structural stability optimization for vacuum chamber assembly in inertial confinement fusion facility

HUANG Zhan, SU Rui-feng*, WU Wen-kai, HU Jie

(*Institute of Systems Engineering,*

China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621999, China)

** Corresponding author, E-mail: ruifsu@alu.hit.edu.cn*

Abstract: Structural stability of vacuum chamber assembly significantly affects alignment precision of laser beam and target in Inertial Confinement Fusion(ICF) facility. Structural stability optimization for vacuum chamber assembly is processed in this paper. Dynamic performance of vacuum chamber assembly was first studied. Natural frequencies and vibration modes were analyzed. Then influences of supporting frusta structural parameters on natural frequencies were investigated. And the model of influence was established. Last, the optimization of the supporting frusta structural parameters was carried out and the first natural frequency was improved to 14.44 Hz that satisfied the stability requirement of the ICF facility.

Key words: ICF facility; vacuum chamber assembly; structural stability

收稿日期:2018-02-09;修订日期:2018-05-02.

基金项目:国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. 2007AA804217)

1 引言

惯性约束聚变(Inertial Confinement Fusion, ICF)是可控核聚变的重要研究领域,多个国家建立了高功率激光驱动装置,其中以美国的“国家点火装置”(National Ignition Facility, NIF)^[1]、法国的“兆焦耳级装置”(Laser Megajoule, LMJ)^[2]和中国的神光 II^[3]、神光 III 装置^[4]为代表。这些装置的重要功能之一是导向多路高能激光束,使其焦点汇聚于靶点,实现高精度束靶耦合^[5]。束靶耦合的关键在于多路激光束的指向精度,即保证每一路激光束的焦点位于要求的范围之内。在 ICF 装置中,激光束在入射至真空靶室实现焦点汇聚前^[8-9]。导向传输需要经过反射镜、透镜光学元器件^[6-7],而在振动环境中,光学元器件会因结构响应而改变位置,导致激光束焦点出现偏离。由于光学元器件由支撑结构直接或间接支撑,因此支撑结构的结构稳定性是保证激光束指向精度的关键因素^[10]。

根据激光束的指向精度要求,对不同光学元器件的稳定性指标进行分配,进而确定相应支撑结构的稳定性要求,是进行支撑结构稳定性研究的基础^[11-13]。在此基础上,采用数值模拟方法对配置多种光学元器件的靶场整体结构稳定性进行分析,是评估 ICF 装置束靶耦合精度的有效措施^[14-16]。作为靶场结构的重要组成部分,真空靶室组件搭载了众多用于光束末端级控制的光学元器件,其结构稳定性对光学元器件的位置和姿态有重要影响^[17];而支墩作为真空靶室组件中的主要支撑结构,则直接影响真空靶室组件的结构稳定性^[18]。

本文研究了支墩对真空靶室组件结构稳定性的影响,并通过优化设计支墩结构,提高了真空靶室组件的结构稳定性。首先,分析了支墩结构参数对真空靶室组件动态特性的影响。其次,采用有限元方法求解了真空靶室组件的前三阶固有频率和振型,并分析了支墩不同结构参数对真空靶室组件固有频率的影响规律。再次,分析了支墩不同结构参数综合作用对真空靶室组件固有频率的影响,并建立了相应的数学模型。最后,以提高真空靶室组件一阶固有频率为目标,求解了支墩的最优结构。

2 真空靶室组件

真空靶室组件由真空靶室、防护层、横向支撑和支墩组成,如图 1 所示。真空靶室为铝合金球壳结构,内部空腔用于物理实验。真空靶室的外表面涂覆混凝土防护层,以屏蔽打靶产生的高能辐射。横向支撑为摩擦阻尼器结构,用于增加真空靶室的横向稳定性。横向支撑的一端与真空靶室固定连接,另一端与主体建筑(图 1 中未画出)连接。支墩位于真空靶室的底部,对真空靶室提供竖向支撑。支墩由钢筋混凝土制作,包括 4 个联接立柱和 3 个环形圆台。支墩顶层的环形圆台与真空靶室的底部法兰螺接,支墩底部与主体建筑的地基一体浇注。此外,底层的环形圆台与 4 个联接立柱的交界处设计 4 个凸台,与主体建筑连接,以进一步固定支墩。

