

文章编号: 0258-7025(2010)01-0125-06

惯性约束聚变靶场编组站大口径光学元件的热变形分析

周 忆¹ 杨淑娟¹ 张军伟^{1,2} 周 海² 冯 斌² 何 洁¹ 谢 娜² 林东晖²

(¹ 重庆大学机械传动国家重点实验室, 重庆 400030
² 中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

摘要 温度梯度是造成惯性约束聚变(ICF)驱动器中大口径光学元件变形的重要因素之一,靶场编组站是大口径光学元件较为集中的区域。利用靶场编组站周围温度的测量数据,得出了靶场编组站镜架的温度分布及变化特点,应用有限元分析软件对靶场编组站镜架24 h分时段的热应力和变形进行了分析计算,结果表明,靶场编组站镜箱内温度变化趋势基本一致,顶部相对底部温度梯度较大,两侧相对中间温度较高。当靶场编组站内温差为0.01℃左右或局部温差为0.1℃左右时,光学元件的镜面转角小于0.24 μrad,能够满足稳定性指标要求。

关键词 惯性约束聚变驱动器;靶场编组站;温度分布;热分析

中图分类号 TH632⁺.1 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20103701.0125

Thermal Transfiguration Analysis for the Large Aperture Optical Element of Switchyard in ICF Driver Target Area

Zhou Yi¹ Yang Shujuan¹ Zhang Junwei^{1,2} Zhou Hai²
Feng Bin² He Jie¹ Xie Na² Lin Donghui²

(¹ State Key Laboratory of Mechanical Transmission, Chongqing University, Chongqing 400030, China
² Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China)

Abstract Temperature gradient is one of the most important factors which cause large deformation on large aperture optical element in inertial confinement fusion (ICF) drivers. In this paper, the ambient temperature around the switchyard was measured and the temperature distributing and changing characteristic with time was analyzed, which indicate that temperature changing trend inside of the switchyard is identical, and the temperature gradients of the uppermost part are higher than the bottom, and the temperatures of middle part are higher than the both sides. Loading the temperature on the finite element model of switchyard, gets the deformation of the optical element changing with time. The results indicate that temperature distribution has a great impact on the optical element, the change of mirrors can meet the request of target experiment when the switchyard has about 0.01℃ difference in temperature or about 0.1℃ partial difference in temperature.

Key words inertial confinement fusion driver; switchyard of target area; temperature distribution; thermal analysis

1 引 言

靶场编组站是惯性约束聚变(ICF)激光装置中重要的光束承载装置,起到分组、改变光束传输方向的作用。由于ICF驱动器对光束质量要求极高,要使每一束光准确地定位于靶点,就必须对驱动器中大口径光学元件进行精确的调整并保证其在打靶过

程中的稳定性^[1~3]。国外在ICF驱动器建设过程中,对光束定位稳定性做了大量的研究工作,都主要着重于研究环境载荷对稳定性的影响,并分别给出了各自对驱动器稳定性有影响的环境载荷稳定性设计指标,针对不同的环境载荷提出设计要求和控制措施^[4,5]。研究表明,影响靶场编组站大口径光学

收稿日期:2009-02-10;收到修改稿日期:2009-03-24

基金项目:国家863计划(2007AA804217)资助项目。

作者简介:周 忆(1957—),女,教授,博士生导师,主要从事精密机电系统设计分析方面的研究。

E-mail:cdzy@cqu.edu.cn

元件稳定性的环境载荷主要有随机振动、温度梯度和偶然因素^[4,6]。其中温度梯度在稳定性指标划分中占据很大的比重,如目前世界上最大的 ICF 驱动器——美国国家点火装置(NIF)对温度梯度也提出了很高的设计要求^[5,6]。我国对激光装置中由于温度引起的转角误差为 $0.24 \mu\text{rad}$ ^[4]。李劲东等^[7,8]讨论了热畸变对激光器输出的影响和强激光反射镜热畸变的检测及热吸收问题。张军伟等^[9]对单个光学元件的热稳定性进行了分析。

