

文章编号 1004-924X(2007)03-0407-05

空间滤波器阵列结构优化设计

周 海, 蒋学君, 朱启华, 景 峰, 林东晖, 张小民
(中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

摘要:给出了新型大型激光装置阵列化空间滤波器结构优化设计。对大口径阵列化光束超长程传输、光路控制、光束质量控制, 以及支撑稳定性、震动隔离、离轴调节等关键技术进行了分析研究, 对物理方案和参数进行分解。运用 Pro/E 软件建立阵列化空间滤波器三维实体模型, 给出了阵列化空间滤波器的总体结构解决方案。对关键部件和技术指标进行了详细分析, 采取了新颖的结构和相应的技术措施; 运用 ANSYS 分析软件对结构刚性、强度、振型等指标进行分析, 通过有限元仿真与 CAD 环境的双向嵌入优化结构; 为给装置结构的适应性找到可靠的评估依据, 对影响稳定性较大的器件和单元进行了微振动测试和分析。理论分析和测试结果表明, 该方案达到了优化设计, 是可行的。

关键词:高功率固体激光装置; 空间滤波器; 稳定性; 仿真; 双向嵌入

中图分类号: TN248.1; TN713 **文献标识码:** A

Optimization of spatial filter matrix

ZHOU Hai, JIANG Xue-jun, ZHU Qi-hua, JING Feng, LIN Dong-hui, ZHANG Xiao-Min

(Research Center of Laser Fusion, Chinese Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

Abstract: The key techniques of spatial filter matrix used in large laser facility such as super-long-distance beam transmission, beam control, beam quality control, stability of supporting structure, adjustment accuracy of all coupling glasses, stability of glass mounts, off-axis adjustment are studied. This paper surveys current technology of spatial filters, determines the specifications of the system, and finally provides a comprehensive solution for the structure design of spatial filter by using "Pro/E" software program in the 3-D simulation model of spatial filter matrix. The key components and specifications are analyzed carefully, and new structure design and techniques are employed. The rigidity, strength, and vibration modes of the structure are analyzed using "ANSYS" software program. The structure has been optimized by bidirectional embedding of finite element method and CAD. To seek the proof for the equipment structural flexibility, it has been tested with a slight shock to check the components and units, which has significant influence on the structure stability.

Key words: high-power solid state laser facility; spatial filter; stability; simulation; bidirectional embedding

收稿日期: 2006-12-16; 修订日期: 2007-01-18.

基金项目: 中国工程物理研究院科学技术基金资助项目 (No. 20040323)

1 引言

在激光聚变需求牵引下,高功率固体激光技术得到长足发展,各国都在投入巨大的人力、物力积极对固体激光装置进行研制^[1]。作为高功率固体激光装置核心部分的主放大系统也在研究过程中发生了深刻变化,由单路激光束、单程放大系统逐渐演化为光束的多程放大和多束光路的阵列构型为特征的系统。主放大系统中的关键器件——空间滤波器,其功能也由单一的空间滤波向更为复杂的光束质量控制、取样、自激振荡控制、反激光隔离等复合型发展。针对大型空间滤波器在功能和技术上的不断发展,其超长程光束传输、结构支撑稳定性,以及所有耦合镜的精密调节、镜座的稳定性、光束离轴调节、大型机械加工精度以及高真空的获得等关键技术问题,都必须通过深入地理论分析和实验验证,为阵列空间滤波器的定型设计提供可靠的理论和实验依据。

2 系统概述

图 1 为神光-III 原型装置主放大级(MAS) 光路排布示意图及主要参数。其工作原理是预放模块(PAM)输出的激光脉冲从空间滤波器 SFM₁ 的小孔阵列板附近注入,经一小反射镜反射后,穿过 SFM₁ 的透镜阵列 L₁ 到达主放大器被放大。然后,光束经腔镜 CM 反射回主放大器(Amp. 1) 被再次放大。经两次放大后激光束在 SFM₁ 的小孔阵列板 PA₁ 附近被反射镜 BM₁ 和 BM₂ 导入光束反转器(LRU),激光束经过光束反转器(BRU) 返回主放大器(Amp. 1) 被第三次放大。被放大的光束经腔镜 CM 反射回主放大器(Amp. 1) 被第四次放大后,经过腔内空间滤波器 SFM₁ 的输出透镜 L₂ 传输到助推放大器(Amp. 2)。为了避免高能激光束聚焦后带来的空气击穿效应,空间滤波器都要求具有一定的真空度。因此,从总体上讲,空间滤波器既是复杂的光机系统,要求具有较高的结构稳定性和调整精度,同时又是大型真空容器。

