

角多路准分子激光主振荡器功率放大系统光束定位误差分配

王大辉¹ 赵军¹ 赵学庆¹ 黄珂¹ 孙昱薇² 张永生¹ 郑国鑫¹ 胡云¹

(¹ 西北核技术研究所激光与物质相互作用国家重点实验室, 陕西 西安 710024)

² 西北大学数学系, 陕西 西安 710069

摘要 对角多路准分子激光主振荡器功率放大(MOPA)系统进行物像共轭结构简化。利用传输矩阵和光线追迹,推导出像传递光路中光学元件扰动与相应像面光束定位误差之间关系式。根据九标度赋值矩阵,采用改进层次分析法确定指标权重系数,得到了影响系统稳定性的光学元件光束定位指标要求。结果表明,光学元件分配指标大小和像传递结构焦距、光学元件(反射镜)距离像传递结构物面距离有关,焦距越大指标越小,距离越远指标越大。测量了实验室环境下光学元件的稳定性,对测量结果和定位误差进行了分析,并在此基础上提出了光路设计和光路优化的建议。

关键词 准分子激光; 光学设计; 像传递; 误差分配; 改进层次分析; 稳定性测量

中图分类号 TN248.2 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP48.031401

Beam Positioning Error Budget of Angular Multiplexing Excimer Master Oscillator Power-Amplifier Laser System

Wang Dahui¹ Zhao Jun¹ Zhao Xueqing¹ Huang Ke¹ Sun Yuwei²

Zhang Yongsheng¹ Zheng Guoxin¹ Hu Yun¹

(¹ State Key Laboratory of Laser Interaction with Matter, Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an, Shaanxi 710024, China)

² Department of Mathematics, Northwest University, Xi'an, Shaanxi 710069, China

Abstract Angular multiplexing excimer master oscillator power-amplifier laser (MOPA) system is simplified by object-image conjugate structure. Relations between the drifts of optical components and the deviation of corresponding imaging plane are derived by transfer matrix and ray tracing. The index weight is determined by improved analytic hierarchy process according to nine scale evaluation matrix, and the beam positioning stability requirement of optical components which affects system stability is acquired. Results show that the error budget values of optical components is related to the focus of image-relaying and the distance from object plane. The values change conversely with the focuses. The optical components stability in laboratory environment is measured and compared with those of error budget.

Key words excimer laser; optical design; image-relaying; error budget; improved analytic hierarchy; measurement of stability

OCIS codes 140.0140; 080.2730; 320.0320; 080.0080

1 引言

由主振荡器和系列放大器组成的主振荡器功率放大(MOPA)系统可以实现高质量、高能量的激光输出,

收稿日期: 2010-09-07; 收到修改稿日期: 2010-10-28

基金项目: 激光与物质相互作用国家重点实验室基金(SKL110904)资助课题。

作者简介: 王大辉(1986—),男,硕士研究生,主要从事光学工程方面的研究。E-mail: chsslw@163.com

导师简介: 赵军(1955—),男,研究员,主要从事信号与信息处理等方面的研究。E-mail: zhaojun@163.com

为开展与惯性约束聚变相关的物理实验提供足够的靶面功率密度;而 MOPA 系统非常庞大,光路复杂,要保证光束指向精度对系统工程实施提出了严格的要求。因此,光束定位问题受到高功率激光系统研究者的高度重视。对固体激光装置而言,国内外均对靶面光束稳定性开展了细致的研究工作,如美国国家点火装置(NIF)推导出光学元件运动与靶点光束定位误差之间关系式,利用光线追迹得到影响因素误差分配值^[1~3];神光 III 装置根据上述公式利用线性加权法得到主要光学元件误差分配值^[4~6]。对于高功率准分子激光装置,通常采用光学角多路脉冲压缩技术和诱导空间非相干(EFISI)光束平滑技术^[7~9],以满足靶物理实验对激光脉宽和辐照均匀性的要求,这种平滑化角多路光束传输方式呈现了与固体激光不同的特点,需要结合具体光路布局,开展系统光束定位误差分配研究。

针对实验室的高功率准分子激光 MOPA 系统,本文基于光线追迹和传输矩阵研究了光学元件扰动与相应靶面光束定位误差之间的关系,在此基础上利用改进层次分析法研究了该系统靶面光束漂移误差的分配。