支墩刚度是影响真空靶室组件结构稳定性的重要因素,它与支墩的结构参数有关。本文主要研究支墩以下 4 个结构参数对真空靶室组件结构稳定性的影响:回转角(θ)、扩张角(φ)、起始角(ϕ)和环形圆台厚度(t),每个结构参数代表的结构特征如图 1 所示。需要说明的是,支墩包括 3 个环形圆台,本文只研究顶层环形圆台的厚度,另外两个环形圆台的厚度取固定值。

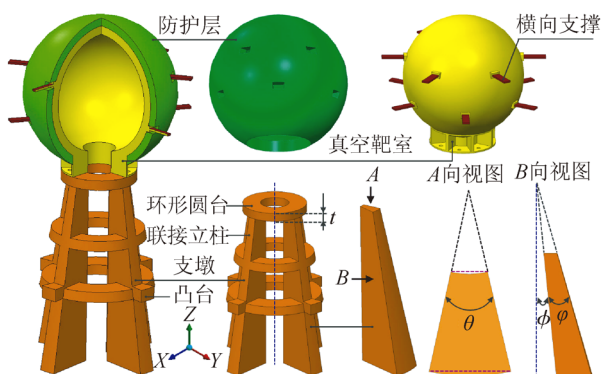


图 1 真空靶室组件结构示意图

Fig. 1 Structural diagram of vacuum chamber assembly

3 理论

3.1 结构的随机响应

真空靶室组件的工作环境复杂,环境中存在着多种振动激励,这些激励会引起真空靶室组件

的随机振动,这一振动可根据下面的公式进行分析:

$$E(y^2) = (\pi/2) \times (S_0 / \xi \omega^3), \quad (1)$$

式中: $E(y^2)$ 为结构的平稳均方响应,即结构在激励下的振动幅值, S_0 为随机激励的幅值, ξ 为结构的模态阻尼, ω 为结构的固有频率。由公式(1)可知,结构在激励下的振动幅值与模态阻尼和固有频率有关。其中固有频率的影响较大,当固有频率提高时,结构的振动幅值成三次方减小。因此,提高结构的固有频率是减小结构振动响应的有效途径。

3.2 结构的固有频率

固有频率是结构的本质属性,与结构的刚度有关,可根据下面的公式进行分析:

$$|\mathbf{K} - \omega^2 \mathbf{M}| = 0, \quad (2)$$

式中: \mathbf{M} 为质量矩阵, \mathbf{K} 为刚度矩阵,与结构的材料、形状和约束等因素有关。由公式(2)可知,对于一个特定的结构,当刚度提高时,固有频率相应提高。

3.3 结构刚度

对于由多个子结构组成的复杂系统而言,如本文所研究的真空靶室组件,系统的总刚度与每一个子结构的分刚度有关。机械动力学理论中,通常将复杂系统简化为弹簧系统,其中的子结构简化为单个弹簧,复杂系统的总刚度等效为弹簧系统的总刚度,子结构的分刚度等效为单个弹簧的刚度,总刚度与分刚度间的关系可以表示为:

$$K_{eq} = \sum_{i=1}^n K_i, \quad (3)$$

$$1/K_{eq} = \sum_{i=1}^n 1/K_i, \quad (4)$$

其中: K_{eq} 为弹簧系统的总刚度,即复杂系统的总刚度, K_i 为单个弹簧的刚度,即子结构的分刚度。式(3)和式(4)分别对应弹簧为并联结构和串联结构两种情况。

3.4 支墩的抗弯刚度和抗扭刚度

结构抵抗弯曲变形和抵抗扭转变形的能力分别称为抗弯刚度和抗扭刚度。抗弯刚度用 EI_z 表示, EI_z 越大,结构抵抗弯曲变形的能力越大。其中 E 为弹性模量,与结构的材料性能有关。 I_z 为弯曲变形横截面对中性轴的惯性矩,与弯曲变形横截面的尺寸参数有关。支墩联接立柱和环形圆