空间滤波器(SFM₁)由前透镜箱体、后透镜箱体、中箱体及相关单元组件、光束反转器、主支撑架和光束连接管道等组成(如图 2 所示),前透镜

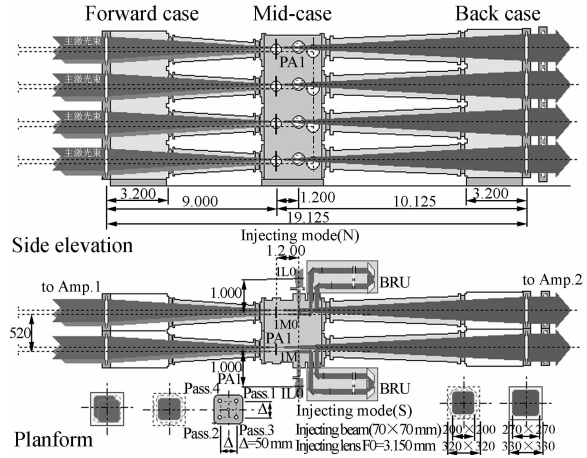


图 1 空间滤波器组件光路示意图

Fig. 1 Beam diagram of spatial filter module

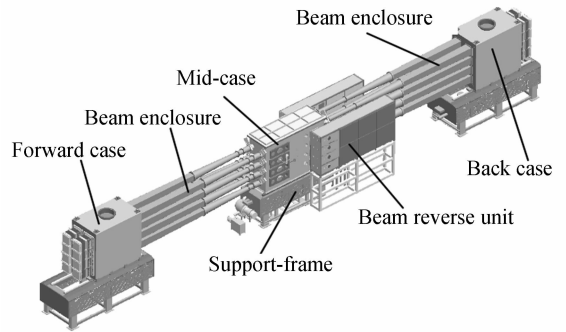


图 2 空间滤波器组件(SFM₁)总体结构模型

Fig. 2 Main structure modules of the spatial filter

箱体、后透镜箱体通过光束连接管道与中箱体连接为一体,组成一套大真空容器系统,前透镜箱体、后透镜箱和中箱体分别由三套主支撑刚架支撑,中箱体内部光机器件由独立阵列型支撑桁架单独支撑。

3 关键单元器件

3.1 阵列型支撑桁架

空间滤波器中箱体是光束四程放大构型的中枢,由于空间滤波器 8 束光采取 4×2 方式排列,光束注入、导出分别由中箱体两侧的 4×1 光窗完成(即各 4 束),空间滤波器的主要物理功能均要在此实现。中箱体内部的阵列型支撑桁架,用以安装注入/导出光学系统模块和小孔阵列板 PA₁^[2-3]。

空间滤波器中箱体内部各器件对稳定性有较

高的要求,特别是要求小孔阵列板 PA_1 在完成精密调节后,其中心准直孔作为整台装置的准直基准,不允许有任何晃动,对稳定性要求更高;再者,为隔离真空机组与阵列型支撑桁架间的振动,以及在抽真空时真空箱体变形对阵列型支撑桁架的影响,在阵列型支撑桁架的支撑结构设计中,采用与真空箱体刚性隔离的独立小支架结构(如图 3、4 所示)。通过小支架上部的动力学机座(Kinematic mount)与阵列型支撑桁架相连,解决了支撑刚性、稳定性问题,并保证了阵列型支撑桁架的定位准确性^[4-5];不锈钢波纹管一端与小支架连接,另一端与真空箱体的底板相连,这种结构既满足了中箱体的真空密封要求,同时实现了阵列型支撑桁架与真空箱体的柔性隔离,解决了抽真空及机组运转对阵列型支撑桁架的影响。

