

文章编号 1004-924X(2013)03-0701-08

惯性约束聚变装置总体布局和结构设计

朱明智*, 王美聪, 陈晓娟, 吴文凯, 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:从工程角度系统分析了大型激光驱动惯性约束聚变装置(ICF)—美国的国家点火装置(NIF)和法国在建的兆焦耳激光装置(LMJ)的总体布局和总体结构设计的特点。NIF采用“U”型总体布局,可以提供优化的激光实验设备布局并允许未来增加第二靶室。LMJ采用“In-line”型总体布局,可以减小激光实验区输出光束至终端光学系统之间的光程,并为未来增加第二靶室提供了可能。文中指出,ICF装置的总体布局应满足物理实验以及稳定运行、集成和维护的要求。在此前提下,还应设计进一步发展所需要的接口。ICF装置总体结构设计中,光学元器件封装在光机组件内;在线可更换单元采用运动学支承定位。总体结构设计在结构布局和构型上应与总体光路设计相匹配,设计时需考虑功能性、稳定性和洁净度,满足光学元件,物理设备和光学诊断设备的安装定位、集成调试、运行维护的要求。

关键词:惯性约束聚变装置;总体建筑布局;总体结构设计

中图分类号: TL632 **文献标识码:** A **doi:**10.3788/OPE.20132103.0701

General layout and structure design of ICF facility

ZHU Ming-zhi*, WANG Mei-cong, CHEN Xiao-juan, WU Wen-kai, CHEN Gang

(*Institute of Structural Mechanics, China Academy of Engineering Physics,
Mianyang 621900, China*)

* *Corresponding author, E-mail: zhumz@caep.ac.cn*

Abstract: By taking the National Ignition Facility (NIF) from the USA and the Laser Mégajoule (LMJ) from the France for examples, this paper analyzes the general layout and general structure engineering features of Inertial Confinement Fusion (ICF) laser facility. NIF is designed with a U-shaped building layout, and it not only can provide an optimum laser experimental equipment configuration but also allow the equipment to attach a second target chamber in future. The bundles of LMJ are arranged in an in-line building. Its layout decreases the optical path-length between the output of each beamline and the focusing system also provides an option for a second target chamber exists. The paper suggests that the general layout of an ICF laser facility should meet the requirements of the physical experimental purposes and should be characterized by operation stability, good integration and higher maintainability. Furthermore, it should design convenient interfaces for future development. In overall design of the equipment, optical elements are packaged into a optical-mechanical assemblies, and replaceable units (LRUs) are assembled with kinematic mounts. The general structure of ICF design should match the arrangement of the laser beams in structural layout and configuration.

收稿日期:2012-10-29;修订日期:2012-11-27.

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

Moreover, the structure design can not dispense with the function, stability and cleanliness. The assignments of general structure design should meet the requirements of the installation and localization, integration and debugging, operation and maintenance of the optical components and the physical/optical diagnostic equipment.

Key words: Inertial Confinement Fusion(ICF) facility; general building layout; general structure design

1 引言

用于惯性约束聚变(Inertial Confinement Fusion, ICF)研究的大型固体激光器规模庞大,功能需求复杂,部组件数量众多。目前世界上规模最大的 ICF 装置有美国于 2009 年建成的国家点火装置(National Ignition Facility, NIF)和法国在建的兆焦耳激光装置(The Laser Mégajoule, LMJ)。美国 NIF 采用 192 束 400 mm×400 mm 激光打靶,能量为 1.8 MJ,功率为 500 TW^[1-6]。法国 LMJ 采用 240 束 400 mm×400 mm 激光打靶,能量为 1.8 MJ,功率为 550 TW^[7-11]。