台的横截面分别为扇形和空心圆环,如图 1 所示。将扇形等效为等腰梯形,则联接立柱和环形圆台的抗弯刚度可表示为:

$$EI_z = E \frac{h^3(a^2 + 4ab + b^2)}{36(a+b)}, \quad (5)$$

式中: h , a 和 b 分别为梯形的高,上底长度和下底长度。

$$EI_z = E \frac{\pi D^4}{64} (1 - \alpha^4), \quad (6)$$

式中: D 为空心圆环的外径, α 为空心圆环的内外径之比。

抗扭刚度用 GI_p 表示, GI_p 越大,结构抵抗扭转变形的能力越大。其中 G 为剪切模量,与结构的材料性能有关。 I_p 为扭转变形横截面对扭转中心的极惯性矩,与扭转变形横截面的尺寸参数有关。支墩在联接立柱和环形圆台的横截面分别为扇形和空心圆环(见图 1)。将扇形等效为等腰梯形后,二者的抗扭刚度分别为:

$$GI_p = G \left[\frac{h^3(a^2 + 4ab + b^2)}{36(a+b)} + \frac{a^3 h}{12} + \frac{(b-a)^3 h}{144} \right], \quad (7)$$

式中: h , a 和 b 分别为梯形的高,上底长度和下底长度。

$$GI_p = G \frac{\pi D^4}{32} (1 - \alpha^4), \quad (8)$$

式中: D 为空心圆环的外径, α 为空心圆环的内外径之比。

3.5 有限元方法求解

理论上,真空靶室组件的固有频率可根据式(2)~式(8)进行求解。但由于真空靶室组件的结构和约束条件复杂,根据理论公式进行解析求解较为困难。因此,本文采用有限元方法进行求解,借助 ANSYS Workbench 软件进行数值模拟和计算。如图 2 所示,真空靶室组件的有限元模型主要包括真空靶室、防护层、横向支撑和支墩等部分,均采用实体单元划分网格。真空靶室的外表面与防护层的内表面之间设置绑定接触,以表征防护层涂覆于真空靶室外表面。真空靶室外表面与横向支撑的端面间设置绑定接触,以表征二者间的固定连接。横向支撑的另一端面全约束,表征横向支撑固定连接于主体建筑。真空靶室的底部与支墩顶层的圆台间设置绑定接触,以表征二者间的固定连接。支墩联接立柱的下底面全约

束,以表征支墩固定于主体建筑。凸台的端面全约束,表征凸台连接于主体建筑。真空靶室组件组成部分的材料性能如表 1 所示。

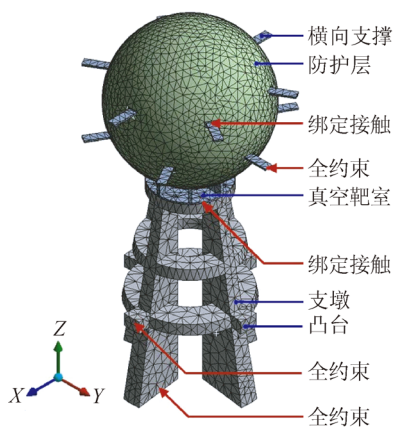


图 2 真空靶室组件的有限元模型

Fig. 2 Finite element model of vacuum chamber assembly

表 1 真空靶室组件的材料性能

Tab. 1 Material properties of vacuum chamber assembly

零件	材料	弹性模量/GPa	泊松比	密度/(kg·m ⁻³)
真空靶室	铝合金	68.95	0.30	2 700
防护层	钢筋混凝土	24.00	0.15	2 400
支墩	钢筋混凝土	31.50	0.15	2 400
横向支撑	铝合金	68.95	0.30	2 700

4 支墩对真空靶室组件模态特征的影响

4.1 真空靶室组件模态特征

计算得出真空靶室组件的前三阶固有频率和振型,如图 3 所示。一阶和二阶固有频率分别为 13.16 Hz 和 13.18 Hz,模态振型分别为整体结构沿 X 方向及沿 Y 方向偏摆,其中,支墩顶层环形圆台的偏摆幅度最大。真空靶室组件的三阶固有频率为 15.53 Hz,对应模态振型为整体结构绕 Z 轴扭转,其中真空靶室的扭转幅度最大。总的来说,真空靶室组件的前三阶模态主要与支墩的抗弯刚度和抗扭刚度有关,需要进一步研究支墩抗弯刚度和抗扭刚度对真空靶室组件模态特征的影响。