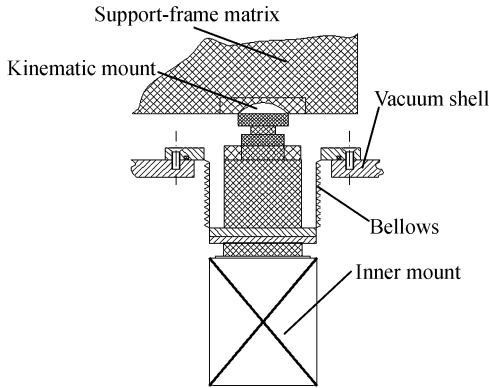


图 3 内部独立支撑结构

Fig. 3 Configuration of inner separated mounting unit

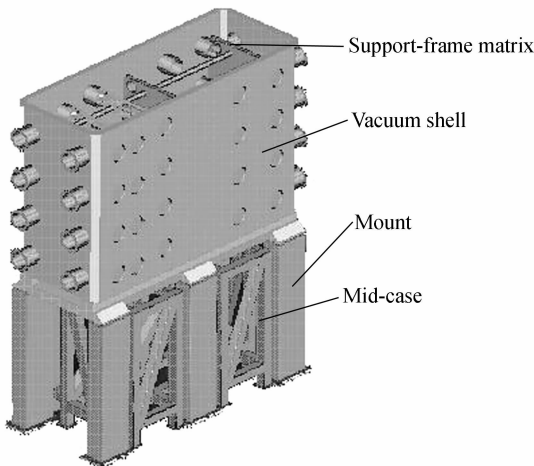


图 4 中箱体支撑模型

Fig. 4 Configuration of mid-case

3.2 阵列型支撑桁架的动力学计算

为验证阵列型支撑桁架的工程设计在自重、所需真空状态和各类负载下是否满足稳定性的要求,并以此作为结构设计修改的依据。动力分析时,在基础上施加加速度随机激励,激励在 X 、 Y 、 Z 三个方向上分量的功率谱密度为 $10^{-10} \text{ g}^2/\text{Hz}$ ($1\sim 200 \text{ Hz}$)。

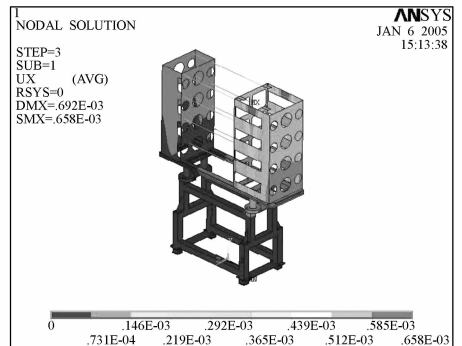
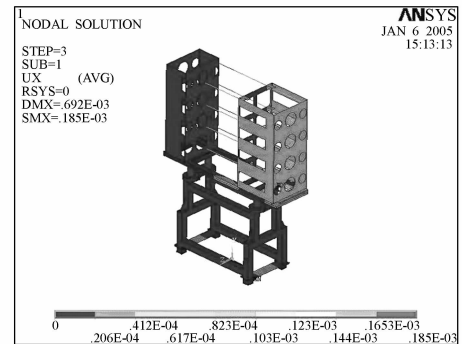
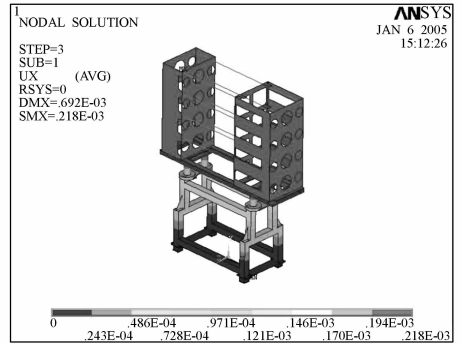


图 5 动力学计算模型

Fig. 5 Dynamic model

经过多轮次计算和结构改进,并在阵列型支撑桁架的立柱里进行灌浆处理后,最终的动力学计算结果如图 5 所示:在 x 向最大位移为 $0.22 \mu\text{m}$,在 y 向最大位移为 $0.18 \mu\text{m}$,在 z 向最大位移为 $0.65 \mu\text{m}$ 。

