

ICF 装置光束定位的结构稳定性设计

朱明智, 陈学前, 吴文凯, 徐元利, 陈刚

(中国工程物理研究院总体工程研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要: 激光驱动 ICF 装置的甚多束激光在打靶过程中需要高精度定位于靶面, 这就要求可以改变光束着靶点位置的光学元件满足定位误差指标要求。首先介绍光束定位误差分解方法, 在光束对准过程中和打靶前, 在多源激励作用下能改变光束着靶点位置的元件需要评估其支撑系统的稳定性设计, 发展了光学元件稳定性指标分解方法用于其支撑系统的稳定性评估。从基频、环境随机振动、模态阻尼的角度讨论了支撑系统振动稳定性设计思路。光学元件的通用支撑系统采用大而重的钢筋混凝土和钢结构的混合结构, 钢筋混凝土保证光学元件稳定性的同时, 钢结构提供结构设计的灵活性。采用有限元技术分析光学元件在宽频环境随机振动作用下的响应, 评估支撑系统的振动稳定性设计。描述了神光 III 宽频环境随机振动和光束定位误差的测量, 测量结果表明神光 III 支撑系统满足设计要求, 该技术能应用于激光驱动 ICF 装置支撑系统的设计。

关键词: 激光驱动 ICF 装置; 光束定位; 支撑系统; 结构稳定性

中图分类号: TH22 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.1106002

Structure stability design of beam positioning in ICF facility

Zhu Mingzhi, Chen Xueqian, Wu Wenkai, Xu Yuanli, Chen Gang

(Institute of Systems Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

Abstract: Within ICF laser system, many independent laser beams are required to be positioned on target with a very high degree of accuracy during a shot. Optical elements that are capable of moving a laser beam on the target must meet the pointing error budgets. The beam positioning error budgeting was provided. The stability allocation was developed for evaluating the performance of support systems when they were subjected to multiple sources of excitation that can cause motions of optical elements during the alignment procedure and before a shot. The vibrational stability design considerations of support systems on the fundamental frequency, ambient random vibration, and modal damping was discussed. The superstructures of optical elements were the relatively large and massive hybrid structure of reinforced concretes and steel frames or vessels. While the reinforced concrete portions provided optical elements stability, the steel portions afforded design flexibility. Finite element analyses of response of broadband ambient random vibration were performed to evaluate the vibrational stability design of support systems. Measurement on broadband ambient random vibration and beam positioning error in target area of SGIII

收稿日期: 2017-03-05; 修订日期: 2017-04-03

基金项目: 国家高技术研究发展计划(2007AA804217)

作者简介: 朱明智(1973-), 男, 副研究员, 博士生, 主要从事 ICF 装置机械设计与研究方面的工作。Email: zhuzmz@caep.cn

导师简介: 徐元利(1972-), 女, 研究员, 主要从事 ICF 装置机械设计与研究方面的工作。Email: xuyyl@caep.cn

was described. The measurement result show that its support systems meet the design requirements and these information can be used on similar ICF laser system.

Key words: ICF laser system; beam positioning; support system; structure stability

0 引言

神光III 主机装置于 2015 年完成建设, 采用 48 束口径为 36 cm×36 cm 激光打靶。装置主要分布于一个 24 m×122.7 m 激光大厅和一个 49 m×40 m 靶场内。在激光大厅内, 主放大系统的六套 4×2 束组构成一个束簇, 束簇安装在距实验室地面约 3.7 m 的平面内, 束组中心间距为 3 m。在靶场, 光束以单束方式引导和传输, 聚焦进入直径为 6 m 的真空靶室内打靶, 靶场支撑结构最大高度约 25 m。

神光 III 主机装置 48 束光束着靶点定位误差的要求为: 各光束在靶平面或等效平面上的质心点位置扰动不超过 30 μm。影响光束定位误差的主要因素是光束打靶前的准直和光束在准直完成至打靶期间的漂移, 这就要求可以改变光束着靶点位置的光学元件(如平面反射镜、透镜)具有足够的稳定性, 使各光束满足其稳定性设计要求。光学元件的典型支撑系统包括: 框、框支架、通用支撑、地基等。光学元件的稳定性设计要求是其支撑系统设计、材料选择的主要依据。

