

文章编号 1004-924X(2009)10-2411-07

大型激光装置光学元件的稳定性设计

谢娜, 周海, 张军伟, 林东晖, 陈良明

(中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

摘要: 大型高功率固体激光装置通常要求总的打靶精度为几十微米, 这对结构的稳定性设计提出了很高的要求。本文以一大型激光装置为背景, 以关键光机系统为例进行稳定性设计。通过采用钢筋混凝土建筑结构、一体化结构和桁架结构、隔离振动源增加结构刚度等方式减小光机结构对环境振动的响应, 提高结构的稳定性。然后, 应用有限元理论对关键光学元件及其支撑结构的稳定性进行分析, 以验证光机结构设计的合理性。分析结果显示, 该系统中腔镜的最大转角为 $0.14 \mu\text{rad}$, 注入系统角漂元件的最大转角为 $0.423 \mu\text{rad}$, 光束切换模块反射镜的最大转角为 $0.394 \mu\text{rad}$ 。计算结果表明: 设计的结构合理可行, 关键光学元件均满足稳定性设计指标的要求, 且裕度系数 >1.5 。

关键词: 高功率固体激光装置; 光学元件; 支撑结构; 稳定性

中图分类号: TN248.1 **文献标识码:** A

Stability of optical elements in large laser facilities

XIE Na, ZHOU Hai, ZHANG Jun-wei, LIN Dong-hui, CHEN Liang-ming

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

Abstract: Large high-power solid-state laser facilities have a very high requirement for the total positioning error budget ($<50 \mu\text{m}$ in general), so it is a very important to improve the stability of structure design. In this paper, the stability design is illustrated for several key optical and mechanical systems in the large laser facility. Then, several kinds of methods, such as reinforced concrete supports, truss structures, vibration isolation, integrated design and enhancing structure rigidity are used to reduce the effect of optical and mechanical structures on the ambient vibration and to improve the structure stability, and finite element models are established to analyse the stability of the key optical elements and support structures and to verify that the structure design is reasonable or not. The results show that the maximum rotation angles of key optical elements, i. e. cavity mirrors, Injection Mirror (IM), and the mirror in beam switch module are 0.14 , 0.423 , and $0.394 \mu\text{rad}$, respectively, and their design margins are greater than 1.5 . These results indicate that the optical elements and support structures can satisfy the design indices for stability.

Key words: high-power solid-state laser facility; optical element; support structure; stability

收稿日期: 2008-09-30; 修订日期: 2008-12-23.

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

高功率固体激光装置是用来研究惯性约束聚变(Inertial Confinement Fusion, ICF)的大型装置。俄、美、日、法、中、英等国相继建造了多台大型高功率固体激光装置^[1],这些装置对打靶精度要求很高,如美国 NIF(the National Ignition Facility)装置总的打靶精度为 $50\ \mu\text{m}$ ^[2],我国的神光-III 激光装置打靶精度为 $30\ \mu\text{m}$ ^[3]。

高功率固体激光装置通常由多路激光束组成,而每路又由上百个光学元件组成,如何对装置的打靶精度进行分配是非常重要的问题。在这些激光装置中,每路光束对总的打靶误差的贡献是完全相等的,因此对一路光束的稳定性指标进行分配即可。每路光束总的打靶误差主要由两部分组成,即由准直精度引起的误差和准直完成后在发射前和发射过程中(在神光-III 激光装置这段时间约为 2 h)由系统的漂移引起的误差。参考国内外现有的大型固体激光装置,在神光-III 激光装置中,由准直精度引起的误差约占总误差的 19%,其余 81% 为漂移误差。对打靶精度分配后,由准直精度引起的误差为 $13\ \mu\text{m}$,而由漂移引起的误差为 $27\ \mu\text{m}$ 。

光学元件的漂移误差主要是由支撑光学元件的结构在各种外载荷激励下的响应引起的^[4-5],包括由结构振动引起的漂移误差(约占总误差的 60%),由温度瞬时变化引起的漂移误差(约占总误差的 35%),以及由偶然现象引起的漂移误差(约占总误差的 5%)^[2]。稳定性指标的初次分配是根据具体的光路光学结构从打靶精度指标开始的。通常采用等概率法或线性加权法对光路中能引起光束偏移的光学元件进行初次稳定性指标分配,其中某光学元件的权重主要是根据光束通过该元件的次数来确定^[2-3]。对每块元件稳定性指标的确定和调整(指标分配中的关键步骤)则是在结构有限元分析结果的基础上完成。通过分析不同载荷下光学元件支撑结构的响应,计算各指标分配项的安全裕度,并进行相应的指标调整或结构设计改进。