本文针对靶场编组站大口径光学元件,采用测试的温度数据进行分析,得出靶场编组站镜架区域的温度分布及变化特点,并根据温度变化特点,应用有限元法对工作时间的一定时段进行光学元件热变形分析,得出了各个时段内光学元件的镜面转角,为合理选择打靶时间提供依据。

2 靶场编组站温度场的分布特点

在没有内热源的情况下,镜箱内部的温度场是趋于稳定和均匀的,但是由于工作环境热激励复杂,影响靶场编组站内温度分布因素较多,使得靶场编组站镜箱内的温度分布处于不稳定状态。实验采用多点热电偶分布测试方案对靶场编组站内部温度场

进行测试,以分析靶场编组站温度差分布^[10,11]。实验使用的仪器型号为 PC-2WS 多通道温度监测记录仪和 16 个型号为 PTWD-2A 的精密温度传感器,测试精度为 $0.1 \text{ } ^\circ\text{C}$ 。靶场编组站结构及其内部测点布置示意图如图 1 所示,图中序号为测点编号。

测试过程由工作时段和非工作时段组成,采集了超过 24 h 的数据,每分钟采集 1 个数据。图 2 为 16 个传感器采集的 24 h(0:00~24:00)的温度变化曲线。

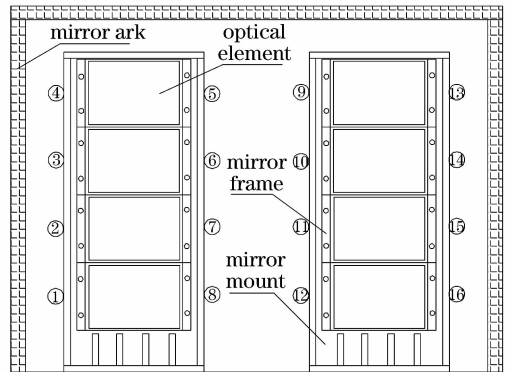


图 1 靶场编组站镜箱内传感器测点布置示意图
Fig. 1 Sketch of sensor measure points distribution within the mirror ark of switchyard in the target area