4.2 支墩结构参数的影响

4.2.1 单因素影响分析

真空靶室组件模态振型表明,前两阶固有频率主要与支墩的抗弯刚度有关,而抗弯刚度又与支墩的结构参数相关。当回转角增大时,联接立柱的等效梯形截面的上底边和下底边长度增加;当扩张角增大时,联接立柱的等效截面高度增加。由式(5)可知,上述两种情况下,联接立柱的抗弯刚度提高。此时,支墩结构 X 方向和 Y 方向的抗弯刚度提高,两个方向对应的一阶固有频率和二阶固有频率随之提高,如图 4(a)和 4(b)所示。

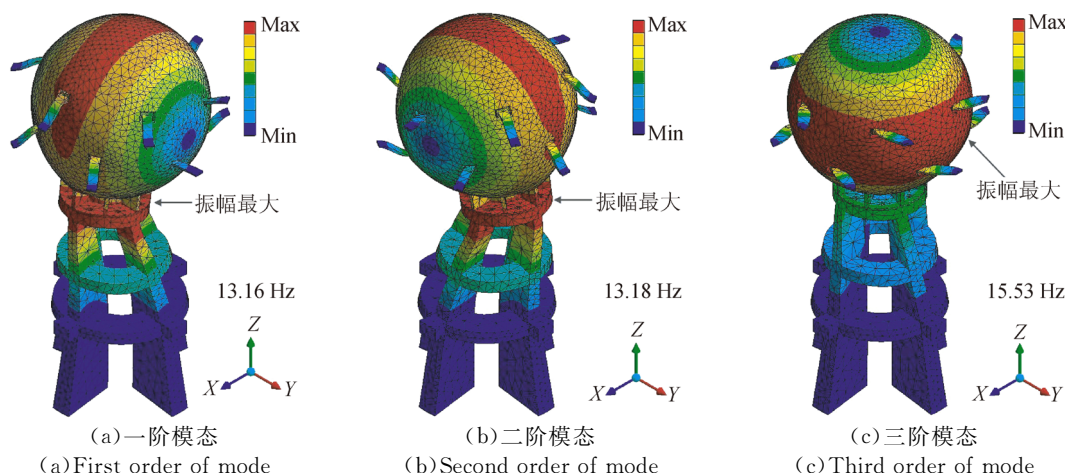


图 3 真空靶室组件前三阶模态

Fig. 3 First three orders of vibration modes of vacuum chamber assembly

当起始夹角增大时,联接立柱的外轮廓向外扩张。为保持环形圆台外径与联接立柱外表面始终相切,环形圆台横截面的外径随之增大。由公式(6)可知,环形圆台的抗弯刚度随之提高。当环形圆台厚度增大时,其抗弯刚度也将明显提高。环形圆台的抗弯刚度会影响支墩结构的抗弯刚度,提高 X 方向和 Y 方向的抗弯刚度将增大对应的一阶固有频率和二阶固有频率,如图 4(c)和 4(d)所示。

真空靶室组件的三阶振型主要与联接立柱和环形圆台的抗扭刚度有关。当回转角和扩张角分别增加时,联接立柱横截面的底边和高度均增大,由公式(7)可知,联接立柱的抗扭刚度提高;当起始角增大时,环形圆台横截面的外径增大,由

式(8)可知,环形圆台的抗扭刚度提高。此时,支墩的抗扭刚度也将提高,与此对应的三阶固有频率随之提高。增加环形圆台厚度其抗扭刚度和质量均得到提高。受此影响,支墩结构的抗扭刚度提高,并且质量增加。根据式(2),固有频率随支墩抗弯刚度的提高而增大,却随支墩质量的增大而减小。对于环形圆台厚度增加的情况,质量对固有频率的影响更大,所以三阶固有频率随环形圆台厚度的增加略有降低,如图 4(d)所示。需要说明的是,对于其它 3 个结构参数,也同样有刚度(抗弯刚度和抗扭刚度)和质量两方面的影响,但这 3 个结构参数在刚度方面的影响更大,所以固有频率随 3 个结构参数的增加而提高。

