

文章编号: 0258-7025(2007)03-0307-06

大口径八边形钕玻璃片支撑系统 的光机集成分析

刘志刚, 朱健强

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘要 控制由机械装夹方式所引入的波前畸变以提高惯性约束聚变(ICF)输出光束的质量,是在大口径钕玻璃片主放大器结构设计中必须考虑的。提出了一种新的有限元变形结果与光学元件面形畸变之间的数据处理方式,并与传统方式进行了对比。基于新的数据处理接口,利用光机集成分析方法对大口径八边形钕玻璃片的支撑系统结构设计参数进行优化。优化的结果保证了由支撑系统引起的透过波前畸变小于十分之一波长,同时波前畸变与设计参数变动的相关性最小。

关键词 光学设计;惯性约束聚变;光机集成分析;波前畸变;钕玻璃;支撑系统

中图分类号 TL 67;TL 64⁺5 **文献标识码** A

Integrated Optomechanical Analysis of Large Octagonal Nd:glass Support System

LIU Zhi-gang, ZHU Jian-qiang

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract Controlling the wavefront distortion introduced by mechanical mounting to raise the quality of output beam in inertial confinement fusion (ICF) facility must be considered in the structure design of the large aperture Nd:glass main amplifier. A novel method of data processing between the finite element deformation results and the surface distortion of optical element was presented and compared with the traditional method. The support system of large octagonal Nd:glass is optimized with integrated optomechanical analysis method based on the new data processing interface. The transmission wavefront distortion introduced by optimal support system is less than tenth wavelength and the correlation between the wavefront distortion and the design parameters variation is little.

Key words optical design; inertial confinement fusion; integrated optomechanical analysis; wavefront distortion; Nd:glass; support system

1 引 言

神光 II 多功能高能激光系统(又称神光 II 第九路系统)是目前中国单束输出能量最大的激光系统,末端输出光束口径为 $\phi 350$ mm,输出能量为 4500 J (3 ns, 1ω),其所提供的输出能量的 75% 主要通过 $\phi 350$ mm口径的主放大器对激光进行放大获得。作为第九路系统中最重要的单元器件之一的 $\phi 350$ mm

口径的主放大器,在设计时除了要保证获得较大的增益以及较好的增益均匀性以外,还必须减少诸如抽运热源引起片状放大介质的波前畸变以及光束中心漂移、抽运引起的光束退偏、气流冷却引起的波前畸变的变化、放大介质机械装夹引起的波前畸变和光束退偏等效应对光束质量的影响以及对系统的潜在危害^[1]。为保证主放大器在工作状态下的系统光

收稿日期:2006-08-16;收到修改稿日期:2006-11-09

基金项目:国家 863-804-5 计划(2004AA845021)资助项目。

作者简介:刘志刚(1976—),男,江苏苏州人,博士研究生,主要从事惯性约束聚变装置的总体结构设计以及集成分析研究。E-mail: lzg_siom@mail. siom. ac. cn

导师简介:朱健强(1964—),男,江苏苏州人,研究员,博士生导师,目前研究方向为惯性约束聚变激光驱动器总体技术研究。E-mail: jqzhu@mail. shcnc. ac. cn

学性能,在设计阶段就必须对主放大器结构进行集成分析,获取放大介质在结构载荷、热载荷等载荷作用下所产生的系统波前畸变和光束物理特性的变化,以便有针对性地选取设计参数,提高系统的总体性能指标。

在神光Ⅱ第九路系统中由于系统光束口径的增大使得放大介质的尺寸和质量也随之增大,因此重力所导致的放大介质表面形变对光束透过波前畸变的影响也越来越凸显。为减小镜片的重力形变,在结构设计中通常采用多点浮动支撑的方式,例如在国家点火装置(NIF)的主放大器中就采用了波浪形不锈钢板作为放大介质支撑方式^[1],在神光Ⅱ第九路中主放大器的支撑结构也采用了多点支撑的方式。针对八边形钨玻璃片的特殊形状,本文采用集成分析的原理,利用有限元分析软件 Ansys 和数据转换接口对支撑结构参数进行分析,从而保证由重力形变所引入的光束透射波前畸变小于十分之一波长,满足了系统设计指标。