在神光-III 激光装置中,打靶精度分配后,每个光学元件的稳定性指标只有几微米或几微弧,某些光学元件的稳定性指标甚至在 $1\ \mu\text{rad}$ 左右

或者 $<1\ \mu\text{rad}$ 。这就对光机结构设计提出了很高的要求。本文着重对神光-III 激光装置中稳定性要求较高的关键光机系统进行稳定性设计。同时由于光学元件的稳定性大部分由结构振动引起,故利用有限元分析软件 ANSYS 对关键光学元件及其支撑结构在环境振动激励下的稳定性进行了分析,以验证光学元件是否满足稳定性设计指标。

2 关键光机系统的稳定性设计

神光-III 激光装置结构稳定性设计总的技术途径为:利用钢筋混凝土建筑结构增加系统结构的模态阻尼,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;利用一体化结构与桁架结构提高结构刚重比和振动基频,避免振动输入的放大。下面以对稳定性要求较高的腔镜组件、滤波器小孔支撑架为例说明光机结构的稳定性设计。

2.1 腔镜组件

腔镜组件用于控制激光传输方向。在激光脉冲多程放大过程中,激光要两次通过腔镜反射,对腔镜的稳定性要求很高,由结构振动引起的角度漂移误差要 $<0.24\ \mu\text{rad/h}$ 。

腔镜组件采用 6 个 4×2 束组的阵列化布局,单束组内八口径腔镜布局如图 1 所示。根据模块化设计的要求,单束组内腔镜组件的结构设计由 4×2 支撑洁净厢与两个 4×1 模块组成。为满足结构的稳定性要求,腔镜组件的总体结构设计方案为钢筋混凝土基座支撑、与片状放大器之间由软性管结构实施振动隔离、6 个 4×2 束组的支撑结构之间采用一体化结构、 4×2 支撑洁净厢与 4

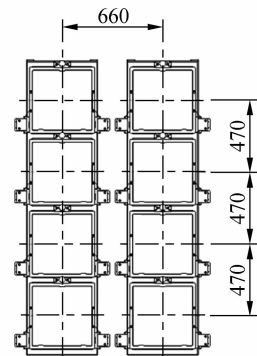


图 1 单束组内八口径腔镜布局图

Fig. 1 Layout of 8-cavity mirror in a bundle

×1 模块支撑结构均采用桁架结构、单束组内的 4×1 模块由导轨结构提高稳定性。钢筋混凝土基座支撑结构有利于增加阻尼和起到隔振的作用;片状放大器在整个装置中是一个振动源^[6],因此在支撑结构上,片状放大器组件和腔镜组件为独立结构,且它们之间的过渡光管道为软性管结构;一体化结构与桁架结构有利于提高刚重比和振动基频。

2.2 小孔阵列支撑架

空间滤波器系统^[7]所涉及的光学元件,除了 4×1 透镜模块外,全部位于真空中箱体内,由小孔板阵列支撑架承载。因此,小孔板支撑架的稳定性决定了空间滤波器系统的稳定性。另外,小孔支撑架安装定位后将作为主放大系统的永久准直基准;内腔空间滤波器小孔支撑架上的注入系统角漂元件及传输空间滤波器小孔支撑架上的光束切换模块对稳定性要求都很高,为 $0.36 \mu\text{rad/h}$,这对小孔阵列支撑架的稳定性提出了很高的要求。

小孔板阵列支撑架稳定性首先要考虑真空状态的影响。在工程设计上,小孔板阵列支撑架的支脚穿过真空箱体底面,由支撑箱梁承载;为避免箱体真空变形引起小孔板阵列支撑架的变化,支撑架的支脚采用图 2 的波纹管结构,同时起到真空密封的作用。支撑箱梁与激光大厅钢筋混凝土剪力墙连接为一体。钢筋混凝土结构可有效增加系统结构的模态阻尼,同钢结构相比模态阻尼增加 4 倍,可以预期其对环境振动的响应可减小 2 倍。支撑箱梁将两面剪力墙顶部刚性连接起来,可有效提高剪力墙顶面的支撑稳定性。