3.3 光束反转器

光束反转器(BRU)排布在腔内空间滤波器

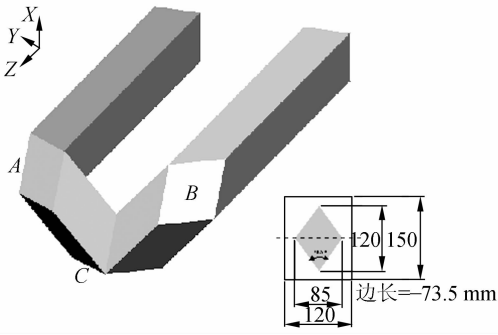


图 6 光束 90° 旋转原理图

Fig. 6 Scheme of 90° rotation of laser beam

SFM₁ 中箱体的两侧,成 4×1 阵列式结构,是四程放大系统的关键单元之一。光束反转器在空间滤波器中主要实现以下功能:一是实现光束反转,使经两次放大后的激光束返回主激光器(Amp. 1),满足四程放大的需要;二是通过光束反转器中互成 60° 夹角的三片角反射镜完成光束的 90° 偏转(见图 6),提高光束均匀性^[6-7]。

3.4 空间滤波器支撑刚架

空间滤波器支撑刚架结构从下至上主要由支撑腿、横梁、纵梁、平面导轨和 V 型导轨组成,在设计除考虑负载引起的强度、刚度问题外,还特别

对支撑刚架的稳定性设计方面作重点考虑,在支撑刚架立柱结构中填充了混凝土材料,并与实验室地基固化为一体,使该组件在实现支撑架系统隔震、减震功能要求中起了重要作用^[8]。图 7 是对支撑刚架的模态分析,表 1 是其分析结果,从结果可以看出支撑刚架的基频较高,对于隔离地脉动等低频震源的影响有较好的作用。

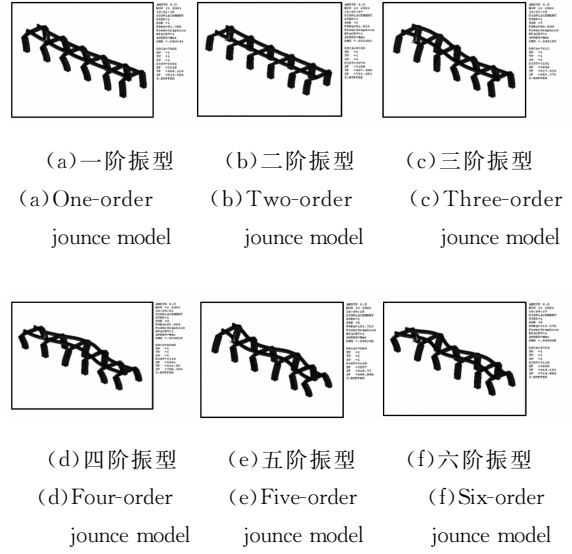


图 7 支撑刚架的前六阶振型

Fig. 7 Six-order jounce models of support-frame

表 1 支撑刚架振型分析列表

Tab. 1 Analysis of jounce models of support-frame

Order	Intrinsic frequency(Hz)	Jounce model	Order	Intrinsic frequency(Hz)	Jounce model
1	81.799	Pillar(Z direction 1 bend) + crossbeam (1 bend)	5	93.094	Pillar (Z direction 1 bend) + crossbeam (3 bend)
2	81.835	Pillar (X direction 1 bend)	4	101.72	Pillar (Z direction 1 bend) + crossbeam (4 bend)
3	86.044	Pillar(Z direction 1 bend) + crossbeam(2 bend)	6	113.38	Pillar (Z direction 1 bend) + crossbeam (5 bend)

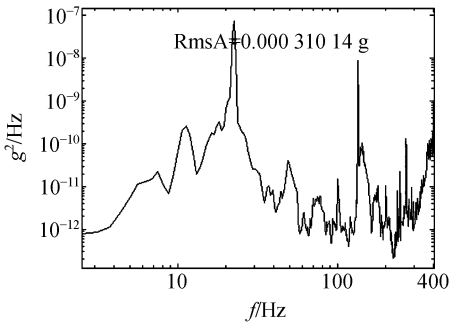
4 稳定性实验验证

4.1 微振动测试

空间滤波器的系列光机元器件对稳定性都有较高的要求,因此在计算、分析和结构设计过程中围绕这一指标做了大量工作,在减震、隔震和提高结构刚性方面采取了适当的措施,设计了相应的结构构型。但是,由于环境(地脉动、空调、噪声

