

文章编号: 0253-2239(2008)12-2330-05

叠栅偏折层析测量火焰温度和密度分布

陈云云 宋 旻 贺安之 李振华

(南京理工大学信息物理与工程系, 江苏 南京 210094)

摘要 提出将带滤波的叠栅偏折层析系统用于存在化学反应的多组分复杂气体流场的诊断。以丙烷的燃烧火焰为例, 实验提取出叠栅条纹的偏移量并转换为偏折角, 然后基于偏折层析的滤波反投影算法重建出场的折射率分布, 给出了两种不同情况下给定截面的三维温度和密度分布。对比发现, 对存在化学反应的多组分火焰流场不能基于假设研究对象是空气流场, 而必须对火焰流场本身发生的化学反应及生成物进行考虑, 混合流场的等效 G-D 常量和分子量必须根据不同场的具体组分情况进行修正。

关键词 光学测量; 光学层析; 叠栅偏折层析; 流场测量; 滤波反投影算法

中图分类号 O438 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS20082812.2330

Temperature and Density Distribution Measurement of Flame by Using Moiré Deflection Tomography

Chen Yunyun Song Yang He Anzhi Li Zhenhua

(Department of Information Physics & Engineering, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China)

Abstract The filtered moiré deflection tomography is proposed to diagnose multi-component complex flow fields which contain chemical reactions. As an example, the combustion of propane is chosen as the measured field. The offset of moiré fringe is refined and transformed to deflection angle. The refractive-index distribution of field is reconstructed by deflection filtered back projection (DFBP), and the three-dimensional temperature and density distributions of a certain cross section at two different situations are given. By contrast, multi-component complex flow fields should not regard air as the studied object, chemical reaction and resultant of flow field must be considered, and the equivalent G-D constant and molecular weight of mixed flow field must be amended, according to specific conditions of the measured objects.

Key words optical measurement; optical computerized tomography; moiré deflection tomography; flow field measurement; filtered back-projection

1 引 言

光学层析 (Optical computerized tomography, OCT) 方法具有实时、非接触、稳定等特点, 在相位流场的瞬态测试特别是实时显示中具有重要作用^[1~3]。在光学层析的发展过程中, 由于叠栅偏折层析具有装置简单、抗干扰能力强、测量动态范围大等特点, 被广泛用于对流场的密度、温度等参数进行测试^[4,5], 对其重建算法的研究也层出不穷^[6~9]。

O. Kafri^[10]首先提出可以用叠栅偏折测量相位物体。随后 E. Keren 等^[11]对氢氧燃烧火焰的温度场分布进行了研究, 研究是以氢氧完全燃烧生成水为前提的, 也就是说研究对象是单一组分的气体流场, 此外对火焰的诊断还基于对象是空气流场的假设^[12,13]。但事实上, 多数燃烧过程是多组分的。本文以丙烷的燃烧火焰为例, 用带滤波的叠栅偏折系统进行实验上的测量、用偏折层析的滤波反投影 (Deflection filtered back-projection, DFBP) 算法重

收稿日期: 2008-03-26; 收到修改稿日期: 2008-06-06

作者简介: 陈云云 (1984—), 女, 博士研究生, 主要从事复杂流场的光学层析诊断方面的研究。

E-mail: yunqq321@yahoo.com.cn

导师简介: 李振华 (1964—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事激光与光电子技术等方面的研究。

E-mail: zhenhuali@mail.njust.edu.cn

建出火焰的折射率分布。在由折射率计算被测场温度和密度时,场的化学反应和成分被考虑了,并与直接把空气作为研究对象的结果进行了对比。

2 叠栅偏折层析原理

根据费马原理,当一束平行光穿过被测流场时,如果场的折射率发生变化,光在被测场中就会偏离原来方向而发生偏折效应,这样的现象可以用叠栅偏折层析进行观测。叠栅偏折测量术是基于叠栅效应和泰尔伯特效应的波前测量技术,通过多方向的偏折角投影来重建被测场折射率分布。在基于叠栅偏折系统的实验中,由于叠栅效应的存在会形成叠栅条纹,它携带了被测物体的偏折角信息,这个信息可以转化成被测物体的折射率分布。