国内 ICF 装置光学元件支撑系统的稳定性设计主要开始于神光 III 原型装置。在神光 III 主机装置研制过程中, 充分借鉴了原型装置和 NIF 的光学元件支撑系统稳定性设计的成功经验^[1-5]。同时通过神光 III 主机装置支撑系统的设计、分析和建设, 进一步发展了激光驱动 ICF 装置支撑系统稳定性设计技术^[6-10]。在国内更大规模的 ICF 装置的研制中, 该稳定性设计技术可以应用于装置各功能模块和分系统结构稳定设计和评估工作。

在主机装置的设计中, 需要根据装置光路构型, 以及光学元件的口径、位置和作用进行装置功能模块分组; 同时存在多种影响元件平移或转动的激励源。因此需要开展装置功能模块误差分解, 以及明确影响元件稳定性的激励源及其相互关系, 开展稳定性误差激励源指标分解。

文中介绍 ICF 装置光束定位误差分解方法。在

光束对准过程中和打靶前, 在多激励源作用下光学元件的扰动会改变光束着靶点位置, 发展了光学元件激励源误差分解方法用于其支撑系统的稳定性评估。从基频、环境随机振动、模态阻尼的角度讨论光学元件支撑系统振动稳定性设计。介绍了神光 III 主机装置靶场结构稳定性设计, 靶场通用支撑系统采用大而重的钢筋混凝土和钢结构的混合结构, 钢筋混凝土保证光学元件稳定性的同时, 钢结构提供结构设计的灵活性。采用有限元技术分析光学元件在宽频环境随机振动作用下的响应, 评估整条光路的振动稳定性。描述地基宽频环境随机振动、部分结构件测点微位移、光束定位误差的测量。

1 误差分解

1.1 定位误差分解

光束定位误差的影响因素主要包括: 全系统准直精度, 即准直过程中全系统打靶光束调节精度和靶定位准直精度; 光束角漂移, 即在准直完成至打靶期间光束指向的稳定性。在定位误差分解中, 认为准直误差和稳定性误差都是随机误差, 且不相关的。主机装置光束定位误差分解和要求见公式(1)。

$$\sigma_{\text{定位误差}}^2 = \sigma_{\text{对准误差}}^2 + \sigma_{\text{稳定性误差}}^2 \leq (30 \mu\text{m})^2 \quad (1)$$

在光束定位误差分解中, 根据元件的口径、位置和作用进行光路功能模块分组, 先对各功能模块进行误差分解; 然后将各功能模块的定位误差要求转换成对功能模块内元件的定位误差要求。采用线性加权和法进行功能模块定位误差分解, 即根据各个功能模块扰动对打靶光束着靶点扰动的影响大小, 分别赋予权系数后进行分解。

主机装置划分的功能模块包括: 预放系统、主放大器系统、光束反转器系统、编组站和靶区系统、靶定位系统, 功能模块定位误差分解见公式(2)。

$$w_1 \sigma_{\text{预放}}^2 + w_2 \sigma_{\text{主放大}}^2 + w_3 \sigma_{\text{光束反转器}}^2 + w_4 \sigma_{\text{编组站和靶区}}^2 + w_5 \sigma_{\text{靶定位}}^2 \leq \sigma_{\text{定位误差}}^2 \quad (2)$$

其中, w_i 为各功能模块权重系数。根据光路构型, 计算各功能模块发生单位变化时打靶光束着靶点位置

变化量,归一化求出各功能模块的权重系统。

神光 III 主机装置编组站和靶区功能模块定位误差要求为 24.5 μm,参考 NIF 和原型装置的研制,编组站和靶区准直误差的平方占定位误差平方的 23%,为 11.8 μm;稳定性误差的平方占定位误差平方的 77%,为 21.5 μm。

1.2 激励源误差分解

元件的稳定性误差一方面通过控制激励源,另一方面通过元件支撑结构稳定性设计和工程实施来实现。稳定性误差激励源指标分配,即将元件稳定性误差指标合理地分配到相应的激励源,通过分析元件的激励源响应的评估结构稳定性设计,优化系统结构稳定性设计,实现元件稳定性误差要求。