2 误差分配原理

2.1 系统分析与简化

高功率准分子激光系统采用平滑化角多路传输放大形式,光学系统为全程严格的像传递系统。考虑到多束激光光路布局上的一致性,选取其中一路进行靶面光束定位误差分配研究。根据平滑化准分子激光 MOPA 系统的光路特点,可以将像传递系统光路严格等效为依次排列的多个物像共轭结构。该系统采用了 3 种像传递结构,即 $4f$ 成像结构 1、无限远显微成像结构 2 和单透镜成像结构 3,其简化光路如图 2 所示。

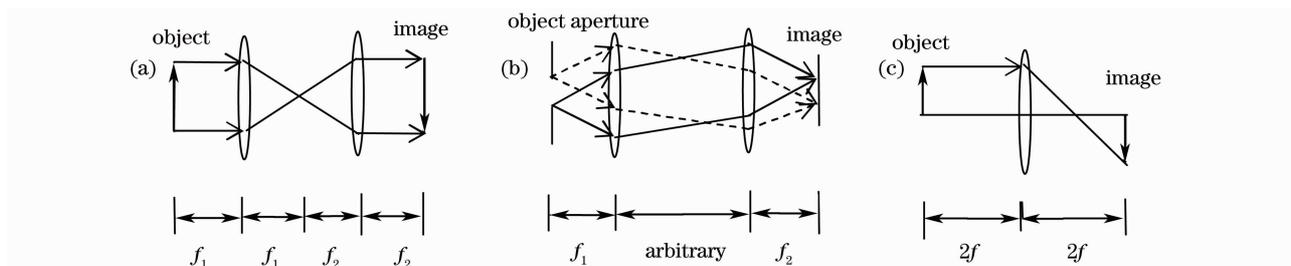


图 1 系统采用的三种像传递光路图。(a) $4f$ 成像结构,(b) 无限远显微成像结构,(c) $2f$ 单透镜等比成像结构

Fig. 1 Diagrams of image-relaying used by system. (a) $4f$ structure, (b) infinite distance structure, (c) $2f$ single lens structure

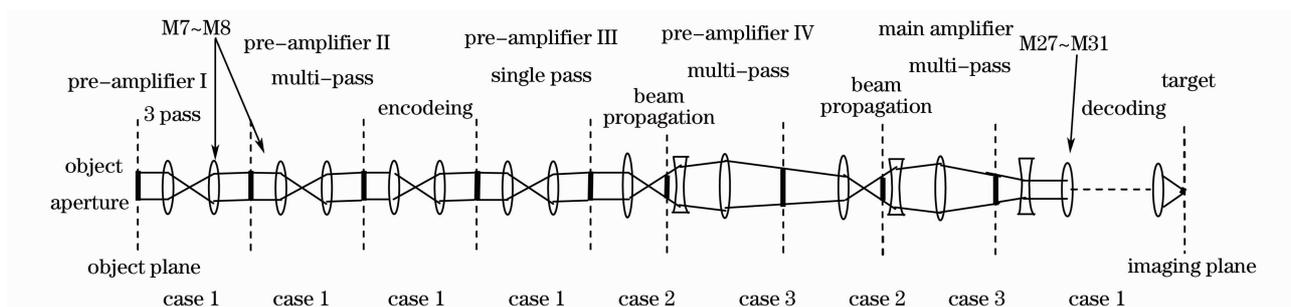


图 2 角多路准分子激光 MOPA 系统像传递结构简化图

Fig. 2 Diagram schematic of image-relaying of angular multiplexing MOPA laser system

2.2 光学元件扰动对相应靶面光束漂移的影响

透镜的平移和反射镜的转动是影响靶面光束漂移误差的主要因素^[8],所以主要分析透镜的平移和反射镜的转动对靶面光束定位的影响。利用传输矩阵和光线追迹,以反射镜位于 $4f$ 成像系统或者无限远显微成像系统外为例进行如下推导。如图 3 所示, T_3, T_4 是角漂反射镜前 $4f$ 系统, P_1 是 T_3, T_4 组成像传递系统的像面, T_1, T_2 是角漂反射镜之后的 $4f$ 系统, P_2 是 T_1, T_2 组成像传递系统的像面。推导计算以反射镜绕 Y 轴旋转为研究对象,计算光束经过空气 L_1, T_1, T_2 组成的像传递传输路径成像于 T_2 的像面 P_2 时,反射镜绕