2 数据转换接口

集成分析就是通过数据转换接口将分析数据在各学科的分析软件中相互传送,通过这些数据传送将不同学科的分析软件集成一体,从而实现在多物理场(如力场、热场、磁场、流场)等共同作用下系统综合性能的评估^[2~4]。由于有限元计算而得的光学元件表面位移场数据混合了光学元件的刚体位移信息以及元件的表面畸变信息,不能直观反应出系统光学性能的变化,因此需要通过数据转换接口将有限元计算的位移场数据处理成光学分析所能接受的数据形式^[5]。目前普遍应用的光机数据转换接口工具是泽尼克(Zernike)多项式^[5~8]。泽尼克多项式是描述波前像差的常用工具,可以精确地描述产生畸变的光学表面,它由互为正交、线性无关且可以唯一的、归一化描述系统圆形孔径波前畸变的函数系组成,并且多项式中的每一项与传统的塞德尔(Seidel)像差能够相对应,便于直接识别和处理各种光学像差,其极坐标下的多项式表达式为^[5]

$$Z(r, \theta) = A_{00} + \sum_{n=2}^{\infty} A_{n0} R_n^0(r) + \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^n R_n^m [A_{nm} \cos(m\theta) + B_{nm} \sin(m\theta)], \quad (1)$$

$$R_n^m(r) = \sum_{s=0}^{(n-m)/2} (-1)^s \frac{(n-s)!}{s! \left(\frac{n+m}{2} - s\right)! \left(\frac{n-m}{2} - s\right)!} r^{(n-2s)},$$

式中 A_{nm} 和 B_{nm} 为泽尼克系数, n 和 m 均为整数, $n-m$ 为偶数,且 $n \geq m$ 。

有限元计算的结果数据转换为泽尼克多项式一般分为:数据处理和多项式拟合。数据处理部分是将有限元分析计算所得到的节点结果数据转换成光学分析所能接受的基于垂度坐标系或基于表面法向坐标系下的数据形式。本文采用基于垂度坐标系下数据形式将光学元件的变形参数直接表示为平行光轴方向的位移,而该位移就是光束通过钨玻璃片后平行光轴方向的波前畸变。

图 1 表示有限元计算所得的节点位移与垂度坐标下平行光轴方向的位移的关系^[6],其中 P_0 为元件原始表面上的节点,变形后移到 P_1 点,其节点的轴向和径向位移分别为 ΔZ 和 ΔR ,而在垂度坐标系下此形变沿平行光轴方向的位移是 P_0Q , θ 和 $\Delta\theta$ 分别为 P_0 点在原始表面上的斜率和其变形后在 P_1 点处斜率的增量。在计算位移 P_0Q 时,一般将其近似为 P_0S ^[5],由此可得

$$P_0Q \approx P_0S = \Delta Z - \Delta R \tan(\theta + \Delta\theta), \quad (2)$$

从(2)式可知要准确计算 P_0S , 必须要得到斜率的增

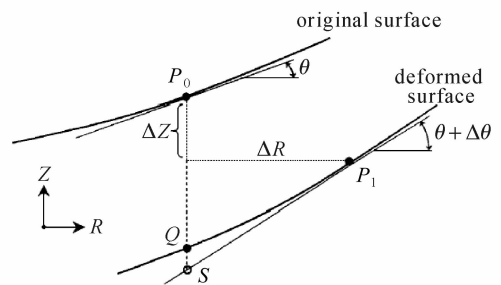


图 1 有限元节点位移与平行光轴方向位移的对比示意图

Fig. 1 Scheme of node displacement versus sag displacement

量值 $\Delta\theta$, 为此需要在有限元建模中引入表面壳单元,从而增加模型的复杂程度。为简化计算,可将(2)式表示为

$$P_0S = \Delta Z - \Delta R \left. \frac{\partial Z(r)}{\partial r} \right|_{P_0}, \quad (3)$$

式中 $Z(r)$ 为光学元件的表面垂度方程。这种数据处理方式采用了多次近似,引入的误差较大。为此,提出一种新的数据处理方式。根据图 1, 平行光轴方向

的位移 P_0Q 可以表达为在同一的坐标系内已变形表面与原始表面方程之差, 即

$$P_0Q = f(r, \theta) |_{P_0} - f_0(r, \theta) |_{P_0}, \quad (4)$$

式中 $f(r, \theta)$ 为已变形表面的曲面方程, $f_0(r, \theta)$ 为原始表面的曲面方程。由于通过有限元模型可以方便地获取构成原始表面和已变形表面上节点的坐标值, 因此可以通过泽尼克多项式拟合将已变形表面的曲面方程与原始表面的曲面方程均表示成泽尼克多项式的组合形式, 然后通过(4)式即可获得对应项系数的改变, 从而直接反映出光学元件的表面畸变信息。