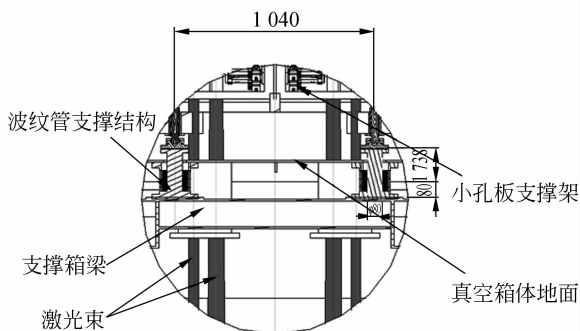


图 2 小孔板阵列支撑架的波纹管结构

Fig. 2 Corrugated tube in pinhole support structure

小孔板支撑架还要考虑各种局部振动源的影响,如空调系统、真空系统机组振动的影响,采取的措施是将振动源(真空泵、压缩机等)设备进行隔离处理,并将其置于较远的位置。此外,激光大厅中放大器泵浦、真空泵、压缩机、控制机柜及其他冷却、照明系统产生的噪声,经由空气媒介传播在光学器件上也会产生响应,因此结构设计上需加强支撑箱梁与小孔板支撑架的结构刚度,同时提高其固有频率,避免振动输入的放大。

3 稳定性分析

为验证关键光学元件,如腔镜、注入系统角漂元件、光束切换模块等是否满足稳定性设计指标,需对关键光学元件及其支撑结构进行有限元分析,确定光机结构在随机脉动激励下的位移响应和转角响应。

3.1 腔镜组件

腔镜组件的有限元模型如图 3,在剪力墙根部施加全约束。进行动态响应分析时,在根部关键点施加载荷为加速度功率谱密度,大小为 $10^{-10} \text{ g}^2/\text{Hz}$ ($1\sim 200 \text{ Hz}$)^[2]。动态响应分析结果见图 4,分析结果显示,最大位移响应为 $1.041 \mu\text{m}$,但该响应不在腔镜上。腔镜的位移响应分析结果见图 5,腔镜的最大位移为 $0.838 \mu\text{m}$ 。根据位移响应计算出腔镜的最大转角为 $0.14 \mu\text{rad}$ 。NIF 的研究结果表明,地基柔度对厚重结构的动态响应有一定影响^[8]。保守估计,考虑地基柔度

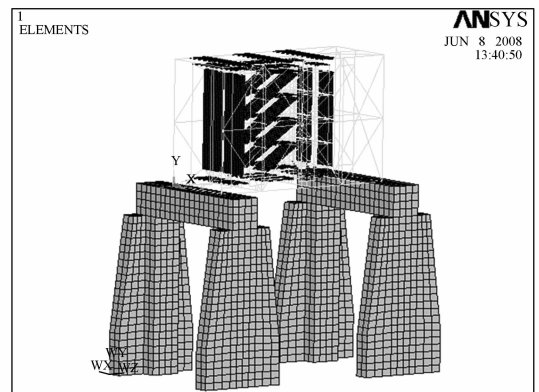


图 3 腔镜组件的有限元模型

Fig. 3 FE model of cavity mirror module

时,结构响应按无地基柔度的 1.4~1.5 倍考虑。考虑地基柔度后,计算结果乘以 1.5,则腔镜的最大转角为 $0.21 \mu\text{rad}$,满足 $0.24 \mu\text{rad/h}$ 的设计指标。

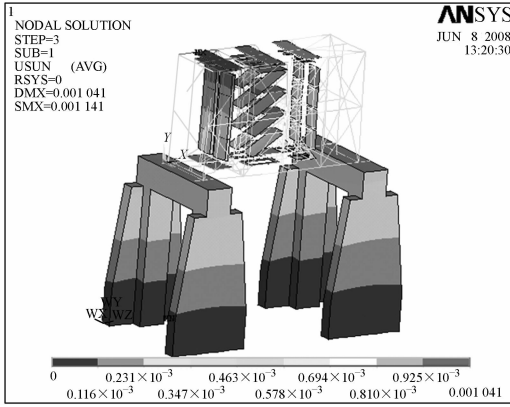


图 4 结构位移响应(mm)

Fig. 4 Displacement of structure (mm)

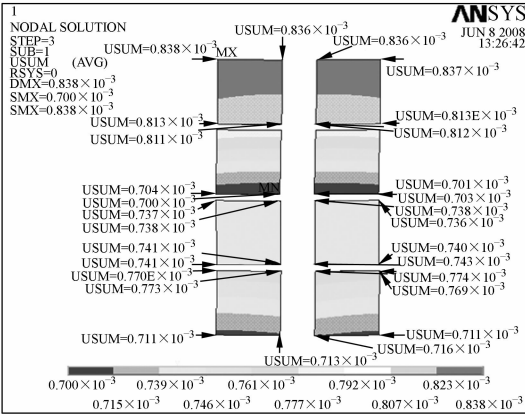


图 5 腔镜位移响应(mm)