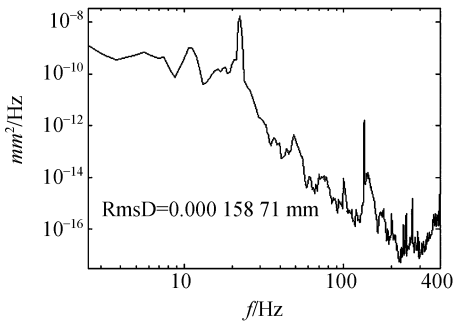
等)的综合因素,结构的复杂程度,使得计算分析的可信度受到影响,为了给装置结构的适应性找到可靠的评估依据,对影响稳定性较大的器件和单元进行了微振动测试及分析。

通过分析,将阵列型支撑刚架、光束反转器、透镜调整架等器件作为重点监测对象。图 8 是对支撑刚架二层 pick-off 镜座处的测量分析结果:最大响应发生在 pick-off 镜座处测点,加速度响应均方根值为 0.000 31 g,位移响应均方根值为



(a) 加速度响应

(a) Acceleration response



(b) 位移响应

(b) Displacement response

图8 加速度与位移响应功率谱密度曲线

Fig. 8 Power spectrum density curves of acceleration and displacement responses

0.000 16 mm。测得结果充分说明,所采取的减震、隔震措施得当,设计的结构构型合理。

5 结 论

利用 Pro/E 软件建立了阵列化空间滤波器三维实体模型,通过设计评定优选出满足物理目标的结构模型;运用 ANSYS 软件对结构刚性、强度、振型等指标进行分析和理论验证。对于影响主机性能的关键元器件进行了细致的研究工作;建立了分离式阵列支撑桁架构型,从根本上解决了震动隔离问题,使小孔板的“基准”地位得以长久保持;研制出光束反转器 LRU 模块,使四程光路的光束反转回路成为可能,光束的 90°偏转有助于提高光束均匀性;采用填充有高阻尼比混凝土的支撑结构,使刚架的刚性、稳定性大大提高。通过微振动测试和分析,可以得出:空间滤波器阵列结构构型合理,采取的减震、隔震措施得当,也进一步验证了设计、分析的真实性。

参考文献:

- [1] 彭翰生,张小民,范滇元,等. 高功率固体激光装置的发展与工程科学问题[J]. 中国工程科学,1997, 3(3):1-8. PENG H SH, ZHANG X M, FAN D Y, *et al.*. Status of high-power solid-state lasers and engineering science[J]. *Chin. Eng. Sci.*, 1997, 3(3):1-8. (in Chinese)
- [2] BOWERS J, ELI M, JOHNSON M, *et al.*. Beam transport system[R]. *University of California, Lawrence Livermore National Laboratory, UCRL-LR-105821-97-3, Mar 1997*; 15-16.
- [3] GREGORY L T, STANLEY C S. Design guidelines for mirror support systems in large lasers[R]. *University of California, Lawrence Livermore National Laboratory, UCRL-JC-124522ABS*: 117-119.
- [4] LAYTON C H. Principles and techniques designing precision machines[R]. *University of California, Livermore, California, 94551, Feb. 1999*; 37-39.
- [5] GRASZ E, SILVA D. Transport and handing[R]. *University of California, Lawrence Livermore National Laboratory, UCRL-LR-105821-97-3, Feb. 1999*.
- [6] ZHANG X J, FENG G Y, ZHEN K X. Plasma driving to plasma electrode pocket cells[J]. *Chinese Lasers*, 2004, 10: 1073-1076.
- [7] 节德刚,刘延杰,孙立宁,等. 一种宏微双重驱动精密定位机构的建模与控制[J]. 光学精密工程,2005,13(2):171-178. JIE D G, LIU Y J, SUN L N, *et al.*. Modeling and control of a macro-micro dual-drive ultra-precision positioning mechanism [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(2):171-178. (in Chinese)
- [8] FOLEY R J, PATEL C S, TRUMMER D J. Stability consideration in the design of the national ignition facility target area[R]. *University of California, Lawrence Livermore National Laboratory, 94550*: 7-8.

作者简介:周海(1969—),男,中国工程物理研究院激光聚变研究中心高级工程师,主要从事高功率固体激光装置精密机械设计与研究工作。E-mail:a679097@163.com