泽尼克多项式拟合常用的方法有两种, 一是采用最小二乘法, 二是通过格拉姆-施密特 (Gram-Schmidt) 正交化方法解决多项式拟合中的正交性问题, 然后再采用最小二乘法拟合^[3]。本文采用了算法简洁的最小二乘法来求出式(1)中的多项式系数。

对于通过口径内的节点, 其由泽尼克多项式表示的变形可写为

$$Z_i = \sum_j C_j \Phi_{ji}, \quad (5)$$

式中 C_j 为泽尼克多项式的系数, Φ_{ji} 为所取的组成泽尼克多项式的正交函数组合, 求解最小误差平方和, 表示为

$$E(C_1, C_2, \dots, C_m) = \sum_{i=1}^n (Z_i - \delta_i)^2 = \sum_{i=1}^n (\sum_{j=1}^m C_j \Phi_{ji} - \delta_i)^2, \quad (6)$$

式中 δ_i 为节点由有限元结果转换而得的实际的垂度位移, 即图 1 中位移 P_0Q 。为求解 E 的最小值, 每个偏导数必须为零 (即 $\partial E / \partial C_i = 0, i = 1, 2, \dots, m$), 这样可得到方程组

$$\sum_{j=1}^m (\sum_{i=1}^n \Phi_{ki} \Phi_{ji}) C_j = \sum_{i=1}^n \Phi_{ki} \delta_i, \quad \text{其中 } k = 1, 2, \dots, m \quad (7)$$

求解方程组(7)即可得到最优的泽尼克多项式系数 C_j , 从而表示光束的波前畸变, 进而评估光学系统性能随支撑结构参数变化的趋势, 寻找出最优的支撑结构参数组合。下面以承受 1 g 加速度载荷的平凸透镜所产生的面型变化来验证两种不同数据处理公式(式(3)和式(4))对最终拟合数据的影响, 透镜的直径为 500 mm, 曲面半径为 1500 mm, 透镜中心厚 40 mm, 材料为钕玻璃, 固定方式为周边固定。拟合采用的泽尼克多项式为标准泽尼克多项的前 36 项, 为简便起见, 表 1 列出了拟合后前 10 项泽尼克多项式系数。

表 1 在两种数据处理方式下所拟合的前 10 项泽尼克多项系数

Table 1 Zernike coefficients fitted by two data processing methods

	Equation (3)	Equation (4)
Piston	1.8105×10^{-4}	1.8812×10^{-4}
x-Tilt	1.3606×10^{-7}	1.4992×10^{-7}
y-Tilt	-9.8812×10^{-10}	-1.0033×10^{-9}
Pri Astigmatism-x	1.6348×10^{-7}	1.8522×10^{-7}
Focus	-2.3887×10^{-4}	-2.3835×10^{-4}
Pri Astigmatism-y	-8.3888×10^{-8}	-7.9888×10^{-8}
Pri Trefoil-x	1.4936×10^{-7}	1.6731×10^{-7}
Pri Coma-x	3.7595×10^{-8}	6.4318×10^{-8}
Pri Coma-y	-2.0679×10^{-9}	-2.0999×10^{-9}
Pri Trefoil-y	-3.4274×10^{-9}	-3.5687×10^{-9}

从表 1 中可以看出, 在考虑数据处理时所引入的误差, 在分别采用两种数据处理方式后拟合所得的泽尼克多项式的系数是一致的。

3 分析模型

$\phi 350$ mm 口径的主放大器中装有两片八边形 N31 型钕玻璃片, 并与光束传播方向成布鲁斯特角 (56.8°) 放置, 其钕玻璃片的排布情况及物理参数分别如图 2 和表 2^[9] 所示。

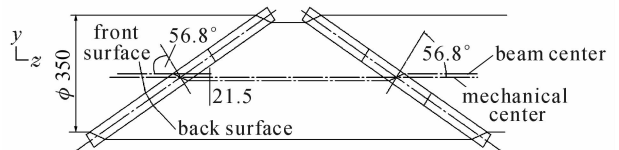


图 2 主放大器中钕玻璃片的排布示意图

Fig. 2 Scheme of the arrangement of Nd:glass slab in $\phi 350$ mm main amplifier