Fig. 5 Displacement of cavity mirrors (mm)

3.2 内腔空间滤波器

内腔空间滤波器(Cavity Spatial Filter,CSF)中箱的支撑箱梁、 4×2 支撑架及支撑剪力墙的整体有限元模型如图 6 所示。整体结构及混凝土剪力墙的位移见图 7。结构的位移和转角响应见表 1。计算结果表明,考虑地基柔度时,混凝土剪力墙的最大位移为 $0.512 \mu\text{m}$,具有较高的稳定性;注入系统角漂元件 IM0 的最大转角为 $0.635 \mu\text{rad}$,满足 $0.36 \mu\text{rad/h}$ 的设计指标。

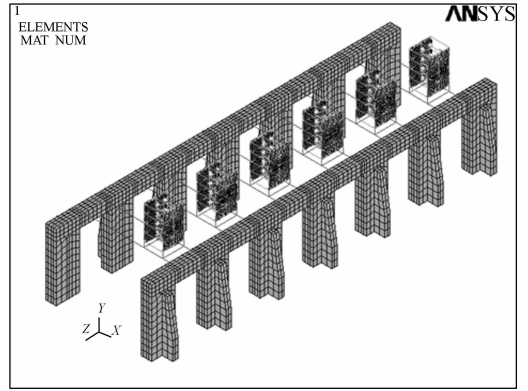
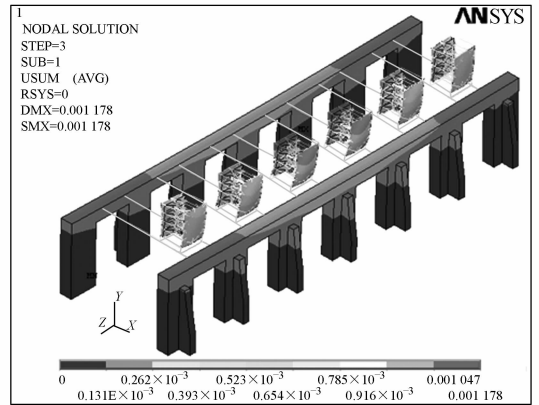


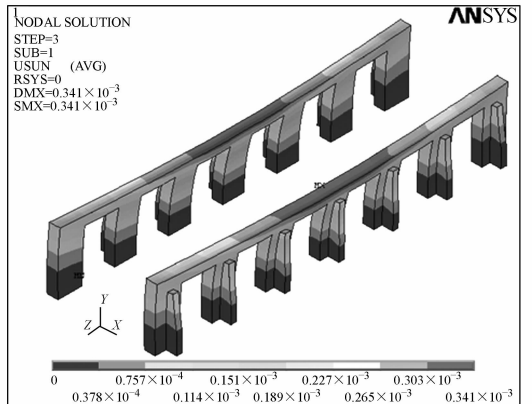
图 6 CSF 中箱支撑结构有限元模型

Fig. 6 FE model of CSF support structure



(a) 整体结构位移(mm)

(a) Displacement of whole structure (mm)



(b) 剪力墙位移(mm)

(b) Displacement of shear walls (mm)

图 7 整体结构及剪力墙位移响应
Fig. 7 Displacements of whole structure and shear walls

表 1 支撑结构的最大均方根响应

Tab.1 The highest response in the mid-case support structure

部位	不考虑地基柔度		考虑地基柔度	
	位移/ μm	转角/ μrad	位移/ μm	转角/ μrad
小孔	1.178	0.572	1.767	0.858
IM0	0.995	0.423	1.493	0.635
剪力墙	0.341	—	0.512	—

3.3 传输空间滤波器

传输空间滤波器(Transport Spatial Filter, TSF)支撑架总长约 5 100 mm,主要负载为 TSF 中箱体內的各侧装光学功能模块,而且负载主要分布在支撑架两端(分别在转轮框架和切换框架上)。在转轮框架上为 TSF 转轮式小孔模块和模拟光源准直组件,每层负载约为 145 kg;切换框架上为光束切换模块,每层负载约为 72 kg。考虑 TSF 支撑结构的负载具有一定的对称性,并且光束切换模块中的光学元件主要为反射镜,模块总重量较轻,对振动的响应较敏感,且其振动变化对系统会有较大影响,因此对 TSF 光束切换模块做稳定性分析。光束切换模块及其支撑结构的有限元模型见图 8。