图 1 是叠栅偏折层析系统的原理图。用此方法对流场进行测量时,从实验中直接获得的是叠栅条纹,因此首先必须从叠栅条纹中获得条纹偏移量,将其转换成偏折角^[14]

$$\phi(x, y) = \frac{2D(x, y)\tan(\theta/2)}{\Delta}, \quad (1)$$

式中 $\phi(x, y)$ 为光线的偏折角, $D(x, y)$ 为叠栅条纹的偏移量, θ 为两个光栅之间的夹角, Δ 为两个光栅之间的距离。被测场折射率和光线的偏折角之间存在关系^[15]:

$$\phi_x(x, y) = \frac{1}{n_0} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\partial n(x, y, z)}{\partial x} dz, \quad (2)$$

式中 $\phi_x(x, y)$ 为在 (x, y) 点光线在 x 方向的偏折角, n_0 为周围的环境折射率。

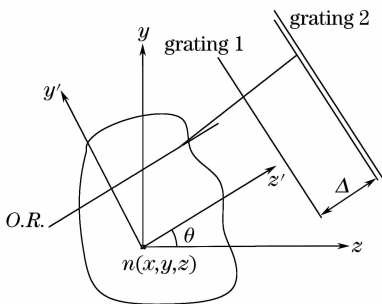


图 1 叠栅偏折层析原理

Fig. 1 Essence of moiré deflection computerized tomography

3 理论分析

对于风洞、火箭燃气射流场的参数诊断都是基于研究对象是空气流场的假设,但如果考虑流场真实的化学反应,对于丙烷燃烧火焰,准备测量的是蓝色火焰部分,可近似认为它是完全燃烧^[16]。因此,被测流

场可看作是由水和二氧化碳组成的混合气体场。

从原理上讲,所有的光学层析方法从实验中直接重建出的都是被测流场的折射率分布。然后,都通过格拉斯通-戴尔(Gladstone-Dale, G-D)公式将场的折射率和被测场的关键参数密度之间建立起关系:

$$n - 1 = K\rho, \quad (3)$$

式中 n 和 ρ 分别为被测场的折射率和密度, K 为 G-D 常量,它应该满足叠加原理^[17]:

$$K = \gamma_{\text{CO}_2} K_{\text{CO}_2} + \gamma_{\text{H}_2\text{O}} K_{\text{H}_2\text{O}}, \quad (4)$$

γ_{CO_2} , $\gamma_{\text{H}_2\text{O}}$ 分别为燃烧场中二氧化碳和水所占的比例, K_{CO_2} , $K_{\text{H}_2\text{O}}$ 分别为二氧化碳和水的 G-D 常量。实验是在空气中进行的,混合气体流场满足理想气体状态方程:

$$PM = \rho RT, \quad (5)$$

式中 P 为被测场的压强(一个大气压), R 为气体常量, T 为温度, M 为混合气体的等效分子量:

$$M = \gamma_{\text{CO}_2} M_{\text{CO}_2} + \gamma_{\text{H}_2\text{O}} M_{\text{H}_2\text{O}}, \quad (6)$$

M_{CO_2} , $M_{\text{H}_2\text{O}}$ 分别为二氧化碳和水的分子量。由(3)式~(6)式可以得到

$$n - 1 = \frac{PMK}{RT} = \frac{0.0975}{T}, \quad (7)$$

此式即丙烷燃烧火焰混合气体流场的温度与折射率的关系, n 通过实验测量和算法重建得到。由于实验中用 808 nm 的光作为探测光源,所以理论计算时采用了 808 nm 光对应的 G-D 常量。

叠栅偏折层析作为光学层析的一个分支,其重建算法也分为级数展开类重建算法和解析类重建算法。叠栅偏折层析的级数展开类算法具有天生的融合先验知识的能力,适用于非完全数据的层析问题,但重建速度和重建效率要低于解析类重建算法^[19,20]。本文基于偏折层析的滤波反投影算法(DFBP)重建出场的折射率分布^[20,21]。

4 实验与结果

图 2 是带滤波的叠栅偏折测量系统的实验装置图。作为整个系统主要元件的两个朗奇光栅 1, 2 互相平行且各自都与 z 轴成 $+\theta/2$ 和 $-\theta/2$ 的夹角,光栅常量为 0.005 cm。为了获得高清晰度、高对比度的叠栅条纹,让两个光栅之间的距离保持泰尔伯特距离的整数倍,实验中取两个光栅的间距 $\Delta = 3.1$ cm。探测光经扩束器扩束,透镜 1 准直后进入被测场,然后通过两个光栅,再经过聚焦透镜 2。最后,通过滤波小孔进行滤波,滤波的目的是只让 +1 或 -1 级频谱在屏上成像,避免各级频谱的混频而得