Y 轴旋转扰动 $\Delta\theta$ 与 P_2 像面处光束偏移 $\Delta x'$ 之间的关系。

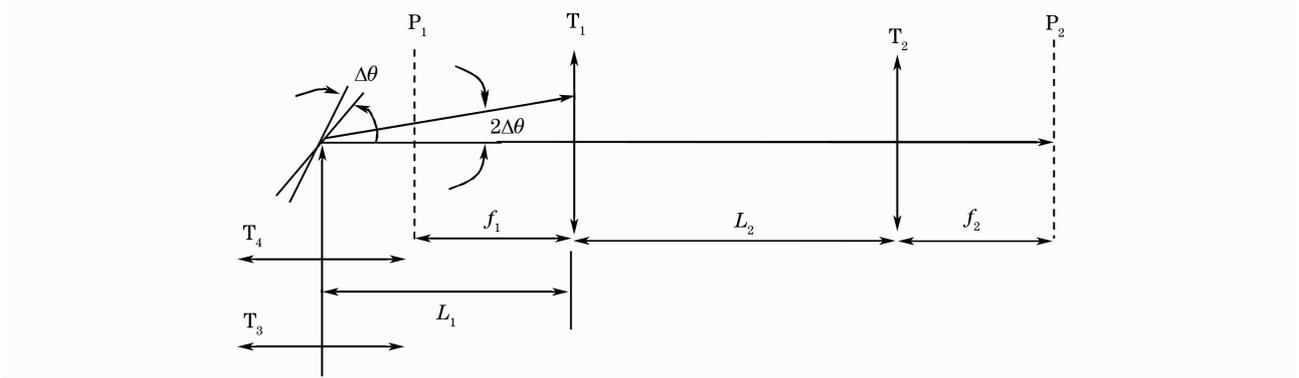


图 3 反射镜位于像传递结构外光路图

Fig. 3 Optical diagram when the reflector locates outside of image-relaying structure

由矩阵光学可以得到

$$\begin{bmatrix} \Delta x' \\ \Delta\theta' \end{bmatrix} = \mathbf{M} \begin{bmatrix} \Delta x \\ 2\Delta\theta \end{bmatrix}, \mathbf{M} = \begin{bmatrix} 1 & f_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f_2} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f_1} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (1)$$

由 $\Delta x=0$ 可以得到:

$$\begin{bmatrix} \Delta x' \\ \Delta\theta' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_2 \cdot 2\Delta\theta \cdot \left(\frac{f_1 - L_1}{f_1}\right) \\ \left[1 - \frac{L_2}{f_2} + L_1 \left(-\frac{1}{f_2} - \frac{1 - L_2/f_2}{f_1}\right)\right] \cdot 2\Delta\theta \end{bmatrix}. \quad (2)$$

所以, P_2 像面处光束位移为

$$\Delta x' = f_2 \cdot 2\Delta\theta \cdot \left(\frac{f_1 - L_1}{f_1}\right). \quad (3)$$

同理, 归纳得到光学元件扰动所导致的相应像传递结构像面光束位置的变化关系如表 1 所示。表 1 中, f_1 和 f_2 分别是像传递结构的第一个和第二个透镜焦距, L 是反射镜距离像传递结构第一个透镜的距离。

表 1 光学元件漂移与相应像面偏移关系

Table1 Relations between the drifts of optical components and the deviation of corresponding imaging plane

Optical components	Position	Drift	Deviation of imaging plane
Reflector	Outside of case 1 or case 2	$\Delta\theta$	$\Delta x' = f_2 \cdot 2\Delta\theta \left(\frac{f_1 - L}{f_1}\right)$
	Inside of case 1 or case 2	$\Delta\theta$	$\Delta x' = f_2 \cdot 2\Delta\theta$
	Outside of case 3	$\Delta\theta$	$\Delta x' = (2f - L) \cdot 2\Delta\theta$
Lens	First lens of case 1 or case 2	Δx	$\Delta x' = f_2 \cdot \Delta x / f_1$
	Second lens of case 1 or case 2	Δx	$\Delta x' = f_2 \cdot \Delta x / f_2 = \Delta x$
	Lens of case 3	Δx	$\Delta x' = 2\Delta x$
Object aperture	Front_end	Δx	$\Delta x' = f_2 \cdot \Delta x / f_1$

2.3 光学模块和光学元件误差分配理论

2.3.1 靶面定位误差分配

靶面光束定位误差可分为光路准直导致的光束偏移误差和光学元件结构漂移导致的光束定位误差两部分, 简称为准直误差和漂移误差。虽然在准直过程中漂移误差对准直有一定的影响, 但归根结底还是漂移误差, 所以将准直误差和漂移误差看作是独立量, 互不相干。根据数理统计理论有表达式^[10,11]

$$\sigma_{\text{Total}}^2 = \sigma_{\text{Alignment}}^2 + \sigma_{\text{Drift}}^2 \leq \sigma_{\text{Target}}^2, \quad (4)$$