影响 ICF 装置元件稳定性的激励源首先可以分为结构振动(>2 Hz)、温度漂移(<2 Hz)和偶发因素三大类;并且保守认为上述激励源相关,因此元件稳定性误差激励源指标分配表示为关系式(3)。

$$\sigma_{\text{稳定性误差}} = \sigma_{\text{结构振动}} + \sigma_{\text{温度漂移}} + \sigma_{\text{偶发因素}} \quad (3)$$

在 ICF 装置中,引起结构振动的激励源包括:宽频环境随机振动、局部振动、宽频声振动、气体压力波动、风振动、靶区和编组站声振动、靶区和编组站 HVAC 压力波动。认为上述振动对元件稳定性的影响是非相关的。

宽频环境振动是结构振动最主要的激励源,表示装置建筑周围振动的影响,包括附近运行的设备和各种地面交通工具,这些振动通过土壤和隔振地基与装置耦合,用装置隔振地基上表面功率谱密度表征所有这些振动的影响。

神光 III 主机装置激光大厅周围有外部建筑;编组站和靶区建筑设计有外墙,认为风振动不影响激光大厅、编组站和靶区的元件的稳定性。

参考 NIF 和原型装置的研制,主机装置编组站和靶区结构振动误差取 15 μm,占总稳定性误差的 70%。编组站和靶区宽频环境振动误差取 12.9 μm,占结构振动误差的 74%。

2 结构振动稳定性设计思路

ICF 装置通用支撑系统采用钢筋混凝土和钢结构的混合结构,目的是利用通用材料和加工工艺在大型光机通用支撑结构的设计中实现相对严格的稳定性指标。混合结构中的钢筋混凝土利于实现元件

的稳定性,钢结构保证结构设计的灵活性。

元件在宽频环境随机振动作用下的响应是结构稳定性误差的主要组成部分。在宽频环境随机振动作用下,元件的动态响应(平移或转动)由系统结构元件的质量和刚度、系统阻尼、载荷大小决定。在元件的支撑系统中,通用支撑系统的刚度最小,因此在元件支撑系统设计中,首先规定通用支撑系统的基频外,同时要求组件的基频比通用支撑系统的基频高 5~10 倍,这样可以认为组件的结构基本不影响元件的动态响应。

ICF 装置打靶精度要求通常为几十微米,元件通用支撑系统具有结构庞大的特点,元件的振动稳定性对地基的依赖性显著增加。装置激光大厅和靶场采用分离的地基,各自为整体的板式结构,整体板式结构利于实现与宽频环境振动输入之间的阻抗失配。神光 III 主机装置地基的设计要求为:实验室地基表面宽频环境随机振动的功率谱密度为 $1.0 \times 10^{-10} \text{ g}^2/\text{Hz}$ (频率范围为 1~100 Hz)。

如果将 ICF 装置元件支撑系统看作单自由度系统,此系统与原系统的基频和一阶振型相同,系统在宽频环境随机振动作用下的均方响应可以表示为公式(4)。

$$E[y^2] = \left(\frac{\pi}{2}\right) \cdot \left[\frac{S_0}{\zeta \cdot \omega_n^3}\right] = \left(\frac{W_0}{8}\right) \cdot \left[\frac{1}{\zeta \cdot (2 \cdot \pi \cdot f_n)^3}\right] \quad (4)$$

式中: S_0 为宽频环境随机振动的幅值; ζ 为模态阻尼; W_0 为宽频环境随机振动的幅值,等于 $4\pi S_0$; f_n 为系统频率。由公式(4)可以看出,随着基频的增加,元件均方响应成三次方降低,因此在 ICF 装置通用支撑系统的设计中,提高基频对降低结构响应具有明显的作用。当结构模态阻尼增加时,元件均方响应的减小和阻尼成反比,钢筋混凝土的模态阻尼约为钢的 4 倍,能大大减小元件响应。

在 ICF 装置支撑系统的设计中,采用有限元计算结果优化和明确设计。有限元计算中地基设置为刚性,采用计算结果乘以修正系数的方式考虑地基柔性的影响。参考原型装置的研制经验,神光 III 主机装置地基柔性修正系数取 1.6。