表 2 N31 型钕玻璃片物理性质参数

Table 2 Physical properties of the N31 Nd:glass

Young's modulus /GPa	52.7
Poisson's ratio	0.27
Density /(kg/m^3)	2830

由图 2 可知, 光束通过钕玻璃片后所引入的总的透射波前畸变 Δ , 可以表示为钕玻璃片前表面因重力形变引入的波前畸变 Δ_{front} 与后表面因重力形变引入的波前畸变 Δ_{back} 之和, 即

$$\Delta = \Delta_{\text{front}} + \Delta_{\text{back}}. \quad (8)$$

通过有限元软件计算出钕玻璃片前后表面在不同支撑结构下因重力所导致的形变量,然后利用数据转换接口和多项式拟合计算出各表面因形变所引入的波前畸变,最后利用(8)式获取光束通过钕玻璃片后所引入的总的透射波前畸变,整个分析的流程如图3所示。

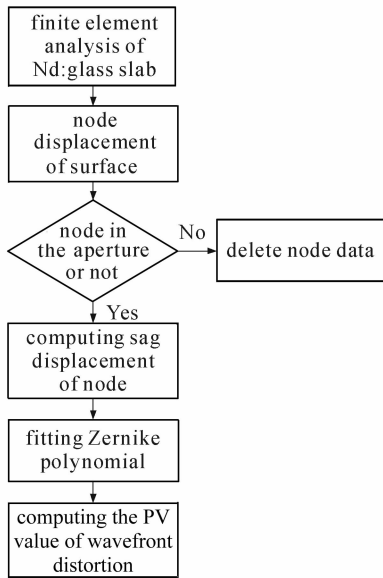


图3 分析流程框图

Fig. 3 Analysis process diagrams

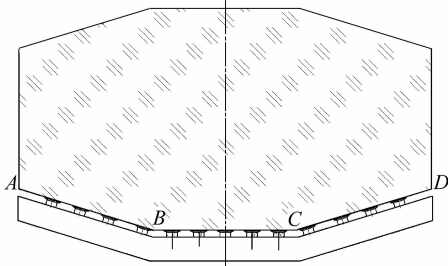


图4 钕玻璃片多点支撑结构示意图

Fig. 4 Scheme of multi-point support structure of Nd:glass slab

在神光Ⅱ第九路主放大器中钕玻璃片采用多点支撑结构的支撑方式,为达到重力变形引入的波前畸变PV值小于十分之一波长(波长为632 nm)的设计指标,以支撑结构中的支撑点数目和支撑点位置为两个主要参数进行了优化分析。为讨论方便,将底边BC段和侧边AB,CD两段(见图4)二十等分,以 $t=1,2,3,\dots,10$ 分别代表支撑点离底边BC和侧边AB与CD线段两端的距离(即等分数)。载荷仅考虑重力的作用,且因结构的对称性,支撑点在选取时 also 对称分布。

4 结果讨论

首先计算底边单独支撑条件下的波前畸变PV值,支撑点的数目分别为2,3,4,5。其中在四点支撑和五点支撑条件下,最外侧的支撑点离底边两端的距离(即等分数) t 由 $t=1$ 变化到 $t=8$;计算所得的波前畸变PV值如表3所示。

由表3数据分析可知,奇数支撑点所引入的透射波前畸变比相应偶数支撑点引入的透射波前畸变要大,这表明对于底边单独支撑时,仅仅增加支撑点数目,不能减小因重力变形而导致的透射波前畸变。另外,在支撑点数目单纯选定为偶数或奇数的条件下,增加支撑点数目可以减小波前畸变的数值,但是改变量并不明显。

其次计算底边与侧边同时支撑(侧边支撑点数目为1和2)条件下的波前畸变PV值。底边支撑点数目为2和3,支撑点离底边两端的距离(即等分数) t 由 $t=1$ 变化到 $t=9$,侧边支撑点的位置固定,一是位于侧边中央(即等分数 $t=10$),二是位于侧边中央两侧(即等分数 $t=9$),计算所得的波前畸变PV值如表4所示。

由表4分析可得,侧边支撑点的引入能够大幅度地降低因重力变形所引入的透射波前畸变。在侧边支撑点位置和数目固定的条件下,选取适当的底边支撑点位置已经能够将因重力变形而引入的透射波前畸变PV值降低到十分之一波长的设计指标,但是计算结果表明底边支撑位置的变化会导致透射波前畸变的剧烈变化,说明在有侧边支撑点的条件下,光束通过钕玻璃片时因重力变形而引入的透射波前畸变对于底边支撑点位置的变化是敏感的。同时对于底边和侧边各有两点支撑的情形而言,其透射波前畸变随底边支撑点位置变化的幅度是较小的。