到不清晰的叠栅条纹,给条纹偏移量的提取带来不必要的麻烦和误差。观察窗口 1,2 用于隔离燃烧场气流与光学系统,使光学系统不受冲击、震动的影

响。由于被测火焰可近似看成轴对称结构^[11],所以各投影方向上的投影相同,实验中只要一个方向上的投影数据就可重建火焰的折射率分布。

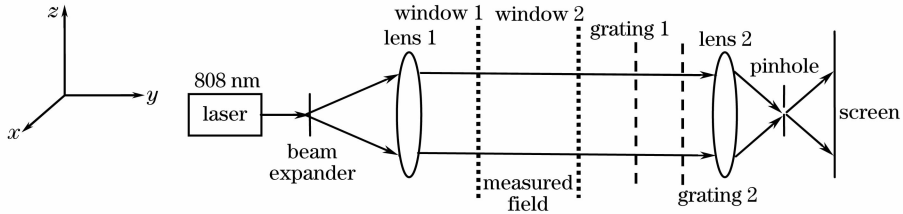


图 2 实验装置

Fig. 2 Experimental setup

图 3(a)、图 3(b)分别是实验中 CCD 记录的没有加丙烷燃烧火焰情况下的平行叠栅条纹和加了丙烷燃烧火焰后带偏折的叠栅条纹,环境温度为 20 °C 条件下拍摄的。实验中的丙烷燃烧火焰如图 4 所示,白线所标示的位置就是被重建的截面,距离火焰喷口约 1.2 cm。

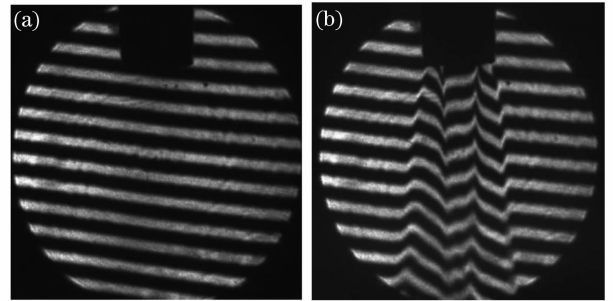


图 3 平行叠栅条纹(a),带偏折的叠栅条纹(b)

Fig. 3 Parallel moiré fringes (a), deflected moiré fringes (b)

图 5 所示结果是根据文中的多组分理论得出的三维温度和密度分布,可知,在压强一定的情况下,随着温度的升高流场密度在减小,完全符合理想气体状态方程。图 5(a)表明,用文中方法计算出实验

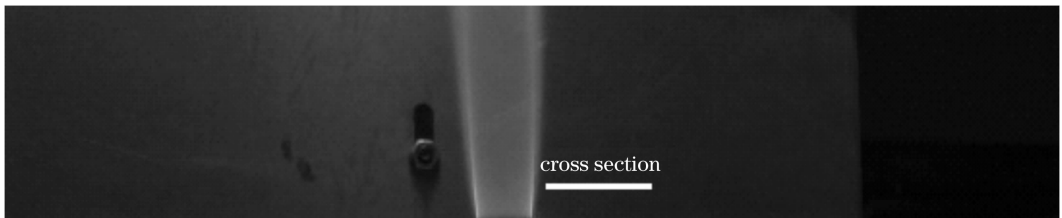


图 4 被测火焰流场

Fig. 4 Measured flame flow field

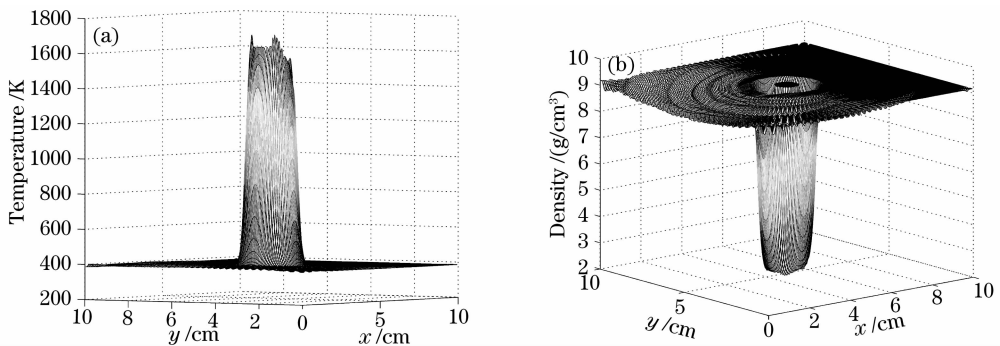


图 5 三维温度(a)和密度(b)分布(双组分)