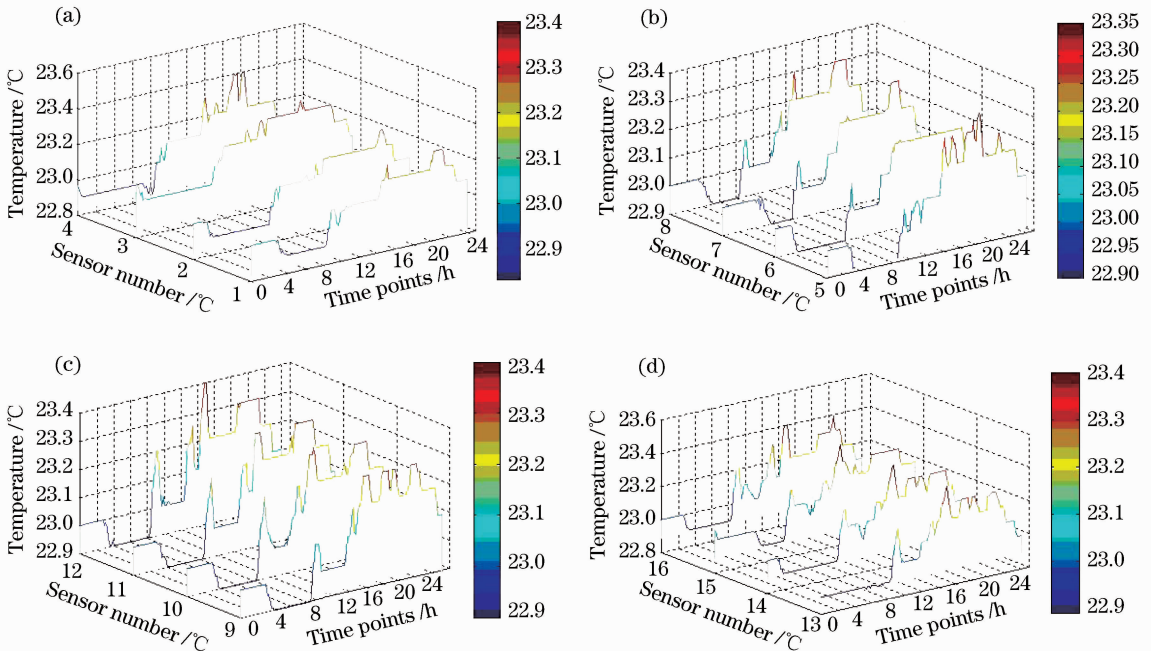


图 2 1~16 号传感器温度变化曲线

Fig. 2 Temperature changing curve versus time of number 1~16 sensors

从图 2(a)~(d)可以看出,靶场编组站镜箱内底部温度相对顶部温度梯度更小,分布更均匀,镜箱中间温度比两侧温度偏低,且温度分布相对较均匀。

每个测点在 24 h 内的温度变化趋势基本一致,上午 8:30 左右靶场内大量机器开始运行,以及室外温度的升高,使得靶场编组站温度开始逐渐爬升,而且 9

~16 号测点的温度上升得要比 1~8 号快, 主要是因为右边编组站较左边编组站距离真空机组、泵等热源更近; 编组站在 8:30 以后左边温度低于右边温度; 而由于 9:00 左右是物理实验时间, 温度达到最高, 左边 23.1 °C, 右边 23.2 °C。此后由于鼓风机器的作用, 使得温度开始降低并趋于稳定, 5~12 号测点的温度稳定在 23 °C, 1~4 号测点温度稳定在 23.1 °C。下午 13:30 以后, 温度基本在 23.2 °C 和 23.3 °C 之间跳动, 且相对上午较稳定, 最高温度为 23.4 °C。16 个测点在 24 h 内出现的最大温差为 0.5 °C。

3 靶场编组站镜架建模及分析

3.1 靶场编组站镜架建模

靶场编组站镜架模型如图 3(a) 所示, 左右两个镜架上各装有 4 片大口径光学元件。图 3(b) 为有

限元模型, 有限元模型采用 20 节点的 solid90 单元, 镜片的材料为 K9 玻璃, 镜架均为 45# 钢。表 1 中列出了靶场编组站在常温下的物性参数。对镜架底部 4 个关键点进行全约束(如图 3(a)中的 A, B, C, D 所示)。

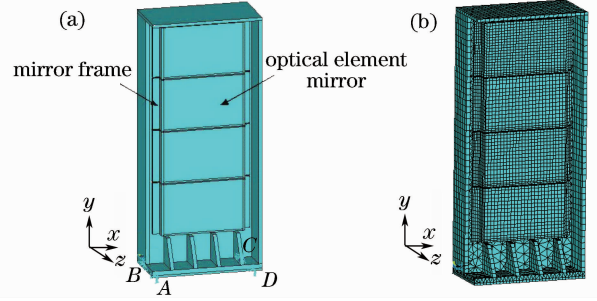


图 3 编组站三维模型(a)和有限元模型(b)
Fig. 3 Three-dimensional (3D) modal (a) and finite modal (b) of switchyard

表 1 靶场编组站镜架在常温下的材料参数

Table 1 Material parameter of the switchyard in target area at normal temperature

Material	Thermal expansion coefficient / [$10^{-5} (m/°C)$]	Elastic moduli / (10^{10} Pa)	Poisson's ratios	Thermal conductivity coefficient / [$W/(m \cdot °C)$]	Density / (kg/m^3)
45# steel	1.1	20.0	0.30	48	7850
K9	0.85	8.13	0.17	12.07	2510

表 2 左边编组站各时段温度值

Table 2 Temperatures of left switchyard in time-intervals

Time-interval	Sensor number							
	1	2	3	4	5	6	7	8
8:00~8:30	22.91	22.90	23.00	22.86	22.90	22.90	22.90	22.91
8:30~9:00	23.03	23.00	23.09	22.98	22.99	22.99	23.00	23.01
9:00~9:30	23.08	23.07	23.12	23.03	23.04	23.04	23.08	23.08
9:30~10:00	23.03	23.10	23.18	23.06	23.00	23.00	23.00	23.00
10:00~12:30	23.09	23.10	23.21	23.10	23.08	23.00	23.00	23.00
14:30~15:30	23.22	23.20	23.30	23.22	23.26	23.20	23.20	23.23
15:30~16:30	23.20	23.20	23.30	23.20	23.20	23.20	23.20	23.20
16:30~18:30	23.20	23.20	23.31	23.34	23.31	23.20	23.20	23.20