根据以上分析,选取底边和侧边均为两个支撑点,其支撑点离两端的距离(即等分数) t 由 $t=1$ 变化到 $t=9$,计算所得的波前畸变PV值如表5所示。由表5可知,要达到重力变形引入的波前畸变PV值小于十分之一波长的设计指标,同时透射波前畸变又与支撑点位置变动相关最小,此时最少支撑点排布是底边两点,支撑点的跨度可以从底边长度的10%变化到60%;侧边两点,支撑点的跨度可以从侧边长度的40%变化到70%。

表 3 底边不同支撑点数目和支撑点位置条件下的波前畸变 PV 值

Table 3 PV value of wavefront distortion induced by different support numbers and support spacing at the bottom

	Two points support /nm	Three points support /nm	Four points support /nm						Five points support /nm									
			t = 1	t = 2	t = 3	t = 4	t = 5	t = 6	t = 7	t = 8	t = 1	t = 2	t = 3	t = 4	t = 5	t = 6	t = 7	t = 8
t = 1	228.3	233.9																
t = 2	227.5	266.9	224.6							231.6								
t = 3	247.1	286.2	221.6	236.8						237.8	257.5							
t = 4	275.5	314.7	233.5	251.3	261.3					248.3	270.1	281.1						
t = 5	315.0	363.3	239.5	262.0	273.3	289.3				256.0	284.4	296.8	314.9					
t = 6	361.9	403.9	240.6	267.2	280.5	300.3	333.4			259.0	295.0	309.7	328.5	362.7				
t = 7	413.2	435.4	247.7	281.5	297.8	319.6	357.9	388.1		267.7	313.1	328.1	345.6	380.6	407.3			
t = 8	451.9	460.4	260.9	307.1	323.5	343.1	381.8	411.3	433.1	281.4	331.9	346.1	361.9	396.9	423.1	441.4		
t = 9	478.9	479.1	260.3	309.0	326.1	346.8	389.4	419.7	442.2	461.8	277.4	330.0	345.0	362.2	400.9	428.4	447.5	464.0

表 4 底边与侧边同时支撑条件下的波前畸变 PV 值

Table 4 PV value of wavefront distortion induced by support only at the bottom and combined support at the bottom and the laterals

	Two points support at the bottom /nm	Two points support at the bottom, one point support at the laterals /nm	Two points support at the bottom, two points support at the laterals /nm	Three points support at the bottom /nm	Three points support at the bottom, one point support at the laterals /nm	Three points support at the bottom, two points support at the laterals /nm
t = 1	228.3	76.10	91.08	233.9	68.86	47.07
t = 2	227.5	66.23	92.92	266.9	69.50	45.08
t = 3	247.1	42.52	73.55	286.2	78.85	52.99
t = 4	275.5	59.07	46.65	314.7	108.4	67.33
t = 5	315.0	67.74	60.60	363.3	126.0	73.21
t = 6	361.9	70.79	75.00	403.9	134.4	78.47
t = 7	413.2	100.7	74.63	435.4	156.3	95.53
t = 8	451.9	138.6	84.71	460.4	179.7	115.4
t = 9	478.9	134.1	90.03	479.1	170.4	104.5

表 5 底边和侧边各两点支撑,支撑间距变化条件下的波前畸变 PV 值

Table 5 PV value of wavefront distortion induced by support spacing of two points at the bottom and the laterals

	Two points at the laterals /nm								
	t = 1	t = 2	t = 3	t = 4	t = 5	t = 6	t = 7	t = 8	t = 9
t = 1	104.7	93.90	95.67	94.52	86.43	90.53	92.42	88.91	91.08
t = 2	108.8	98.90	101.0	96.01	87.50	90.65	94.39	89.40	92.92
t = 3	94.44	77.26	80.91	74.76	64.26	70.73	76.90	69.78	73.55
t = 4	81.46	62.91	48.97	43.37	39.28	42.99	49.76	43.31	46.65
t = 5	75.64	54.10	46.51	43.38	39.35	48.21	58.14	53.80	60.60
t = 6	74.66	51.99	48.18	43.91	41.76	56.74	70.70	68.30	75.00
t = 7	67.40	51.25	41.96	40.29	39.34	52.54	68.67	68.39	74.63
t = 8	69.24	70.48	46.44	42.13	49.75	50.40	65.51	79.59	84.71
t = 9	64.77	65.55	41.33	40.41	44.29	58.09	73.53	82.94	90.03