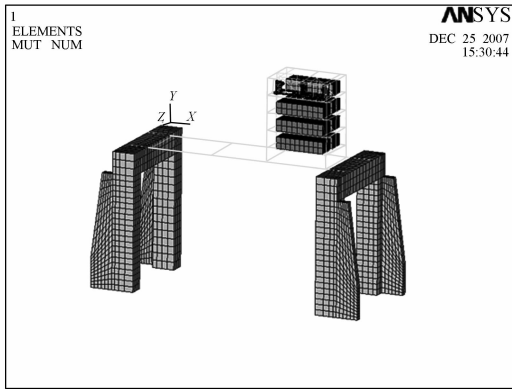
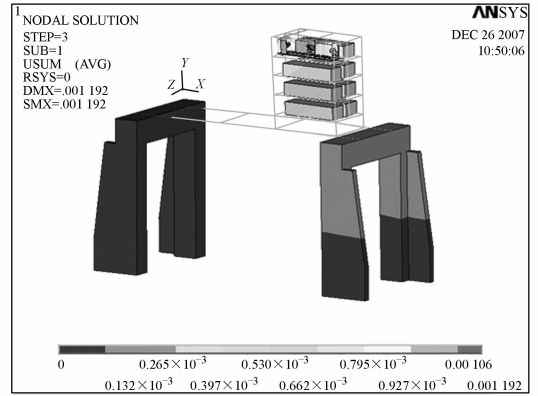


图 8 TSF 支撑结构有限元模型

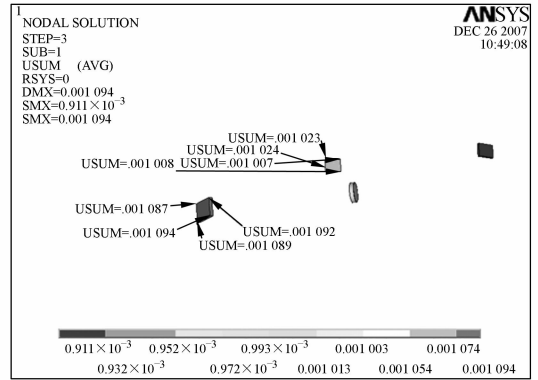
Fig.8 FE model of TSF support structure

TSF 支撑结构在随机地脉动作用下的位移响应及光学元件的位移响应计算结果见图 9。结构的位移和转角响应计算结果见表 2。计算结果表明,考虑地基柔度,光学元件的最大转角为 0.591 μrad ,光束切换模块反射镜的稳定性满足 0.36 $\mu\text{rad/h}$ 的设计指标。混凝土剪力墙的最大位移为 0.459 μm ,说明剪力墙具有较高的稳定性,为 TSF 支撑架及光学元件提供了很好的基础支撑。



(a) 支撑结构位移(mm)

(a) Displacement of support structure (mm)



(b) 光学元件位移(mm)

(b) Displacements of optical elements (mm)

图 9 TSF 支撑结构及光学元件的位移响应

Fig.9 Displacements of TSF support structure and optical elements

腔镜组件、内腔空间滤波器/IM0、传输空间滤波器/光束切换模块反射镜等最终计算结果、设计裕度(设计裕度=稳定性指标/计算值)见表 3。结果表明,腔镜组件、内腔空间滤波器/IM0、传输空间滤波器/光束切换模块反射镜等的设计裕度均 > 1.5。

表 2 TSF 支撑结构及光学元件的最大均方根响应

Tab.2 The highest responses of TSF support structure and optical elements

	部位	位移/ μm	转角/ μrad
不考虑地基柔度	光学元件	1.094	0.394
	剪力墙	0.306	—
考虑地基柔度	光学元件	1.641	0.591
	剪力墙	0.459	—

表 3 主要光学元件由振动引起的稳定性

Tab. 3 Stabilities of main optical elements caused by ambient vibration input

光学元件或系统	稳定性指标	计算值	设计裕度
腔镜组件	0.48 μrad	0.140 μrad	3.43
内腔空间滤波器/IM0	0.72 μrad	0.423 μrad	1.70
传输空间滤波器/ 光束切换模块反射镜	0.72 μrad	0.394 μrad	1.83