3 主机装置靶场结构稳定性设计

神光 III 主机装置靶场考虑传输光路排布、控制光学元件在宽频环境随机振动作用下的响应、以及辐射防护和操作空间,其通用支撑系统设计为大而重的编组站钢架和靶区钢筋混凝土建筑。

靶场建筑布局为长方体结构, 面积约为 49 m×40 m, 主要由靶区和光束编组站组成, 图 1 为靶场通用支撑系统。靶场外墙的厚度为 1.2 m。在打靶过程中, 外墙用于隔离环境温度变化和风载对光束着靶点的影响, 外墙位于靶场隔振地基外。

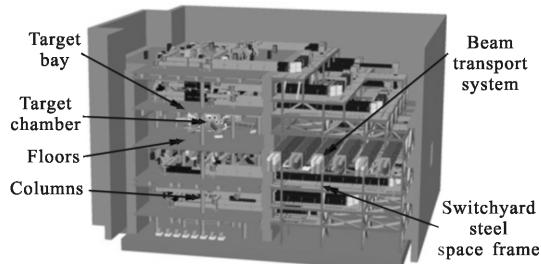


图 1 主机靶场支撑结构

Fig.1 Support structural of SGIII target field

光束编组站支撑结构为大型钢桁架, 满足传输反射镜, 即: LM1、LM2、LM3-1, 稳定支撑和位置精度要求。钢桁架整体尺寸为 34 m×20 m×26 m, 位于 1.5 m 厚的隔振地基上, 共九层, 其主结构由大矩形截面梁焊接而成。为减小传输反射镜在宽频环境随机振动作用下的旋转漂移, 采用靶区建筑为钢桁架提供横向支撑。编组站传输反射镜支架材料选用铝合金, 减少编组站负载。

靶区支撑主体为矩形墙、多层地板和柱。矩形墙厚度为 1.5 m, 同时作为靶区生物防护墙。靶区有六层地板, 地板支撑主体为厚度 1 m 的肋, 减轻地板重量。各层地板之间设计有支撑柱, 提高各层地板的弯曲刚度。在设计过程中, 对地板厚度, 柱的尺寸、位置和数量进行了优化。

真空靶室支撑结构包括垂直支撑和横向支撑两部分。垂直支撑为混凝土结构, 由多个立柱组成, 立柱顶部和其他合适的高度处通过三个水平圆环联接。靶室赤道面下方的两层地板伸出悬臂梁为靶室提供双环横向支撑, 增加靶室的横向支撑刚度。同时在地震情况下, 减少靶室所承受的地震载荷。

神光 III 主机装置靶场元件漂移与光束着靶点位置漂移的关系见公式(5)。

$$\sigma_{\text{Tdrift TB}}^2 = \Delta_{\text{Tar}}^2 + \Delta_{\text{FL}}^2 + \sum_i^n (2 \cdot \Delta\theta_i)^2 \cdot f_{\text{Tar}}^2 \quad (5)$$

式中: $\sigma_{\text{Tdrift TB}}$ 为靶场光束着靶点位置的漂移; Δ_{Tar} 为靶的平动漂移; Δ_{FL} 为聚焦透镜的平动漂移; $\Delta\theta_i$ 为传输反射镜的转动漂移; f_{Tar} 为聚焦透镜的焦距, 4 m; n 为传输反射镜数量。

图 2 所示为编组站和靶区整体结构有限元模型。在计算中, 地基表面 X 轴、Y 轴和 Z 轴方向输入的宽频环境随机振动功率谱密度为 $1.0 \times 10^{-10} \text{ g}^2/\text{Hz}$ (频率范围为 1~100 Hz)。表 1 为材料参数。采用模态叠加法分析元件宽频环境随机振动响应, 前几阶模态对结构位移响应影响较大, 表 2 给出了前六阶固有频率和振型描述。