美国 NIF 和法国 LMJ 都包括激光实验区和靶场,其中靶场包括编组站和靶区。从激光实验区主放大器输出的多束光束以 4×2 光束为一个束组,各束组并行排布。各束组从激光实验区进入靶场后,以 2×2 光束为一个集束进行光路排布,各集束在编组站和靶区经过传输反射镜的引导,由并行排布的空间布局转换为球形空间布局,从而通过终端光学系统以特定的角度进入靶球打靶。国内 ICF 装置的规模不断扩大,目前在建的神光Ⅲ主机装置采用 48 束 360 mm×360 mm 激光打靶,与 NIF 和 LMJ 的区别在于神光Ⅲ主机装置从激光实验区输出的并行束组在靶场以单束方式进行传输^[12-14]。

NIF 的“U”型总体布局可以为激光/物理实验设备提供最优布局,同时允许在未来增加第二靶室。NIF 包括 2 个激光实验区和一个靶场,从 2 个激光实验区输出的光束进入靶场编组站后转向,从 2 个方向进入靶区。LMJ 的“In-line”总体布局可以尽量减小光束在靶场的传输光程,同时允许在未来增加第二靶室,LMJ 的 2 个激光实验区位于靶场实验区两侧,从激光实验区输出的光束直接从两侧进入靶场编组站。为满足光路排布的需要,主机装置采用“L”型总体布局,激光实验

区输出的光束经过编组站编组后从一侧进入靶区。

在 NIF、LMJ 和神光Ⅲ主机装置的总体结构中,光机组件采用模块化设计,光机系统由光路底层结构和模块化组件组成,光路底层结构和模块化组件之间采用运动学支承结构联接,以保证快速安装、更换和维修。

本文从工程角度系统分析了大型激光驱动 ICF 装置(美国 NIF,法国 LMJ)总体布局和总体结构设计的特点,从结构设计的角度总结了大型 ICF 装置总体布局和总体结构设计需要考虑的主要问题,同时介绍了神光Ⅲ主机装置总体布局和总体结构设计的情况。

2 总体布局

2.1 NIF 总体布局

NIF 有 192 束激光光束,采用“U”型总体布局形式,如图 1 所示。NIF 包括 2 个激光实验区和一个靶场,从 2 个激光实验区输出的光束进入靶场编组站后转向,从 2 个方向进入靶区。NIF 采用“U”型总体布局的主要目的是提供最优的激光实验设备布局,以及允许在未来增加第二靶室。

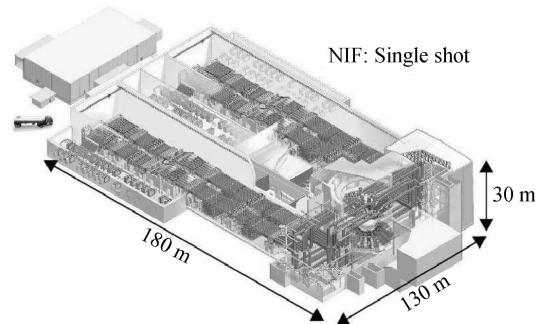


图 1 美国 NIF“U”型总体布局
Fig. 1 “U” general layout of NIF

NIF 主放大级采用了 4×2 阵列的激光束组形式,每个激光束组包括上下 2 个集束(2×2),并

且以6个为一组对激光束组阵列进行集成(激光束组族)。这种布局方式可以大大减小激光实验区的宽度,即减少洁净空间的体积,从而减少实验室的建设成本,尤其是装置运行成本。NIF包括2个面积约3 200 m²激光实验区。

NIF在靶场实验区以集束(2×2)为单位进行光路排布,光束在光束编组站转向后从2个方向进入物理实验区。48个2×2集束从上下注入靶室,集束入射角度(半球):~23.5°(4)、~30°(4)、~44.5°(8)、~50°(8)。入射孔采用圆形开孔,直径1 120 mm,方形法兰。采用不等光程光束传输,采用4~5块传输反射镜,光程为62~74 m。每个激光束组族的12个集束分别注入靶球的四分之一区域。图2为NIF靶场光传输系统。