4 结 论

在高功率固体激光装置稳定性指标分配的基础上,总体结构设计着重考虑了稳定性问题。

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,2001,3(3):1-8.
PENG H SH, ZHANG X M, FAN D Y, *et al.*. State of high-power solid-state lasers and engineering science [J]. *Engineering Science*, 2001, 3(3): 1-8. (in Chinese)
- [2] SOMMER S C, BLISS E S. *Beam positioning* [R]. Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, California, U. S. A., 1998.
- [3] 师智权,彭翰生,粟敬钦. ICF 驱动器定位误差估计[J]. 强激光与粒子束, 2002, 14(2): 275-278.
SHI ZH Q, PENG H SH, SU J Q. Beam positioning error budget in ICF driver [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2002, 14(2): 275-278. (in Chinese)
- [4] 冯斌,周忆,张军伟,等.大型精密镜架底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*

首先,通过采用钢筋混凝土建筑结构、一体化结构和桁架结构,隔离振动源,增加结构刚度等方式减小结构对环境振动的响应,提高结构的稳定性。然后,应用有限元方法,分析了关键光机系统在随机脉动激励下的动态响应。计算结果表明,腔镜的最大转角为 0.14 μrad ,注入系统角漂元件的最大转角为 0.423 μrad ,光束切换模块反射镜的最大转角为 0.394 μrad 。最后,计算了关键光机结构的设计裕度。结果表明,关键光机结构的设计裕度均>1.5,满足稳定性设计指标。关键光机结构的动态响应分析结果表明,设计的结构合理可行,具有较高的稳定性。

- Eng.*, 2007, 15(3): 356-361. (in Chinese)
- [5] 岱钦,宋文武,王希军.高频半导体激光器的驱动设计及稳定性分析[J].光学精密工程,2006,14(5):745-748.
DAI Q, SONG W W, WANG X J. Design and stability analysis of high frequency LD's driving circuit [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 14(5): 745-748. (in Chinese)
- [6] 王成程,於海武,周海,等.新型高功率固体激光阵列式片状放大器[J].激光技术,2003,27(1):1-3.
WANG CH CH, YU H W, ZHOU H, *et al.*. A new high power solid-state laser multi-segment-amplifier [J]. *Laser Technology*, 2003, 27(1): 1-3. (in Chinese)
- [7] 周海,蒋学君,朱启华,等.空间滤波器阵列结构优化设计[J].光学精密工程,2007,15(3):407-411.
ZHOU H, JIANG X J, ZHU Q H, *et al.*. Optimization of spatial filter matrix [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(3): 407-411. (in Chinese)
- [8] DAVID M. *The effect of foundation flexibility on the vibrational stability of the National Ignition Facility optical system support structures* [R]. Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, California, U. S. A., 1997.

作者简介:



谢 娜(1976—),女,山西运城人,研究实习员,1999 年于清华大学获得学士学位,2002 年于新加坡国立大学获得硕士学位,主要从事高功率固体激光装置精密光机系统的设计与研究。E-mail: na_xie@126.com



林东晖(1970—),男,浙江宁波人,高级工程师,1992 年于四川工业学院获得学士学位,主要从事高功率固体激光装置精密光机系统的设计与研究。E-mail: dhlin@sohu.com



周 海(1969—),男,四川安县人,研究员,1991 年于西北工业大学获得学士学位,2003 年于四川大学获得硕士学位,主要从事高功率固体激光装置精密光机系统的设计与研究。E-mail: a697097@163.com



陈良明(1972—),男,四川威远人,高级工程师,1995 年于四川大学获得学士学位,主要从事高功率固体激光装置精密光机系统的设计与研究。E-mail: chenliangminga@163.com



张军伟(1981—),男,河南沈丘人,博士研究生,2004 年于四川大学获得学士学位,主要研究方向为高功率固体激光装置精密光机系统的设计与分析。E-mail: zjw425@163.com

●下期预告

液晶空间光调制器对真实人眼畸变波前的校正

姜宝光^{1,2},穆全全^{1,2},曹召良¹,李 抄^{1,2},夏明亮^{1,2},宣 丽¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所,吉林 长春 130033;

2. 中国科学院 研究生院,北京 100039)

本文对一个用于人眼畸变波前探测和校正的自适应光学系统的性能进行测试和研究。沙克-哈特曼波前探测器,高分辨率的液晶空间光调制器分别被用来探测和校正人眼的畸变波前。对近视 500 度的人眼进行自适应校正后校正精度达到波前残差的均方根误差为 0.013 个波长($\lambda=0.808\text{ nm}$),可以清晰分辨眼底原来模糊的细胞。结果表明,液晶空间光调制器可以有效校正人眼畸变波前,提高成像质量。