式中 σ_{Total} 、 $\sigma_{\text{Alignment}}$ 、 σ_{Drift} 和 σ_{Target} 分别是打靶位移总偏差、打靶前的准直偏差、系统漂移产生的偏差和靶面光束

定位总偏差。

2.3.2 确定光学模块和光学元件权重因子

将系统根据位置、功能不同分为几个模块,根据公式计算出各个模块可能产生的最大偏移量。利用判断矩阵法,两两之间根据大小做出比较,利用1~9来确定重要程度,得到赋值判断矩阵。

利用改进的层次分析法确定各个模块权重因子^[12,13],即根据最优传递矩阵概念提出,对判断矩阵进行调整,得到拟优意义下的一致矩阵,进而求出各指标的权重因子。设得到的九标度判断矩阵为 $\mathbf{A}=(a_{ij})$ 为 p 阶矩阵,则 \mathbf{A} 为互反矩阵,即 $(a_{ij})=1/(a_{ji})$,且 $(a_{ii})=1$ 。令 $\mathbf{B}=\ln(\mathbf{A})$,则 \mathbf{B} 为反对称矩阵,即 $(b_{ij})=-b_{ji}$,且 $(b_{ii})=0$ 。令矩阵 \mathbf{C} 满足

$$c_{ij} = \frac{1}{p} \sum_{k=1}^p (b_{ik} + b_{kj}), \quad (5)$$

则 \mathbf{C} 为 \mathbf{B} 的最优传递矩阵,即矩阵 \mathbf{C} 满足 $J(\mathbf{C}) = \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^p (c_{ij} - b_{ij})^2$ 最小。令 $\mathbf{A}^* = e^{\mathbf{C}}$,可认为 \mathbf{A}^* 是 \mathbf{A} 的拟优一致性矩阵,此时根据 \mathbf{A}^* 的最大特征值求出修正的归一化主特征向量,即为指标权重向量,公式为

$$w_j = 1 / \sum_{k=1}^p a_{kj}^*. \quad (6)$$

得到的结果不需要进行一致性检验,大大提高了计算效率。

线性加权法公式为

$$\sigma_j^2 = w_j \sigma^2. \quad (7)$$

根据(7)式即可得到各个模块误差分配量。其中 σ_j 为第 j 个模块偏差, w_j 为第 j 个模块权重系数, σ 为总偏差,利用光学元件扰动和相应靶面漂移误差的关系式即可得到各个光学元件分配值。

3 结果与分析

3.1 光学模块和光学元件误差分配结果

按靶面定位误差为30~50 μm 的总体要求进行分配,暂取下限值。根据国内外大型激光装置的研制经验,分配准直误差的比例一般为20%,漂移误差分配的比例为80%,得到准直误差分配为13.41 μm ,漂移误差为26.83 μm 。

利用(7)式得到各个模块和光学元件分配的误差量,光学元件的分配值以放大器I和II预放模块和角多路解码模块为例,结果如表2,3所示,其中M为反射镜,L为透镜。

表2 Pre-amplifier I和Pre-amplifier II预放模块光学元件分配值

Table 2 Stability budget values of optical components of Pre-amplifier I and Pre-amplifier II module

Optical components	L ₀₈	L ₀₉	M ₇	M ₈	L ₁₀	L ₁₁
Lens focus	297 cm	297 cm	/	/	297 cm	297 cm
Distance from object	30 cm	30 cm	207 cm	189 cm	/	/
Stability requirement	15.9 μm	15.9 μm	9.3 μrad	9.8 μrad	15.9 μm	15.9 μm

表3 角多路解码模块光学元件稳定性分配值

Table 3 Stability budget values of optical components of angular multiplexing encoding module

Optical components	M ₂₇	L ₂₂	M ₂₈	M ₂₉	M ₃₀	M ₃₁	L ₂₃
Lens focus	/	720 cm	/	/	/	/	119 cm
Distance from object	400 cm	/	arbitrary	arbitrary	arbitrary	arbitrary	/
Stability requirement	4.8 μrad	9.2 μm	2.9 μrad	2.9 μrad	2.9 μrad	2.9 μrad	4.2 μm