表 3 右边编组站各时段温度值

Table 3 Temperatures of right switchyard in time-intervals

Time-interval	Sensor number							
	9	10	11	12	13	14	15	16
8:00~8:30	22.91	22.91	22.91	22.92	22.91	22.92	22.92	22.92
8:30~9:00	23.05	23.08	23.07	23.11	23.10	23.11	23.08	23.13
9:00~9:30	23.09	23.14	23.13	23.17	23.16	23.17	23.17	23.17
9:30~10:00	23.00	23.05	23.00	23.02	23.00	23.09	23.10	23.06
10:00~12:30	23.00	23.01	23.00	23.00	23.03	23.08	23.08	23.05
14:30~15:30	23.29	23.29	23.27	23.33	23.33	23.34	23.34	23.34
15:30~16:30	23.20	23.20	23.20	23.20	23.20	23.20	23.24	23.20
16:30~18:30	23.28	23.20	23.20	23.20	23.29	23.29	23.22	23.20

3.2 靶场编组站光学元件温度分布和变形分析

分析靶场编组站光学元件在温度梯度作用下产生的变形(转角误差)是关键^[12,13]。为此,首先进行光学元件的热分析,将热分析结果作为载荷作用在镜架上,并在镜架底部4个关键点受全约束的条件下,进行应力应变分析。

热分析采用的是稳态热分析。由靶场编组站温度分布(图2)中可以看出,各测点在某些时段的温度比较稳定,可以看作是稳态问题来进行分析,这样便于计算靶场编组站在工作时间内某些不同时间段的温度分布情况。为此对实验的时间进行了分段,并取各时间段温度的平均值,以减小随机误差。表2,表3是左边编组站和右边编组站各时间段划分和对应测点的温度值。

把这些温度值作为载荷施加在模型中测点所在位置的节点上,得出相应时段镜架的温度分布。图4(a)为右边编组站在9:30~10:00时间段的温度分布,参考温度设为23℃。从图中可以看出,镜架右下角温度较高,最上面的镜片较其他镜片温度梯度较小。图4(b)是以图4(a)的温度分布为载荷得到的镜架变形云图,在此温度分布作用下,镜架上各点变形从下到上逐渐变大,最大变形出现在镜架右上角,为 0.822×10^{-6} mm,最小位移出现在镜架底部,为 0.0987×10^{-7} mm。

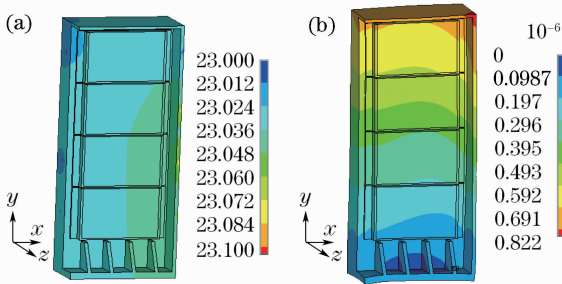


图4 靶场编组站温度分布图(a)和总变形云图(b)

Fig. 4 Temperature distribution (a) and transfiguration (b) of switchyard

温度分布分析的目的在于计算靶场编组站镜片在温度变化作用下产生的转角误差^[14,15]。分析表明 x, y 方向的变形不会使镜面转角发生变化,只有 z 向变形才对其产生作用。为计算光学元件镜面转角大小,在镜片上选取 A, B, C 3点计算它们之间的相对转角, A, B, C 的位置如图5所示。

A, B 点, A, C 点的相对转角计算公式为

$$\alpha_{AB} = \frac{S_{zB} - S_{zA}}{l_{AB}}, \quad \alpha_{AC} = \frac{S_{zC} - S_{zA}}{l_{AC}}, \quad (1)$$