Fig. 5 Three-dimensional (3D) distribution of temperature (a) and density (b) (double-component)

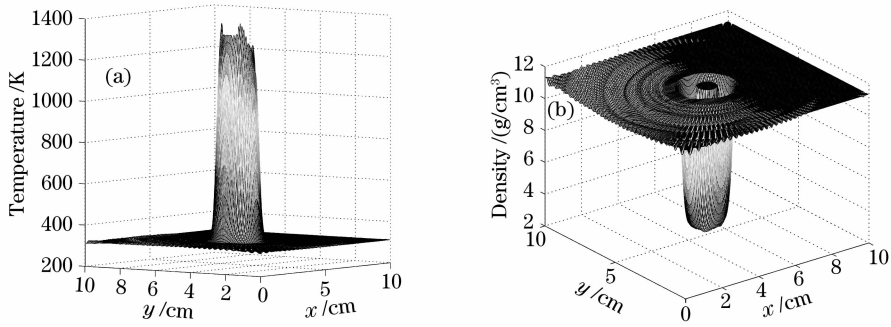


图 6 三维温度(a)和密度(b)分布(空气流场)

Fig. 6 Three-dimensional distribution of temperature (a) and density (b) (air flow field)

中丙烷燃烧火焰的最高温度可接近 1800 K,与文献[22]中所报道的热电偶测量值最高温度接近 1850 K 的结果吻合得较好。图 6 则是假设研究对象仍然是空气流场($G-D$ 常量 $K=0.2245$, 平均分子量 $M=29$),用与图 5 同样的折射率分布重建出来的同一截面上的温度与密度分布。由 6(a)可见,得到的被测火焰流场的最高温度还不到 1400 K,显然与已报道结果相差甚远。

通过比较以上两种情况下的实验结果可知,对于燃烧火焰不应该仅仅基于研究对象是空气流场的假设进行计算,必须考虑发生的化学反应和新的组成物质,否则误差会很大。

5 结 论

以丙烷燃烧火焰为例,用叠栅偏折层析对存在化学反应的多组分火焰流场进行了诊断,808 nm 的光被用作探测光源。理论上给出了多组分情况下混合流场的等效 $G-D$ 常量和分子量。实验上得到叠栅条纹后提取出叠栅条纹的偏移量并转换为偏折角,然后基于偏折层析的滤波反投影算法重建出场的折射率分布,分别给出了两种不同情况下给定截面的三维温度和密度分布。通过对比发现,对存在化学反应的多组分火焰流场不能假设研究对象是空气流场,而必须对火焰流场本身发生的化学反应及生成物进行考虑,混合流场的等效 $G-D$ 常量和分子量必须根据不同场的具体组分情况进行修正。

参 考 文 献

- 1 Da-Peng Yan, An-Zhi He, Xiao-Wu Ni. New method of asymmetric flow field measurement in hypersonic shock tunnel [J]. *Appl. Opt.*, 1991, **30**(7): 770~774
- 2 C. Soller, R. Wenskus, P. Middendorf *et al.*. Interferometric tomography for flow visualization of density fields in supersonic jets and convective flow[J]. *Appl. Opt.*, 1994, **33**(3): 2921~2932
- 3 Dapang Yan, Soyounng Stephen Cha. Computational and interferometric system for real-time limited-view tomography of