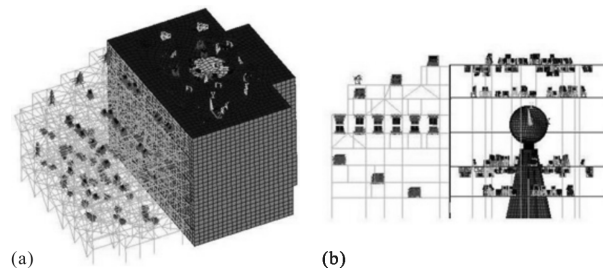


图 2 主机靶场有限元模型

Fig.2 Finite element model of SGIII target field

表 1 材料参数

Tab.1 Material parameters

Material	Elastic modulus/MPa	Mass density / $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	Poisson ratio
Reinforced concrete	3.15×10^4	2.45×10^3	0.15
Aluminium	7.0×10^4	2.7×10^3	0.3
Steel	2.0×10^5	7.8×10^3	0.3

表 2 主机靶场结构前六阶固有频率和振型

Tab.2 Front six intrinsic frequencies and mode shapes of SGIII target field structures

Order of mode	Frequency /Hz	Mode shape
1	8.09	Fundamental lateral mode of target area structures in north-south direction
2	8.32	Chattering of the frame of pedestrian channel in switchyard west
3	9.27	First bucking mode of target bay floors with the same vertical direction
4	10.4	Second lateral mode of target area structures in west-east direction
5	11.1	Second bucking mode of target bay floors with the 1 floor and 2 floor having different vertical direction with the 0 floor
6	11.2	Fundamental torsional mode of all target area structures

响应分析给出了 48 条光路的传输反射镜转动漂移、靶的平动漂移、聚焦透镜的平动漂移, 利用公式(5)得到各条光路的光束着靶点位置漂移和安全裕度。神光 III 主机装置靶场 48 条光路宽频环境随机振动作用

下的光束着靶点位置漂移的范围是 5.6~8.93 μm,安全裕度的范围是 1.44~2.30,设计要求的安全裕度是 1.2,因此主机装置靶场结构稳定性设计满足设计要求。

4 主机装置稳定性测量

4.1 微振动测量

对主机装置激光大厅和靶区的基础地脉动,以及部分结构件上的微振动和微位移进行了测试。测试系统配置主要包括:西门子公司 LMS 数据采集和分析系统、941B 伺服式传感器和 941 型放大器。该系统可直接测量加速度信号,位移信号通过速度信号经放大器硬件积分得到。

腔镜、滤波器中箱对应的地基测点的测量结果表明激光大厅基础地脉动加速度响应均方根量级为 10^{-5} g。编组站、靶区地基测点的测量结果表明靶场基础地脉动加速度响应均方根量级为 10^{-5} g。图 3 为编组站地基测点 Z 向加速度功率谱密度 (Power spectral density, PSD) 曲线。

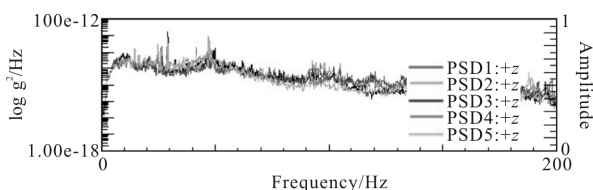


图 3 编组站地基测点 Z 向加速度 PSD 曲线

Fig.3 Z-direction acceleration PSD curves of switchyard ground measuring points

在真空靶室赤道上布置三个测点测量位移响应,采用板壳单元离散模型和实体单元离散模型对三个测点的位移进行计算,将计算结果和测试结果进行比较,见表 3,最大相对误差为 32.2%。

表 3 靶室三个测点的位移测试结果与计算结果的比较

Tab.3 Displacement comparison between measurements and calculations of three measuring points on target chamber

Measuring points	Results of measurement/m	Results of calculations/m	
		Plate and shell model	Dynamic stiffness equivalent model
1	4.287×10^{-8}	5.123×10^{-8}	5.038×10^{-8}
2	4.490×10^{-8}	5.724×10^{-8}	4.741×10^{-8}
3	3.929×10^{-8}	5.195×10^{-8}	5.147×10^{-8}

4.2 打靶精度诊断

主机装置采用 X 光针孔相机测量各束激光的打靶精度,即用激光打击带小孔的金平面靶,采集带小孔的 X 光图像,在图像中识别打靶的目标点和实际打靶点的坐标,计算打靶精度。