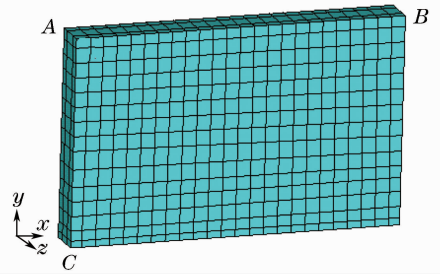


图5 大口径光学元件有限元模型

Fig. 5 Modal of the large aperture optical element

$$\alpha = \frac{\arctan \sqrt{(\tan 2\alpha_{AB})^2 + (\tan 2\alpha_{AC})^2}}{2}, \quad (2)$$

式中 α_{AB}, α_{AC} 分别为 A, B 点, A, C 点之间的转角; α 为镜面合成转角; S_{zA}, S_{zB}, S_{zC} 分别为 A, B, C 三点的变形(位移); l_{AB}, l_{AC} 为 A, B 点, A, C 点之间的距离(即镜片长、宽)。

热变形分析过程是使用表2,表3的温度数据应用有限元热分析得到各时间段靶场编组站镜片位移云图,提取对应位置点的变形量,根据上述相对转角计算公式计算出镜片的转角大小。图6(a)为右边编组站上的4个镜片在9:30~10:00时间段的 z 向位移云图,图中分别标明了 A, B, C 点的 z 向位移,4个镜片从上到下依次编号。根据(1),(2)式计算出4个镜片的镜面合成转角为 $\alpha_1 = 0.635 \mu\text{rad}$, $\alpha_2 = 0.621 \mu\text{rad}$, $\alpha_3 = 0.569 \mu\text{rad}$, $\alpha_4 = 0.483 \mu\text{rad}$ 。图6(b)为左边编组站镜片在15:30~16:30镜片 z 向位移云图,其镜面合成转角为 $\alpha_1 = 0.144 \mu\text{rad}$, $\alpha_2 = 0.144 \mu\text{rad}$, $\alpha_3 = 0.129 \mu\text{rad}$, $\alpha_4 = 0.078 \mu\text{rad}$ 。

使用相同的方法对其他时段进行热分析及热变形分析,算出各时间段镜面转角,图7(a),(b)分别为两个编组站在不同时间段的镜面转角变化曲线,由于时段12:30~14:30是非工作时段,此时段数据不作计算考虑。

从图中数据可以看出各个时段的镜面转角都有较大变化,且同一时段两个编组站的镜面转角也不同。各个时段的最大转角都出现在1号或2号镜片上。由图可见,左边编组站在15:30~16:30时段,最大镜面转角为 $0.144 \mu\text{rad}$,右边编组站在8:00~8:30时段最大镜面转角为 $0.113 \mu\text{rad}$,15:30~16:30时段最大镜面转角为 $0.069 \mu\text{rad}$,均小于 $0.24 \mu\text{rad}$,满足稳定性分配指标,对比表2和表3,可以看出这3个时段的各个测点的温差也较小,而且分布较均匀,右边编组站在8:00~8:30温差为 $0.01 \text{ } ^\circ\text{C}$,两个编组站在15:30~16:30时段,只存在小于等于 $0.1 \text{ } ^\circ\text{C}$ 的局部温差。表明温度梯度减小到