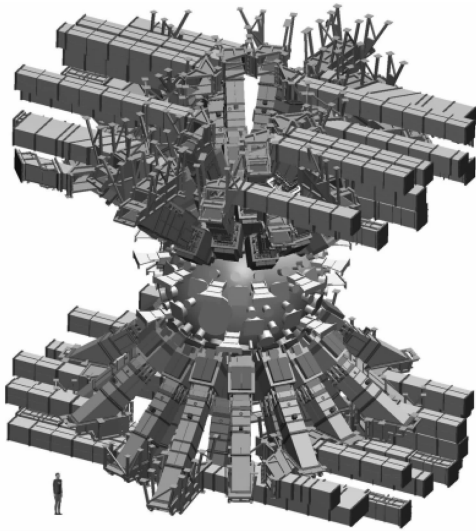


图2 NIF靶场光传输系统

Fig. 2 Beam transport system of NIF

为满足靶场实验区光路排布的需求,以及考虑开展直接驱动物理打靶实验光路调整的需求,NIF的靶场实验区包括2个大型钢结构光束编组站,光束编组站中间为圆桶状的物理实验区。

2.2 LMJ总体布局

LMJ装置有240束激光,总体布局为2个激光实验区和靶场实验区成“In-line”型排布,2个激光实验区排布在靶场实验区两侧,见图3。采用“In-line”型总体布局的主要目的:减小激光实验区输出光束至终端光学系统之间的光程,以及允许在未来增加第二靶室。

LMJ装置的主放大级采用了4×2阵列的激光束组形式,与NIF不同,LMJ采用了分离的激

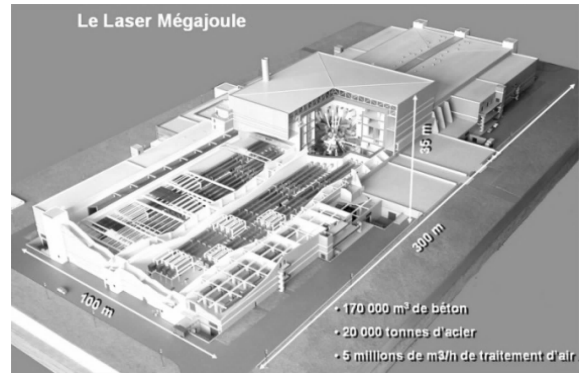


图3 法国LMJ装置总体布局

Fig. 3 General layout of LMJ

光束组排布形式。LMJ靶场两侧的激光实验区包括2个适度集成的激光区,每个激光区的激光束组数不同,分别有8个激光束组和7个激光束组。这种适度集成的激光实验区总体布局减小了装置主放大系统设计、制造、安装集成的难度以及后期运行维护的难度,但是增加了激光实验区的宽度,即增加了洁净空间的体积,也相应增加了实验室的建设成本,尤其是装置后期的运行成本。

LMJ光束从4个激光厅进入靶场实验区,在靶场实验区以集束(2×2)为单位进行光路排布,光束通过光束编组站进入物理实验区。60个2×2束组从上下注入靶室,集束入射角度(半球):~33°(10)、~49°(10)、~59.5°(10)。入射孔采用方形开孔,尺寸为846 mm×792 mm,方形法兰。采用等光程光束传输,采用5~7块传输反射镜,光程约40 m,图4为LMJ靶场光束传输系统。