- flow fields[J]. *Appl. Opt.*, 1998, **37**(7): 1159~1164
- 4 J. Stricker, E. Keren, O. Kafri. Axisymmetric density field measurements by moiré deflectometry[J]. *AIAA Journal*, 1983, **21**(12): 1767~1769
- 5 Ming Wang. Fourier transform moiré tomography for high-sensitivity mapping asymmetric 3-D temperature field[J]. *Optics & Laser Technology*, 2002, **34**: 679~685
- 6 Zhang Bin, Song Yang, He Anzhi. Tikhonov regularization method for deflectometric tomographic reconstruction[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(5): 853~858
- 张 斌,宋 旸,贺安之. 光偏折层析的 Tikhonov 正则化重建技术[J]. *光学学报*, 2007, **27**(5): 853~858
- 7 Song Yang, Zhang Bin, He Anzhi. A novel iterative algorithm for moiré tomography[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(3): 367~372
- 宋 旸,张 斌,贺安之. 一种新的叠栅层析迭代算法[J]. *光学学报*, 2006, **26**(3): 367~372
- 8 Zhang Bin, Song Yang, Song Yizhong *et al.*. Flow field moiré tomography based on phase unwrapping and a new iterative reconstruction algorithm[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(4): 531~536
- 张 斌,宋 旸,宋一中等. 基于相位展开和一种新的迭代重建算法的流场莫尔层析术[J]. *中国激光*, 2006, **33**(4): 531~536
- 9 Zhang Bin, He Anzhi, Song Yang. Two-stage denoise technique for deflectometric tomographic reconstruction of flow field[J]. *Chin. J. Lasers*, 2006, **33**(12): 1665~1670
- 张 斌,贺安之,宋 旸. 光偏折层析重建流场中的两阶段降噪技术[J]. *中国激光*, 2006, **33**(12): 1665~1670
- 10 O. Kafri. Noncoherent method for mapping phase objects[J]. *Opt. Lett.*, 1980, **5**(12): 555~557
- 11 E. Keren, E. Bar-Ziv, I. Glatt *et al.*. Measurements of temperature distribution of flame by moiré deflectometry[J]. *Appl. Opt.*, 1981, **20**(24): 4263~4266
- 12 Shi Dufang, Wang Rong, Chen Shaohua *et al.*. A solve method to temperature measurement for flame[J]. *Quant. Electron.*, 1993, **10**(3): 275~279
- 是度芳,王 荣,陈韶华等. 火焰温度测量中的一种求解方法[J]. *量子电子学*, 1993, **10**(3): 275~279
- 13 Madhuri Thakur, S. K. Angra, Chandra Shakher. Measurements of the temperature profile of a two-dimensional slot burner using a Lau phase interferometer with linear gratings [J]. *Opt. Eng.*, 2003, **42**(1): 86~91
- 14 He Anzhi, Yan Dapeng. *Laser Transient State Interference Metrology* [M]. Beijing: China Machine Press, 1993. 214
- 贺安之,阎大鹏. 激光瞬态干涉度量学[M]. 北京: 机械工业出版社, 1993. 214
- 15 J. Stricker. Diffraction effects and special advantages in electric heterodyne moiré deflectometry[J]. *Appl. Opt.*, 1986, **25**(6): 895~902
- 16 <http://www.uvi.edu/Physics/SCI3xxWeb/Energy/ChemicalEnergy.html>
- 17 Wu Yingchuan. *Theories and Application Research of Computational Flow Imaging* [D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2003. 28
- 吴颖川. 计算光学流动显示技术理论及应用研究[D]. 南京:南

京理工大学, 2003, 28

- 18 Bin Zhang, Yang Song, Yizhong Song *et al.*. A new reconstruction algorithm for moiré tomography in flow field measurements[J]. *Opt. Eng.*, 2006, **45**(11): 117002
- 19 Yang Song, Bin Zhang, Anzhi He. Algebraic iterative algorithm for deflection tomography and its application to density flow fields in a hypersonic wind tunnel[J]. *Appl. Opt.*, 2006, **45**(31): 8092~8101
- 20 Song Yang, Zhang Bin, He Anzhi. Filtered back-projection algorithm of deflection tomography and error analysis[J]. *Acta*