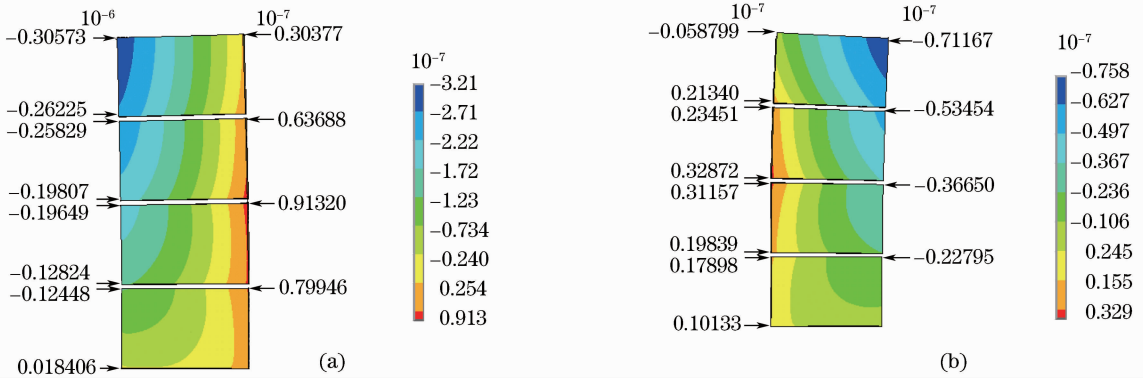


图 6 右边编组站镜片在 9:30~10:00 镜片 z 向位移云图(a)和左边编组站镜片在 15:30~16:30 镜片 z 向位移云图(b)
 Fig. 6 z direction displacement on the right at 9:30~10:00 a. m. (a) and z direction displacement on the left at 15:30~16:30 p. m. (b)

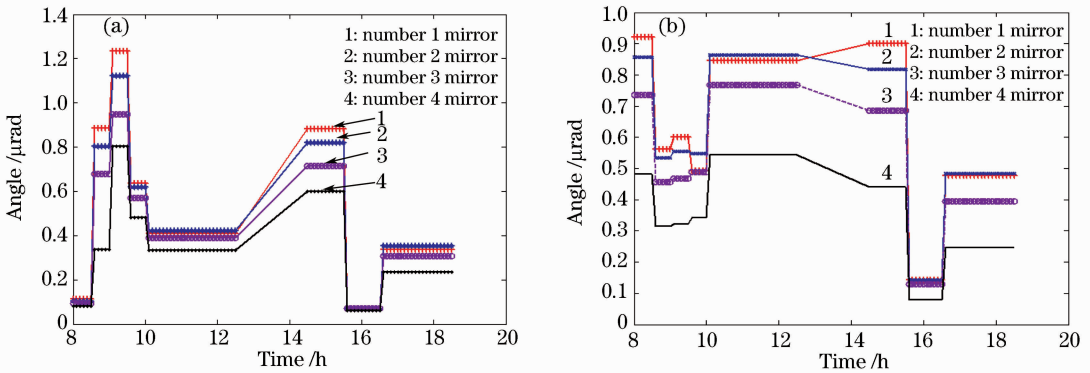


图 7 右边(a)和左边(b)编组站镜面转角变化曲线

Fig. 7 Angel change curve of mirrors on the right switchyard (a) and the left switchyard (b)

0.01 °C 左右或只存在 0.1 °C 左右的局部温差时, 镜片变形最小, 这时光束传输质量较高, 现场实验也表明, 15:30~16:30 时段光束准直调整较容易。而其他时段镜片转角都较大, 如左边编组站在 8:00~8:30 时段最大镜面转角为 0.921 μrad , 右边编组站在 9:00~9:30 时段最大镜面转角为 1.233 μrad , 大于稳定性指标要求。分析这一时段镜面转角较大的原因是靶场内热源(如调整装置、诊断设备、鼓风机等)逐渐开启使得靶室内温度场分布紊乱, 镜箱内部温度梯度增大, 使编组站镜箱的温度分布不均。因此, 应加强编组站温度监控和实验时段的合理选择, 合理布置鼓风机进行温度调整, 以有效地提高物理实验成功率。

4 结 论

温度梯度是影响 ICF 驱动器靶场编组站光学元件变形的重要因素之一, 在研究温度分布对靶场编组站及镜片的变形影响中, 采用 24 h 温度测试数据作为边界条件, 对靶场编组站大口径光学元件进行热分析及热变形分析, 得到光学元件在不同时间

段内的镜面转角, 表明温度梯度减小到 0.01 °C 左右或只存在 0.1 °C 左右的局部温差时, 镜片变形最小, 满足稳定性指标要求。但在 9:00~9:30 时段编组站光学元件变形较大, 因此, 应加强靶场编组站环境温度优化设计和物理实验时段的选择。由于靶场编组站镜面转角误差要求极高, 这就对温度测量精度提出了更高的要求, 为了能够得到更精确的光学元件变形结果, 还需要更精密的温度测量仪器进行测量。