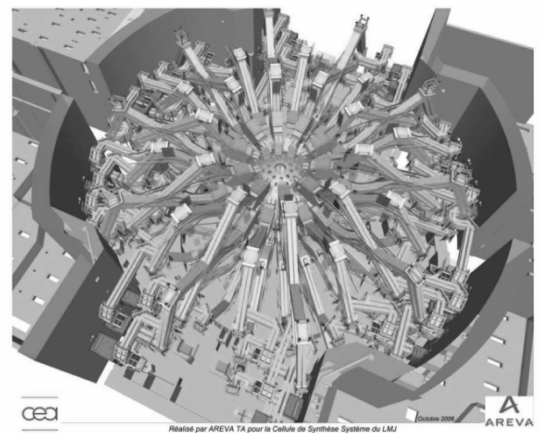


图4 LMJ靶场光传输系统

Fig. 4 Optical transmission system of LMJ

LMJ 为“*In-line*”型排布,激光实验区相对于靶室的对称性强于 NIF,同时分离的主放大级布局可以实现激光束组的前后交错排布,因此靶场实验区光路排布易于实现等光程光路排布,光程较短。同时光束编组站的结构简单,尺寸减小,靶场实验区可以避免采用大型钢结构编组站,但是物理实验区的排布空间受到一定的限制,因为 LMJ 间接驱动和直接驱动可能采用相同的光束入射孔,需要在靶区调整直接驱动光路,因此靶场实验区靶区为大型铝架支撑结构。

2.3 神光Ⅲ主机装置

主机装置有 48 束激光,采用“L”型总体布局形式,图 5 为主机装置总体布局。主放大系统输出的激光束从靶场的一侧进入,经过编组站编组后从特定的位置进入靶区,图 6 为主机装置光路排布。

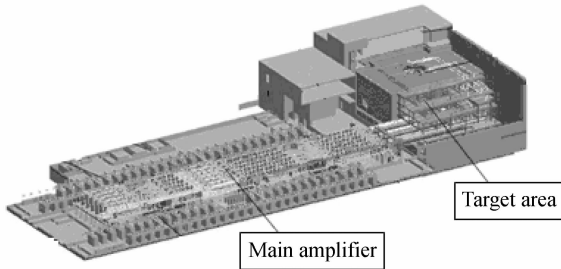


图 5 主机装置总体布局

Fig. 5 General layout of ShenGuang III

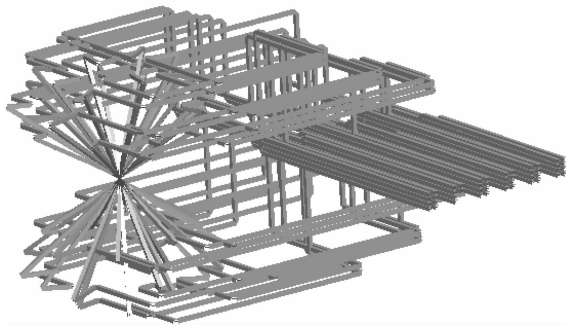


图 6 主机装置光路排布

Fig. 6 Optical arrangement of ShenGuang III

与 LMJ 相似,主机装置在主放大级采用分离的 4×2 阵列的激光束组,图 7 为主机装置激光实验区。其集成度与 LMJ 相当,6 个激光束组的面积约为 $3\ 000\text{ m}^2$ 。

主机装置在靶场以单束光为单位进行光路排

布,靶场实验区包括一个物理实验区和一个大型钢结构光束编组站。主机装置的 48 束光束从一个方向进入物理实验区,见图 8,采用等光程光束传输,光程长约 86.5 m 。为满足 48 束激光光程差为零的要求,相对 NIF 而言,主机装置增加了反射镜的数量,用于调节光传输路径长度。主机装置通过 276 块传输反射镜完成全部光束的引导传输。