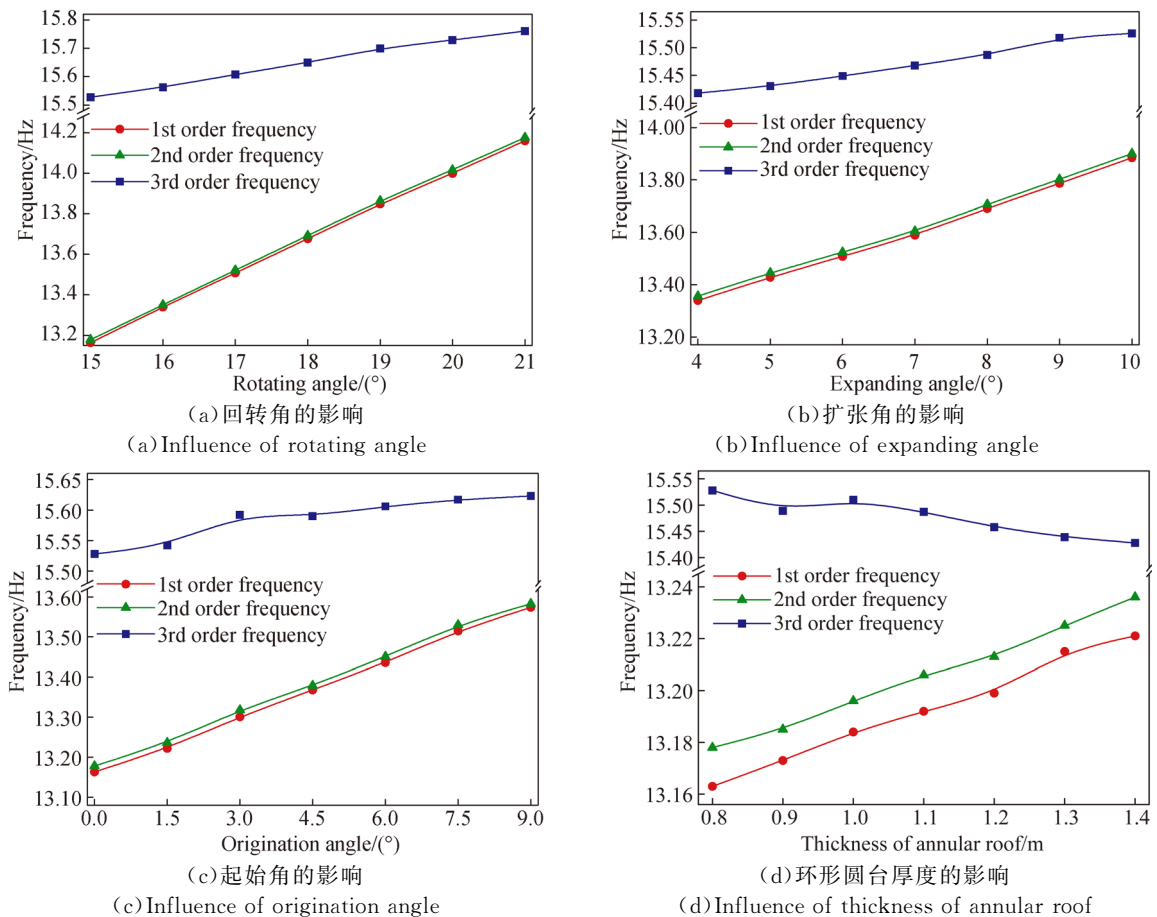


图 4 支墩结构参数对真空靶室组件前三阶固有频率的影响

Fig. 4 Influence of structural parameters of frusta on first three vibration modes of the vacuum chamber assembly