参 考 文 献

- Erik A. Swensen, Alex A. Barron, Charles R. Farrar *et al.*. Random vibration sensitivity studies of modeling uncertainties in the NIF structures [C]. *Proceedings of the International Modal Analysis Conference—IMAC*, 1997, **2**:1172~1180
- D. S. Ng, V. P. Karpenko, R. Wavrik. Target area structural support systems design to achieve the micron-level stability requirement of the national ignition facility (NIF) [J]. *Fusion Technology*, 1994, **26**(3):837~841
- Zhang Dongfeng, Dai Yaping, Yin Xianhua *et al.*. Error analysis for the optical system of target area on high power laser facility [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(12):1425~1428
 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

- 4 Shi Zhiqian. Analysis and research of optical element stability in the large scale solid laser facility [D]. Mianyang: China Academy of Engineering Physics, 2003
师智全. 大型固体激光装置光学元件结构稳定性分析研究[D]. 绵阳:中国工程物理研究院, 2003
- 5 Stanley C. Sommer, Erlan S. Blis. Beaming positioning [C]. *SPIE*, 1999, **3492**:112~135
- 6 David J. Trummer, Richard J. Foley, Gene S. Shaw. Stability of optical elements in the NIF target area building [C]. *SPIE*, 1999, **3492**:363~371
- 7 Li Jindong, Guo Mingxiu, Fu Wenqiang *et al.*. Thermal distortion influence on single-slab heat capacity laser output [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(1):45~49
李劲东,郭明秀,复文强等. 热畸变对单板条热容激光器输出的影响[J]. 中国激光, 2007, **34**(1):45~49
- 8 Qi Wenzong, Huang Wei, Zhang Bin *et al.*. Thermal distortion measurements and absorption analysis by finite element method of high power DF laser reflectors [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(3):379~383
齐文宗,黄伟,张彬等. DF强激光反射镜热畸变的检测及热吸收的有限元分析[J]. 中国激光, 2005, **32**(3):379~383
- 9 Zhang Junwei, Zhou Yi, Zhou Hai *et al.*. Effect of transient change of temperature on large-aperture optical element [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(2):333~337
张军伟,周忆,周海等. 瞬态温度变化对大口径光学元件的影响[J]. 中国激光, 2009, **36**(2):333~337
- 10 Zhao Di, Liu Guixi, Zhu Guoxi. Measurement and simulation of temperature field for computer chassis [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2006, **27**(6):1128~1129
赵地,刘贵喜,朱国玺. 计算机机箱温度场的测试与仿真[J]. 仪器仪表学报, 2006, **27**(6):1128~1129
- 11 Kong Qiongxiang, Yu Bingfeng, Pan Zhen *et al.*. Experimental research on indoor air temperature distributions with underfloor air supply [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2006, **40**(9):1074~1078
孔琼香,俞炳丰,潘振等. 地板送风室内温度不均匀分布特性的实验研究[J]. 西安交通大学学报, 2006, **40**(9):1074~1078
- 12 Feng Bin, Zhou Yi, Zhang Junwei *et al.*. Preliminary analysis of thermal influence on the large aperture optical element [J]. *Journal of Chongqing University (Natural Science Edition)*, 2006, **29**(10):74~77
冯斌,周忆,张军伟等. 大口径光学元件热稳定性初步分析[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2006, **29**(10):74~77
- 13 Feng Shulong, Zhang Xin, Weng Zhicheng *et al.*. Study on deformation of surface figure of large-aperture mirror in temperature field [J]. *Optical Technique*, 2005, **31**(1):41~43
冯树龙,张新,翁志成等. 温度对大口径主镜面面形变形的影响分析[J]. 光学技术, 2005, **31**(1):41~43
- 14 Zhang Junwei, Feng Bin, Zhou Yi *et al.*. Finite element analysis on ambient thermal stability of large aperture optical element [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2007, **19**(8):1295~1298
张军伟,冯斌,周忆等. 大口径光学元件环境热稳定性的有限元分析[J]. 强激光与粒子束, 2007, **19**(8):1295~1298
- 15 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
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