3.2 镜架光学稳定性测量

为了测试现有典型光学支撑镜架上光束的稳定性对靶面光束的影响,验证其是否满足分配要求,采用图4的透镜和反射镜光学稳定性测试方案^[14,15]进行测量。该方案利用He-Ne激光器、衰减片、被测镜架、图采设备激光束分析器(LBA)以及自带图像处理软件进行稳定性测试,在实验室环境下LBA测得的光斑重

心数据即是镜架的光学稳定性(其中透镜测量采用单透镜 $2f$ 等比成像结构,透镜焦距为 1 m)。得到光路中典型反射镜和透镜上的光束偏移如图 5 所示,反射镜 Y 值为 $3\ \mu\text{rad}$ 每单位,透镜 Y 值为 $3\ \mu\text{m}$ 每单位。

3.3 结果分析

从误差分配数据看出,对表 2 中反射镜和表 3 中反射镜进行比较,像传递透镜焦距越大,光程越长,单位变化靶面偏移越大,分配的定位误差指标也就越小。当反射镜位于 $4f$ 成像系统或者无限远显微成像系统外时,对反射镜 M_7 和 M_8 进行比较得知,靶面光束定位误差还和反射镜与相应像传递系统物面的距离有关。相同反射镜偏转量情况下,距离越小靶面光束定位误差越小,尤其是反射镜和物面重合时,靶面光束定位误差最小。控制反射镜的位置可以减小相应像面光束位移,但此时利用反射镜进行光路调试变得困难,反射镜调节量越大,角度的偏移量越大,所以要兼顾两者的影响,实现像面光束偏移和光路调节的最优化。对透镜 L_{22} 和 L_{23} 进行比较可以看出,靶面光束位置主要和像传递光路的焦距有关。

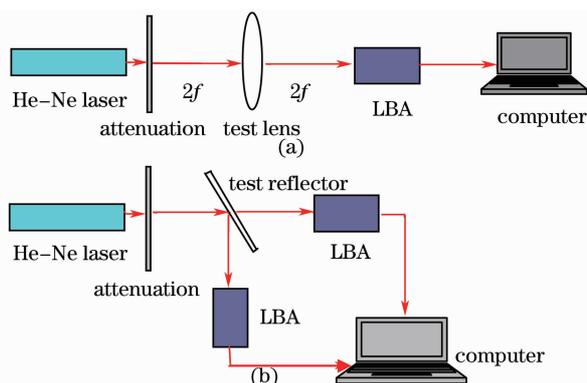


图 4 透镜(a)和反射镜(b)结构稳定性测量示意图

Fig. 4 Schematic diagram of structure stability on lens (a) and reflectors (b)

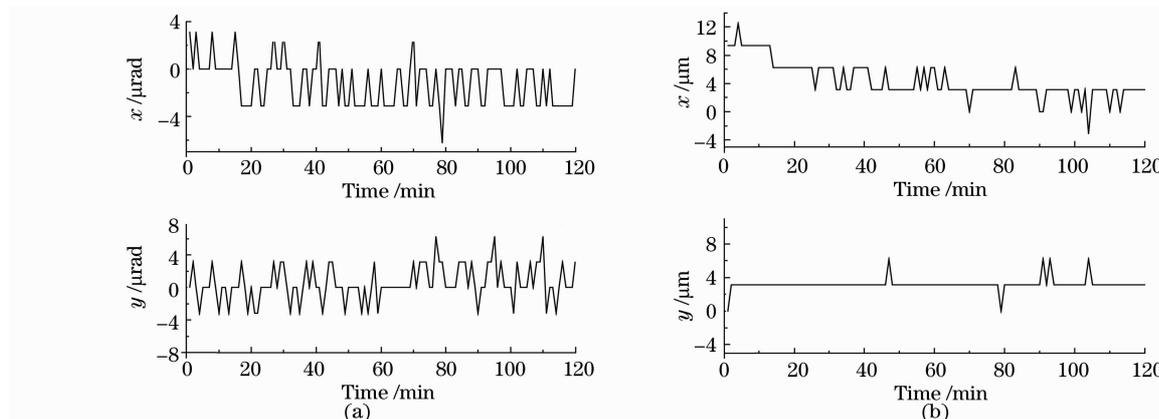


图 5 反射镜(a)和透镜(b)上光束稳定性测量曲线

Fig. 5 Beam stability of test reflector (a) and lens (b)