4.2.2 多因素综合影响分析

上述分析得出了回转角、扩张角、起始角和环形圆台厚度 4 个结构参数分别对真空靶室组件前三阶固有频率的影响,而实际上,4 个结构参数是

通过交互作用综合影响真空靶室组件固有频率的。为此,分别以回转角、扩张角、起始角和环形圆台厚度为自变量,以真空靶室组件前三阶固有频率为因变量,设计了四因素四水平的正交试验,回转角分

别取 15、17、19 和 21°, 扩张角分别取 4、6、8 和 10°, 起始角分别取 0、3、6 和 9°, 环形圆台厚度分别取 0.8、1.0、1.2 和 1.4 m。4 个自变量不同水平组合时, 真空靶室组件的前三阶固有频率如表 2 所示。

由表 2 可知, 不同结构参数发生变化时, 前三阶固有频率的变化幅度差异较大, 说明 4 个结构参数对前三阶固有频率的影响程度不同。

以 4 个结构参数为自变量, 以前三阶固有频率为因变量, 对表 2 中的数据进行回归分析, 可以分别得出 4 个结构参数影响前三阶固有频率的回归方程, 即结构参数影响固有频率的数学模型。省略不显著项, 得到的回归方程如下:

$$y_1 = 10.354 + 0.172x_1 - 0.105x_2 - 0.207x_3 + 0.268x_4 + 0.006x_1x_3 + 0.009x_2x_3 + 0.010x_2^2 + 0.003x_3^2, \quad (9)$$

$$y_2 = 10.425 + 0.170x_1 - 0.107x_2 - 0.217x_3 + 0.262x_4 + 0.007x_1x_3 + 0.010x_2x_3 + 0.011x_2^2 + 0.003x_3^2, \quad (10)$$

$$y_3 = 15.247 + 0.006x_1 - 0.032x_2 - 0.043x_3 - 0.048x_4 + 0.004x_1x_2 + 0.004x_1x_3 - 0.002x_2^2, \quad (11)$$

式中: y_1, y_2, y_3 分别为一阶、二阶和三阶固有频率, x_1, x_2, x_3 和 x_4 分别为回转角、扩张角、起始角和环形圆台厚度, x_1x_2, x_2x_3, x_1x_3 分别为交叉项, x_2^2 和 x_3^2 分别为二次项。回归方程的相关系数 (Adj R-Squared) 均超过 0.97, 表示回归方程具有较高的拟合精度。对表征各参数项影响程度的 F 值进行比较可知: 对一阶和二阶固有频率来说, 回转角影响最大, 环形圆台厚度的影响次之, 起始角的影响最小, 因此提高真空靶室组件一阶和二阶固有频率应优先考虑增大联接立柱回转角; 对三阶固有频率来说, 回转角影响最大, 起始角的影响次之, 环形圆台厚度的影响最小, 因此提高真空靶室组件三阶固有频率应优先考虑增大联接立柱的回转角。

表 2 支墩结构参数不同水平时真空靶室组件的前三阶固有频率

Tab. 2 First three vibration modes of vacuum chamber assembly with different structural parameters of frusta

方案	回转角/(°)	扩张角/(°)	起始角/(°)	环形圆台厚度/m	一阶固有频率/Hz	二阶固有频率/Hz	三阶固有频率/Hz
1	15	4	0	0.8	12.91	12.93	15.41
2	15	6	3	1.4	12.89	12.90	15.43
3	15	8	6	1	12.88	12.89	15.56
4	15	10	9	1.2	13.25	13.26	15.54
5	17	6	0	1.2	13.32	13.34	15.50
6	17	4	3	1	13.15	13.16	15.51
7	17	8	9	0.8	13.35	13.36	15.74
8	17	10	6	1.4	13.72	13.74	15.70
9	19	8	0	1.4	13.83	13.84	15.60
10	19	10	3	0.8	13.84	13.86	15.74
11	19	4	6	1.2	13.48	13.49	15.65
12	19	6	9	1	13.60	13.62	15.79
13	21	10	0	1	14.22	14.24	15.78
14	21	8	3	1.2	14.15	14.16	15.80
15	21	6	6	0.8	13.84	13.86	15.84
16	21	4	9	1.4	13.95	13.97	15.83