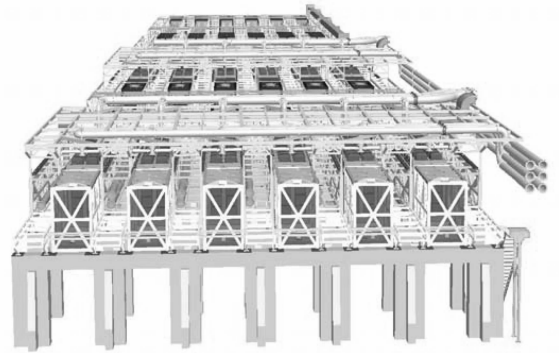


图 7 主机装置激光实验区

Fig. 7 Laser bay of ShenGuang III

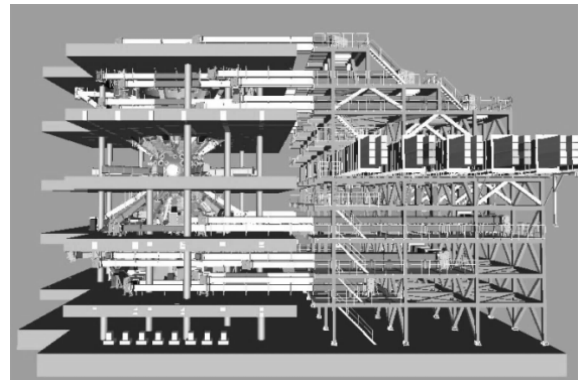


图 8 主机装置靶场实验区

Fig. 8 Range area of ShenGuang III

2.4 ICF 装置总体布局

激光驱动 ICF 装置的总体布局首先应满足物理实验目的的要求,满足装置稳定运行、集成和维护要求。在此前提下,总体布局应充分考虑装置后续发展的需要,具备装置后续发展所需要的技术、工程和实验室接口。总体布局应充分考虑激光器的发展水平,以及相关光机单元组件或模块的研究、设计、制造、安装、运行和维护的要求和难度。总体布局应合理减小装置实验室面积,特别是洁净空间体积,合理安排相关辅助设施,以便

降低装置与支撑配套建设项目的建设费用和长期运行费用。总体布局应合理规划装置各类功能实验区的分布,确保装置工程建设与运行期间各类人流、物流、能量流和信息流的协调畅通,其中优先考虑装置在建设和运行维护中的物流保障。

3 总体结构设计

3.1 国外 ICF 装置

NIF 总体结构设计的核心思想为:(a)光学元器件采用模块化设计;(b)光机系统包括 2 大部分:光路底层结构和模块化在线可更换单元(Line-Replaceable Unit, LRUs),LRUs 包括 4×1 、 4×2 、 2×2 等阵列的光学元器件及其光机组件,图 9 为 NIF 一条 beamline 内的 LRUs。;(c)采用运动学支承将 LRUs 精确定位于光路底层结构上组成整个光路;(d)光路底层结构和 LRUs 的设计要保证光学元器件位于封装结构(包括光束管道)中。

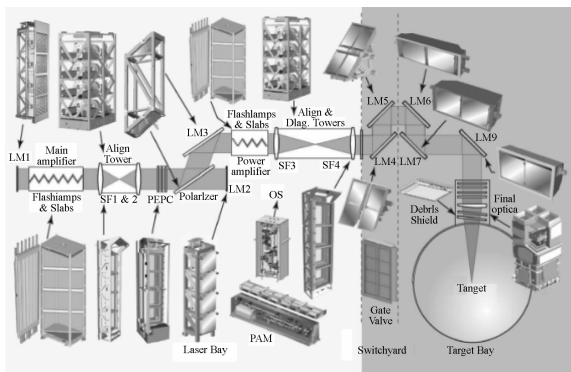


图 9 NIF 一条 beamline 内的 LRUs

Fig. 9 LRUs of one beamline of NIF

LRUs 包括模块本身的部分封装结构,此设计思想可以实现在线快速拆卸和在线快速准确复位,从而保证装置的运行效率和洁净度、提高维护性。

NIF 和 LMJ 激光实验区的主要光学单元用高架结构支撑,空出单元的上下空间,保证激光实验区各单元的物流和人流需要。图 10 为 NIF 和 LMJ 的激光实验区。