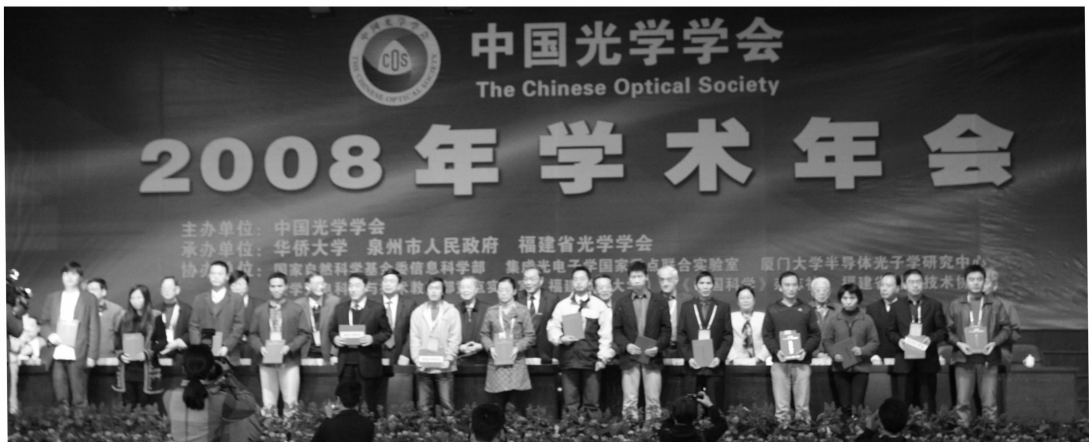
Optica Sinica, 2006, **26**(11): 1657~1665

- 宋 阳, 张 斌, 贺安之. 偏折层析的滤波反投影算法及误差分析[J]. *光学学报*, 2006, **26**(11): 1657~1665
- 21 Gregory W. Faris, Robert L. Byer. Three-dimensional beam-deflection optical tomography of a supersonic jet[J]. *Appl. Opt.*, 1988, **27**(24): 5202~5212
- 22 Sheng Mao Tieng, Wen Zen Lai, Toshi Fujiwara. Holographic temperature measurement on axisymmetric propane-air, fuel-lean flame[J]. *Meas. Sci. Technol.*, 1992, **3**: 1179~1187

首届“大珩杯”光学期刊优秀论文评选结果隆重公布

2008年10月21日, 光学前沿——首届“大珩杯”光学期刊优秀论文评选结果在中国光学学会2008年学术年会上隆重公布。中国光学学会秘书长倪国强宣读了入选论文名单, 中国光学学会理事长周炳琨院士、副理事长徐至展院士等为上海光机所周军等人入选论文的作者代表颁发了证书和奖金。

由《光学学报》、《中国激光》与 *Chinese Optics Letters* 发起的“大珩杯”光学期刊优秀论文评选活动, 得到了光学泰斗王大珩先生的大力支持。按照大珩先生的指示, 本次论文评选活动遵循科学严谨、公平、公正、公开的原则, 专家定性评审与科学计量指标定量评价相结合, 采取编委评分、核心期刊引用分、中国光学期刊网下载分、SCIE 期刊引用分、成果奖励分五项分值相结合的方式评选。



论文评审以创新性与科学性为主要依据, 论文内容反映了本学科国内外同行关注的前沿、热点、重点和难点问题, 在学术上具有创新性, 并取得突破性成果, 达到国际同类学科或国内同类学科先进水平, 具有较好的社会效益、经济效益或应用前景。

倪国强秘书长表示, 作为信息传播平台的《光学学报》、《中国激光》与 *Chinese Optics Letters* 等光学期刊充分发挥了其承载科学、传播知识的作用, 为吸引更多的优秀论文、优化我国科技成果的评价机制起到了积极作用。中国光学学会将以此为开端, 组织更多的光学期刊共同参与“大珩杯”光学期刊优秀论文评选活动。

本次活动的目的在于进一步推动我国的光学研究, 提高我国光学期刊的学术水平和论文质量, 吸引和催生优秀稿件, 鼓励和培育优秀作者, 促进我国光学、激光科技事业发展。

经过专家严格评选与网站公示, 本次活动共评出获奖论文 30 篇, 分别发表在 2006~2008 年度的《光学学报》、《中国激光》与 *Chinese Optics Letters* 上。

本次活动得到了中科院上海光机所高功率激光物理联合实验室、相干(北京)商业有限公司、江西连胜实验装备有限公司、重庆师范大学光学工程重点实验室的鼎力支持。

获奖列表

2008 年度“大珩杯”《光学学报》优秀论文名单转 2353 页

2008 年度“大珩杯”《中国激光》优秀论文名单转 2364 页

2008 年度“大珩杯”*Chinese Optics Letters* 优秀论文名单转 2374 页