5 支墩结构优化设计

工程中主要关注真空靶室组件的一阶固有频

率, 由表 2 可知, 4 个结构参数的数值不同时, 一阶固有频率不同。受工程条件限制, 回转角、扩张角、起始角和环形圆台厚度的取值分别为 15~21°, 4~10°, 0~9° 和 0.8~1.4 m。以提高一阶固有频

率为目标,以 4 个结构参数为设计变量,采用式(9) 为目标函数,支墩结构优化问题可以描述为:

$$f_1 = 10.354 + 0.172x_1 - 0.105x_2 - 0.207x_3 + 0.268x_4 + 0.006x_1x_3 + 0.009x_2x_3 + 0.010x_2^2 + 0.003x_3^2 \rightarrow \max$$

$$\text{s. t. } 15 \leq x_1 \leq 21, 4 \leq x_2 \leq 10, 0 \leq x_3 \leq 9, 0.8 \leq x_4 \leq 1.4, \quad (12)$$

式中: f_1 为一阶固有频率,为目标函数; x_1, x_2, x_3 和 x_4 分别为回转角、扩张角、起始角和环形圆台厚度,为设计变量; s. t. 表示约束条件,即 4 个设计变量的工程限制条件。采用遗传算法求解公式(12),4 个设计变量的初始值由计算程序随机选取,大约迭代 60 次后,计算收敛。此时一阶固有频率收敛于 14.47 Hz,回转角、扩张角、起始角和环形圆台厚度分别收敛于 $20.99^\circ, 10.00^\circ, 6.55^\circ$ 和 1.37 m。对优化所得的结构参数进行取整,回转角、扩张角、起始角和环形圆台厚度分别取 $21^\circ, 10^\circ, 6^\circ$ 和 1.4 m,令这一结构方案为优化方案。对优化方案进行仿真计算,所得真空靶室组件的一阶固有频率为 14.44 Hz。对优化方案和初始方案($17^\circ, 4^\circ, 3^\circ, 1$ m 和 13.15 Hz)进行比较,优化后,真空靶室组件的一阶固有频率提高了 9.73%。

参考文献:

- [1] MOSESE I. The national ignition campaign: status and progress [J]. *Nuclear Fusion*, 2013, 53(10): 104020.
- [2] LION C. The LMJ program: An overview [J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2010, 244(1): 012003.
- [3] LIN Z Q, DENG X M, FAN D Y, et al.. SG-Ⅱ laser elementary research and precision SG-Ⅱ program [J]. *Fusion Engineering and Design*, 1999, 44(1): 61-66.
- [4] ZHU Q H, ZHENG W G, WEI X F, et al.. Research and construction progress of SG-Ⅲ laser facility [J]. *SPIE*, 2013, 8786: 87861G..
- [5] 刘炳国,刘国栋,浦昭邦,等. 惯性约束聚变束靶耦合的监测及精度分析 [J]. *光学精密工程*, 2009, 17(3): 542-548.
- LIU B G, LIU G D, PU Z B, et al.. Measurement and precision analysis on alignment of laser and target in ICF [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(3): 542-548. (in Chinese)
- [6] 邵建达,戴亚平,许乔. 惯性约束聚变激光激励装置用光学元器件的研究进展 [J]. *光学精密工程*,

6 结 论

为提高真空靶室组件的结构稳定性,本文研究了支墩对真空靶室组件结构稳定性的影响。对真空靶室组件的固有频率和振型进行了分析,结果表明固有频率和振型与支墩的结构参数有关,结构参数通过影响支墩的抗弯刚度和抗扭刚度而对真空靶室组件的模态特征产生影响。回转角、扩张角和起始角增大时,真空靶室组件的前三阶固有频率提高;环形圆台厚度增加时,真空靶室组件的前两阶固有频率提高,第三阶固有频率降低。根据支墩结构参数综合作用对真空靶室组件固有频率的影响,建立了支墩结构参数影响真空靶室组件固有频率的数学模型,对支墩进行结构优化设计,优化后真空靶室组件的一阶固有频率为 14.44 Hz,可以达到提高真空靶室组件固有频率的目的。

2016, 24(12): 2889-2895.