NIF 的靶场实验区的编组站和靶区为多层结构,相同高度的靶区和编组站层之间存在通道,满足同一层面之间的物流和人流的需要,如图 10 所

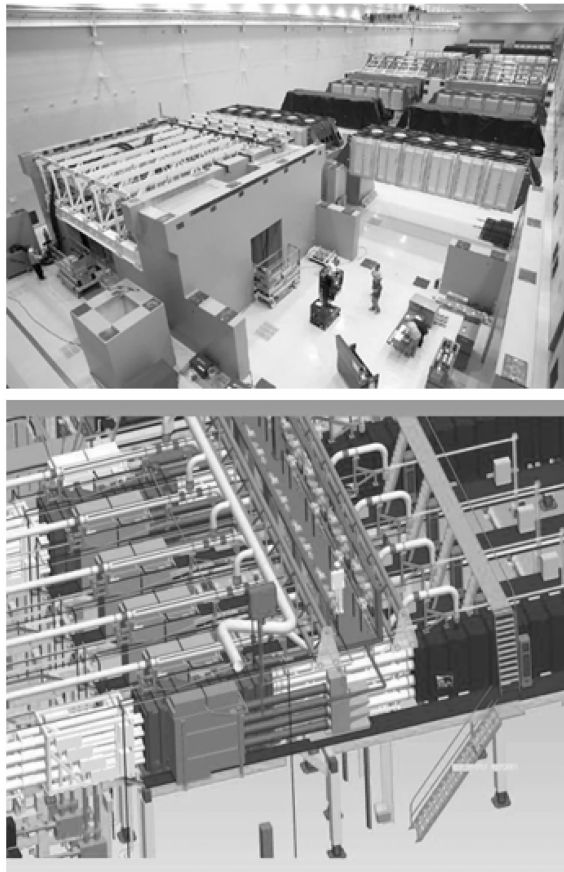


图 10 NIF 和 LMJ 的激光实验区

Fig. 10 Laser bays of NIF and LMJ

示。在物理实验区,除了光学元器件外,还包括大量的物理和光学诊断设备,这些诊断设备主要围绕靶室排布。NIF 对这些设备进行了安装和维护流程设计,并且设计了相关的安装和维护系统,主要包括用于靶室内、靶室外的系统。靶室内的安装和维护系统安装在通过靶室底部进入靶室的电梯顶部,这个系统通过安装不同的遥控机械手完成不同的安装和维护工作,此电梯也作为靶室内人流和物流装置。靶室外的安装和维护系统主要包括多种人流和物流的起重装置、以及多种操作机械手。

NIF 认为影响光束打靶精度的主要因素为激光系统的稳定性,而结构在外部环境激励下的响应是影响激光系统稳定性的主要原因。在为物理实验提供尽可能大的操作空间的基础上,NIF 支撑系统的设计和评估主要受稳定性指标控制。NIF 的装置稳定性影响因素如表 1 所示。实验室选址和实验室建筑决定日常温度载荷、风压载荷

和宽频环境振动(包括地基柔性),实验室选址同时决定地震载荷。实验室 HVAC (Heating, Ventilating and Air Conditioning)系统和相关设备决定实验室内温度、宽频声激励、气压波动(包括管道内气压波动)和局部振动。

表 1 ICF 装置靶场稳定性影响因素

Tab.1 Influence factors of range stability for ICF device

实验室外环境	环境振动激励	实验室内环境
日常温度载荷 风压载荷	宽频环境振动 (包括地基柔性的影响)	温度 宽频声激励 气压波动(包括管道内气压波动) 局部振动

NIF 激光实验区和靶场实验区支撑系统的设计建立在控制隔振地基的稳定性指标的基础上。靶场实验区支撑系统的设计建立在控制隔振地基的稳定性指标的基础上。支撑系统为地基+混凝土支撑结构(建筑结构)或支撑刚架+光路底层结构。靶区建筑结构为圆柱形钢筋混凝土结构,顶部为穹顶结构,靶区建筑结构内部包括七层环形地板结构(围绕着真空靶室及其支撑结构),见图 11。从靶区建筑结构伸出的四层环形地板为真空靶室提供横向支撑。建筑结构在环形地板之间采用了支撑柱/梁结构,使地板联成整体来提高结构的刚度,为诊断设备和反射镜提供支撑基础。靶