测量了各束组 8 束激光打靶点与目标点的偏差,对各束组六发次的 48 组数据计算得到各束组束靶耦合偏差的 RMS,范围为 15.3~26.0 μm,各束组束靶耦合偏差满足装置 30 μm 打靶精度要求。

5 结论

在 ICF 装置打靶精度分解中,首先,将打靶精度分解为准直误差和稳定性误差;然后,根据光路构型,以及元件口径、位置和作用将装置稳定性误差分解为各元件的稳定性误差;最后,将元件的稳定性误差分配到各激励源,其中宽频环境随机振动为最主要的激励源。

装置通用支撑系统结构稳定设计的技术途径主要有:利用混凝土建筑增加系统模态阻尼;采用隔振沟、减振器等措施降低激励源影响;采用适当的措施控制激励源;利用桁架和建筑一体化设计提高系统基频;靶场设计外墙结构,屏蔽外部风载和外部温度变化的影响;地基表面宽频环境振动设计载荷的 PSD 为 1.0×10^{-10} g²/Hz(1~200 Hz)。采用有限元技术评估元件响应,设计和分析迭代优化结构稳定性设计。神光 III 主机装置分析了宽频环境振动的元件响应,分析结果考虑了地基柔性影响并进行修正。

主机装置激光大厅和靶场地基的加速度 PSD 测量结果表明宽频环境随机振动设计载荷合理。真空靶室测点的位移测量结果与分析结果比较表明宽频环境随机振动元件响应的有限元分析合理。采用 X 光针孔相机测量了各束组激光打靶弹着点与目标点的偏差,对各束组六发次的的数据计算得到各束组靶耦合偏差,结果表明主机装置满足 30 μm 打靶精度要求。

参考文献:

[1] Tietbohl G L, Sommer S C. Stability design considerations for mirror systems in ICF lasers [R]. Livermore: Lawrence Livermore National Laboratory, UCRL-JC-125396, 1996.
 [2] Trummer D J, Foley R J, Shaw G S. Stability of optical

- elements in the NIF target area building [R]. Livermore: Lawrence Livermore National Laboratory, UCRL –JC – 129682, 1998.
- [3] Sommer S C, Bliss E S. Beam positioning [C]//SPIE, 1999, 3492: 112–135.
- [4] Noble C R, Hoehier M S, Sommer S C. NIF ambient vibration measurements [R]. Livermore: Lawrence Livermore National Laboratory, UCRL–ID–136914, 1999.
- [5] Burkhart S C, Bliss E, Nicola P Di, et al. National ignition facility system alignment [J]. *Applied Optics*, 2011, 50(8): 1136–1157.
- [6] Feng Bin, Zhou Yi, Zhang Junwei, et al. Analysis on ground random vibration response of large scale precision mirror mount [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2007, 15(3): 356–361. (in Chinese)
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.
- [7] Xie Na, Zhou Hai, Zhang Junwei, et al. Stability of optical elements in large laser facilities [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, 17(10): 2411–2417. (in Chinese)
谢娜, 周海, 张军伟, 等. 大型激光装置光学元件的稳定性设计[J]. *光学 精密工程*, 2009, 17(10): 2411–2417.
- [8] Wang Meicong, Chen Gang, Huang Zhan, et al. Stability design of switchyard in SGIII facility [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(11): 2664–2670. (in Chinese)
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.
- [9] Zhu Mingzhi, Wang Meicong, Chen Xiaojuan, et al. General layout and structure design of ICF facility [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(3): 701–708. (in Chinese)
朱明智, 王美聪, 陈晓娟, 等. 惯性约束聚变装置总体布局和结构设计[J]. *光学 精密工程*, 2013, 21(3): 701–708.
- [10] Wang Baoxu, Zhu Mingzhi, Chen Xiaojuan, et al. Mechanical analysis of 3 –DOF flexure optical mount structure[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(12): 3998–4005. (in Chinese)
汪宝旭, 朱明智, 陈晓娟, 等. 三自由度柔性镜框结构力学性能分析[J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(12): 3998–4005.