5 结 论

利用光机集成方法对大口径八边形钹玻璃片支

撑系统进行分析,当钹玻璃片支撑系统结构参数满足底边支撑点数目为二,支撑点之间间距为底边长度的 10%~60%;侧边支撑点数目各为二,支撑点

之间间距为侧边长度的 40%~70% 时能够以最少的支撑点数目将因重力变形所引入的波前畸变 PV 值降低到十分之一波长, 并且透射波前畸变又与支撑点位置变动相关最小。

参 考 文 献

- 1 Terry Alger, AI Erlandson, Steve Fulkerson *et al.*. Physics basis for optical performance of the NIF amplifiers [R]. UCRL-ID-132680, 1999
- 2 Alson E. Hatheway. A review of finite element analysis techniques: capabilities and limitations [C]. *Critical Review*, 1992, **CR43**:367~397
- 3 Yang Yi, Chen Shijin, Zhang Wei. Review of thermal-structural-optical integrated analysis of space remote sensor [J]. *Optical Technique*, 2005, **31**(6):913~917
杨 恹, 陈时锦, 张 伟. 空间光学遥感器光机热集成分析技术综述[J]. 光学技术, 2005, **31**(6):913~917
- 4 Ren Qifeng, Shen Mangzuo. Integrated optical analysis of a reflecting optical system with all metal components [J].

Opto-Electronic Engineering, 2005, **32**(12):55~58
任栖峰, 沈忙作. 全金属反射光学系统主镜的集成分析[J]. 光电工程, 2005, **32**(12):55~58

- 5 K. B. Doyle, V. L. Genberg, G. J. Michels. Integrated Optomechanical Analysis [M]. Washington: Publication of SPIE, 2002. 50~51
- 6 P. A. Coronato, R. C. Juergens. Transferring FEA results to optics codes with Zernikes: a review of techniques [C]. *SPIE*, 2003, **5176**:128~136
- 7 Richard C. Juergens, Patrick A. Coronato. Improved method for transfer of FEA result to optical codes [C]. *SPIE*, 2003, **5174**:105~115
- 8 Yang Yi, Zhang Wei, Chen Shijin. Study on data transmission tool for thermal/structural/optical integrated analysis [J]. *Journal of Astronautics*, 2005, **26**(2):201~205
杨 恹, 张 伟, 陈时锦. 光机热集成分析中数据转换接口的研究[J]. 宇航学报, 2005, **26**(2):201~205
- 9 Jiang Zhonghong. ICF laser glasses [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(9):1265~1276
姜中宏. 用于激光核聚变的玻璃[J]. 中国激光, 2006, **33**(9):1265~1276



中国知名光学期刊 有奖订阅抽奖名单揭晓

中国知名光学期刊

- 《光学学报》
- 《中国激光》
- 《光子学报》
- 《应用光学》
- 《应用激光》
- 《光散射学报》
- 《光电子技术》
- 《光学精密工程》
- 《中国激光医学杂志》
- 《红外与毫米波学报》
- 《量子电子学报》
- 《强激光与粒子束》
- 《原子与分子物理学报》
- 《光学与光电技术》
- 《激光生物学报》
- 《红外与激光工程》
- 《中国激光医学杂志》
- 《大气与环境光学报》
- 《激光与光电子学进展》
- Chinese Optics Letters

于2006年8月~12月, 联合举行了用户有奖订阅活动, 读者反馈十分踊跃。经过公开抽奖, 产生了13位获奖者。

一等奖

- 阎军 (北京)
- 赵顺明 (苏州)

二等奖

- 吴谨 (北京)
- 石枫 (太原)
- 佟成国 (哈尔滨)

三等奖

- 朱启亚 (扬州)
- 丁晔 (绵阳)
- 胡幼彪 (上海)
- 张伟珠 (上海)
- 卢常勇 (武汉)
- 杨晓山 (北京)
- 吴立 (北京)
- 张庆礼 (合肥)



对本次活动的参与者表示衷心的感谢! 本活动最终解释权归光学期刊联合编辑部所有