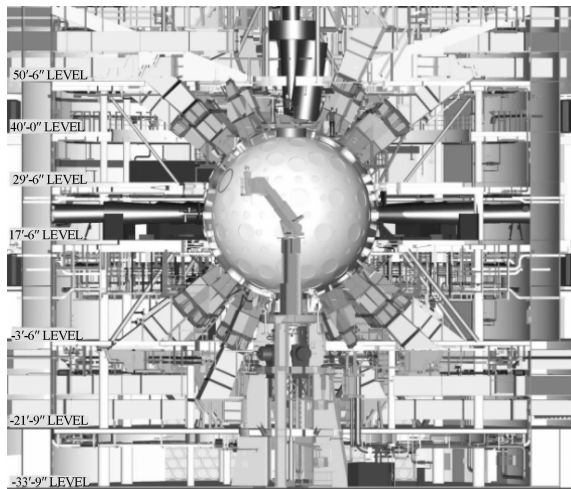


图 11 NIF 靶区多层结构

Fig. 11 Mul-layers of NIF target area

区在底层和顶层地板采用铝制刚架结构,为部分靶场反射镜提供较灵活的支撑结构。

光束编组站由建筑结构和建筑结构屏蔽的大型刚架结构组成,为最大限度地满足光学元件的稳定性要求,编组站的刚架系统利用编组站建筑和靶区建筑的混凝土墙壁进行了横向支撑,刚架的横向支点都选择在编组站墙面的拐角处,避免了薄壁平板结构的低频振动的不利影响。

3.2 神光Ⅲ主机装置

神光Ⅲ主机装置在三维建模和数字仿真的基础上,进行了各系统排布、支撑系统和辅助系统设计、物流和人流规划、安装和维护流程设计。

激光实验区的总体结构特点为:墙(混凝土)+架+厢+可替换单元模块的一体化总体结构设计。采用高架式、单平面结构形式,结构下部为主要物流通道。采用分离式 4×2 阵列式束组,总体集成度适中,有利于装置建设的分步实施。

靶场实验区为长方形结构,包括北面的物理实验区和南面的编组站。物理实验区和编组站均为多层结构,设置了可以通往每层的电梯,同时设置有物流小车,以满足在不同层面之间的物流和人流的需要。

激光实验区结构稳定性设计的技术途径为:利用钢筋混凝土墙增加支撑系统的模态阻尼,减小结构对环境振动的响应,提高稳定性。采用适当的结构隔离振动源。

靶场实验区支撑系统主要包括靶区混凝土支撑结构、编组站支撑刚架和真空靶室支撑结构。为满足靶场光传输系统的动力学稳定性要求,采用的技术途径为:采用具有大刚度和高模态阻尼的钢筋混凝土结构;利用建筑结构对靶室和编组站支撑刚架进行横向支撑,提高其基频;采用约束阻尼技术增加系统的能量耗散,减小系统的动力学响应。

3.3 ICF 装置总体结构设计

激光驱动 ICF 装置总体结构设计必须在结构布局和构型上与总体光路设计相匹配,符合光束传输结构和光学元件的支撑要求,保证各光学元件的坐标位置。总体结构设计应与各系统结构设计间耦合匹配,满足各系统安装定位、集成调试、运行维护的基本要求。靶场实验区支撑系统的设计应采用靶区建筑和支撑系统一体化设计准则,一体化设计准则可以充分利用混凝土比较大

的模态阻尼以减小结构响应。

4 结 论

本文在从工程角度系统分析了大型激光驱动ICF装置(美国NIF,法国LMJ)总体布局和总体结构设计的特点,在此基础上,指出ICF装置总体布局首先应满足主要物理实验目的要求,满足装置稳定运行、集成和维护的要求;总体布局需要具有装置后续发展所需要的技术、工程和实验室接口。总体布局需要适应相关光机组件或模块研

究、设计、制造、安装、运行和维护的要求和难度;总体布局需要减小实验室洁净空间的体积,降低装置建设费用和长期运行费用;总体布局应确保装置工程建设与运行期间各类人流、物流、能量流和信息流的协调畅通。文中指出ICF装置总体结构设计首先需要符合装置光束传输和光学元件的支撑要求;总体结构设计需要满足装置各系统安装定位、集成调试、运行维护的基本要求;靶场实验区支撑系统的设计应采用靶区建筑和支撑系统的一体化设计准则,充分利用混凝土比较大的模态阻尼来减小结构响应,提高装置稳定性。