图 5(a)是实验室质量典型反射镜上光束稳定性测量曲线,可以看出反射镜上光束变化 $9\ \mu\text{rad}$,在实验室现有影响因素(包括振源、镜架结构稳定性、气流扰动和温度等)下,指标要求高的反射镜稳定性较难满足。从图 5(b)中数据结果可知,透镜上光束偏移量 $3\ \mu\text{m}$ 左右,现有的透镜稳定性能够满足指标要求。所以,需要对造成反射镜不能满足指标要求的影响因素进行特殊处理,包括振源隔振、支撑结构隔振以及反射镜架的优化等。

4 结 论

根据九标度赋值矩阵,采用改进的层次分析方法确定指标权重因子,对角多路准分子激光 MOPA 系统各光学模块和光学元件进行了误差分配,得到相应的指标要求。由实验结果可知,误差分配需要根据实验情况进行多次再分配,对难以满足指标要求光学元件的分配值进行调整,以达到实际应用的最优化。分配结果不仅对不同位置光学元件光束定位提出指标要求,也可为光路设计及光路优化提供重要参考。

参 考 文 献

- 1 David Hammer, Freeman Dyson. Inertial Confinement Fusion(ICF) Review[R]. 1996, JSR-96-300
- 2 David J. Trummer, Richard J. Foly, Gene S. Show. Stability of Optical Elements in the NIF Target Area Building [R]. 1995, UCRL-JC-29682J

- 3 L. Pittenger. National Ignition Facility SubSystem Design Requirements Target Positioning Subsystem [R]. 1995, SDDR 1. 82, UCRLAD-1269S5Rev2
- 4 Stanley C. Sommer, Erlan S. Blis. Beam Position error budget developed for NIF. Lawrence Livermore National Laboratory [R]. 1996, UCRL-JC-129755
- 5 Zhao Dongfeng, Dai Yaping, Yi 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. 高功率装置激光靶场光学系统的误差分析[J]. *中国激光*, 2004, **31**(12): 1425~1428
- 6 Shi Zhiquan, Wei Xiaofeng, Ma Chi *et al.*. Beam position stability analysis in the large solid state laser system [J]. *High Power Lasers & Particle Beams*, 2000, **12**(S): 167~170
师智全, 魏晓峰, 马 驰 等. 大型固体激光光束定位稳定性分析[J]. *强激光与粒子束*, 2000, **12**(S): 167~170
- 7 L. A. Rosocha, J. A. Hanlon, J. McLeod *et al.*. Aurora multikilojoule KrF laser system prototype for inertial confinement fusion [J]. *Fusion Technology*, 1987, **11**(3): 497~531
- 8 A. M. Hunter, R. O. Hunter. Bidirectional amplification with nonsaturable absorption and amplified spontaneous emission [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1981, **QE-17**(9): 1879~1887
- 9 J. R. Liu, X. Q. Zhao, A. P. Yi *et al.*. Experimental study on a long-pulse excimer laser system [C]. *SPIE*, 2005, **5627**: 242~246
- 10 J. Paisner, J. Boyes, S. Kumpan *et al.*. Conceptual Design of the National Ignition Facility [R]. 1995, USRL-JC-117365
- 11 R. E. English, J. Miller. Optical System Design[R]. 1996, UCRL-LR-105821-97-3, 112~124
- 12 Bai Xuemei, Zhao Songshan. Discussion of weight determined by index importance [J]. *Jiangsu Statistics*, 2008, **3**: 22~24
白雪梅, 赵松山. 由指标重要性确定权重的方法讨论[J]. *江苏统计*, 2008, **3**: 22~24
- 13 Li Yinguo, Li Xinchun. Weight determination of comprehensive evaluation model [J]. *J. Eastern Liaoning University (Social Sciences)*, 2007, **9**(2): 92~96
李因果, 李新春. 综合评价模型权重确定方法研究[J]. *辽东学院学报(社会科学版)*, 2007, **9**(2): 92~96
- 14 Zhang Chengxiang, Qiu Dehui, Geng Guoqing. Angel measuring system based on CCD image processing [J]. *Computer Automated Measurement & Control*, 2004, **12**(1): 32~34
张呈祥, 邱德惠, 耿国庆. 基于 CCD 图像处理的角度测量系统[J]. *计算机测量与控制*, 2004, **12**(1): 32~34
- 15 Wang Dahui, Zhao Jun, Zhao Xueqing *et al.*. Measurement and analysis on structure stability of optical mirror mounts [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(s1): 308~311
王大辉, 赵 军, 赵学庆 等. 光学支撑镜架结构稳定性测试及分析[J]. *中国激光*, 2010, **37**(s1): 308~311