- SHAO J D, DAI Y P, XU Q. Progress on optical components for ICF facility [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(12): 2889-2895. (in Chinese)
- [7] 易葵,马平,邱红,等. 大口径传输反射镜的研究进展 [J]. *光学精密工程*, 2016, 24(12): 2902-2907.
- YI K, MA P, QIU H, et al.. Progress on large aperture transport mirrors [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(12): 2902-2907. (in Chinese)
- [8] ZHENG W G, WEI X F, ZHU Q H, et al.. Laser performance of the SG-Ⅲ laser facility [J]. *High Power Laser Science and Engineering*, 2016, 4(21): 445-453.
- [9] 苏瑞峰,陈晓娟,朱明智,等. KDP 晶体支撑系统工作姿态确定 [J]. *光学精密工程*, 2017, 25(3): 632-640.
- SU R F, CHEN X J, ZHU M ZH, et al.. Ascertainment of operating posture of KDP crystal supporting system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(3): 632-640. (in Chinese)
- [10] 冯斌,周忆,张军伟,等. 大型精密镜架地面随机微振动响应分析 [J]. *光学精密工程*, 2007, 15(3): 356-361.
- FENG B, ZHOU Y, ZHANG J W, et al.. Analy-

- sis on ground random vibration response of large-scale precision mirror mount [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(3): 356-361. (in Chinese)
- [11] TRUMMER D J, FOLEY R J, SHAW G. S, *et al.*. Stability of optical elements in the NIF target area building [R]. *Livermore: Lawrence Livermore National Laboratory*, 1998.
- [12] TIETBOHL G L, SOMMER S C. Stability design considerations for mirror support systems in ICF Lasers [R]. *Livermore: Lawrence Livermore National Laboratory*, 1996.
- [13] 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.
ZHAO D F, DAI Y P, YIN X H, *et al.*. Error analysis for the optical system of target area on high power laser facility [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2004, 32(12): 1425-1428. (in Chinese)
- [14] FOLEY R J, KARPENKO V P, ADAMS C H, *et al.*. Design of the target area for the National Ignition Facility [R]. *Livermore: Lawrence Livermore National Laboratory*, 1997.
- [15] 徐元利, 吴文凯, 陈学前, 等. ICF 装置靶场结构总体稳定性设计 [J]. *强激光与粒子束*, 2009, 21(10): 1485-1488.
XU Y L, WU W K, CHEN X Q, *et al.*. Structural systemic stability design of inertial confinement fusion facility target area [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2009, 21(10): 1485-1488. (in Chinese)
- [16] 王美聪, 陈刚, 黄湛, 等. 神光 III 主机装置编组站稳定性设计 [J]. *光学精密工程*, 2011, 19(11): 2664-2670.
WANG M C, CHEN G, HUANG Z, *et al.*. Stability design of switchyard in SG III facility [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(11): 2664-2670. (in Chinese)
- [17] 徐元利, 陈学前, 高海鹰, 等. 神光 III 主机装置真空靶室组件研制 [J]. *强激光与粒子束*, 2012, 24(11): 2623-2626.
XU Y L, CHEN X Q, GAO H Y, *et al.*. Development of vacuum target chamber component in shenguang-III laser facility [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2012, 24(11): 2623-2626. (in Chinese)
- [18] 黄宏彪, 曾台英, 张涛, 等. 神光 II 升级装置中靶室系统的稳定性设计与分析 [J]. *中国激光*, 2009, 36(8): 1986-1990.
HUANG H B, ZENG T Y, ZHANG T, *et al.*. Stability design and analysis of target chamber system in SG II upgrade facility [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2009, 36(8): 1986-1990. (in Chinese)

作者简介:



黄 湛(1972—),男,重庆涪陵人,硕士,高级工程师,1993年于成都科技大学获得学士学位,2002年于四川大学获得硕士学位,主要从事 ICF 装置光机结构设计。E-mail: huangz@caep.cn

通讯作者:



苏瑞峰(1984—),男,内蒙古鄂尔多斯人,博士,工程师,2008年、2010年和2015年于哈尔滨工业大学分别获得学士、硕士和博士学位,主要从事 ICF 装置精密光机结构设计。E-mail: ruifsu@al.uhit.edu.cn