参考文献:

- [1] FOLEY R J, KARPENDO V P, ADAMS C H, *et al.*. *Design of the Target Area for the National Ignition Facility* [R]. Livermore: Lawrence Livermore National Laboratory, 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, 1998.
- [3] MOSES E I, CAMPBELL J H, STOLZ C J, *et al.*. *The National Ignition Facility: The World's Largest Optics and Laser System* [R]. Livermore: Lawrence Livermore National Laboratory, 2003.
- [4] SAWICHI R H. The National Ignition Facility: laser system, beam line design and construction [C]. *Proc. of SPIE, Bellingham, WA: SPIE*, 2004, 5341: 43-54.
- [5] LARSON D W. NIF Laser Line-Replaceable Units (LRUs) [C]. *Proc. of SPIE, Bellingham, WA: SPIE*, 2004, 5341: 127-136.
- [6] BONANNO R E. Assembling and Installing LRUs for NIF [C]. *Proc. of SPIE, Bellingham, WA: SPIE*, 2004, 5341: 137-145.
- [7] ANDRE M L. The French Megajoule Laser Project (LMJ) [J]. *Fusion Eng. and Des.*, 1999, 44: 43-49.
- [8] CAVAILLER C. Inertial Fusion with the LMJ [J]. *Plasma Phys. Control. Fusion*, 2005, 47: B389-B403.
- [9] FLEUROT N, CAVAILLER C, BOURGADE J L. The Laser Mégajoule (LMJ) Project dedicated to inertial confinement fusion: Development and construction status [J]. *Fusion Eng. and Des.*, 2005, 74: 147-154.
- [10] EBRARDT J, CHAPUT J M. LMJ project status [C]. *The Sixth International Conference on Inertial Fusion Sciences and Applications, IOP Publishing*, 2008: 032005.
- [11] EBRARDT J, CHAPUT J M. LMJ on its way to fusion [C]. *The Sixth International Conference on Inertial Fusion Sciences and Applications, IOP Publishing*, 2010: 032017.
- [12] 闫亚东,张法全,何俊华,等. 神光-III原型装置用速度干涉仪的光学系统设计[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(11): 2355-2361.
- YAN Y D, ZHANG F Q, HE J H, *et al.*. Design of VISAR optical system for Shen-Guang-III prototype [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(11): 2355-2361. (in Chinese)
- [13] 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.*. Analysis on ground random vibration response of large scale precision mirror mount [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(3): 356-361. (in Chinese)
- [14] 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 ZH, *et al.*. Stability design of switchyard in SGIII facility [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(11): 2664-2670. (in Chinese)

作者简介:



朱明智(1973—),男,四川崇州人,博士,副研究员,1996年于北京理工大学获得学士学位,1999年于西南交通大学获得硕士学位,2006年于西安交通大学获得博士学位,主要从事 ICF 装置精密光机结构设计与研究。E-mail: zhuzmz@caep. ac. cn



吴文凯(1969—),男,湖北武汉人,研究员,1991年于衡阳工学院获得学士学位,主要从事 ICF 装置精密光机和离心机结构设计与研究。E-mail: wuwk@caep. ac. cn



王美聪(1979—),女,湖南娄底人,硕士,工程师,2003年于西安交通大学获得学士学位,2006年于清华大学获得硕士学位,主要从事 ICF 装置精密光机结构设计与研究。E-mail: wangmc@caep. ac. cn



陈刚(1968—),男,四川梓潼人,高级工程师,1990年于四川绵阳工学院获得学士学位,主要从事 ICF 装置精密光机结构设计与研究。E-mail: chg684@sina. com



陈晓娟(1974—),女,陕西乾县人,高级工程师,1995年于西安理工大学获得学士学位,主要从事 ICF 装置精密光机结构设计与研究。E-mail: chenxj@caep. ac. cn

(版权所有 未经许可 不得转载)