

中国科学院光电技术研究所的自适应光学研究进展

姜文汉^{1,2} 张雨东^{1,2} 饶长辉^{1,2} 凌 宁^{1,2} 官春林^{1,2} 李 梅^{1,2} 杨泽平^{1,2} 史国华^{1,2}

(¹中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209
²中国科学院自适应光学重点实验室, 四川 成都 610209)

摘要 中国科学院光电技术研究所的自适应光学研究始于 1979 年。1980 年建立自适应光学研究室, 在突破了波前校正器(包括变形反射镜和高速倾斜反射镜)、波前传感器、波前处理机和波前控制等关键技术的基础上, 研制了一系列自适应光学系统, 用于天文望远镜、惯性约束聚变和人眼视觉研究等。

关键词 自适应光学; 天文望远镜; 惯性约束聚变; 视网膜成像; 变形反射镜; 波前传感器

中图分类号 G353.11; TP273+.2; TL632+.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.0900106

Progress on Adaptive Optics of Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences

Jiang Wenhan^{1,2} Zhang Yudong^{1,2} Rao Changhui^{1,2} Ling Ning^{1,2}

Guan Chunlin^{1,2} Li Mei^{1,2} Yang Zeping^{1,2} Shi Guohua^{1,2}

(¹*Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China*
²*The Key Laboratory of Adaptive Optics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China*)

Abstract The research on adaptive optics of the Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences was originated in 1979. In 1980, the first adaptive optics laboratory was established. Based on the key technical breakthroughs of the wavefront corrector (including deformable mirror and fast steering mirror), wavefront sensor, wavefront processor and wavefront control, a series of adaptive optical systems had been set up and applied in astronomical telescopes, inertial confinement fusion and retinal high-resolution imaging and so on.

Key words adaptive optics; astronomical telescope; inertial confinement fusion; retinal imaging; deformable mirror; wavefront sensor

OCIS codes 010.1080; 010.1330; 120.4820; 070.2025

1 引 言

自适应光学是一种通过克服动态波前误差对像质的影响来改善光学系统性能的技术, 其基本原理就是首先探测到光的波前在传播过程中发生的波前误差, 然后利用波前校正器来补偿和纠正这种畸变,

让最终获得的波前恢复到遭受畸变前的状态, 以达到消除动态波前误差的目的。自适应光学的最初设想是 Babcock^[1]于 1953 年提出来的, 但是由于在很长一段时期人们不具备进行波前改正和补偿所需要的技术, 自适应光学在天文观测当中的实际应用

收稿日期: 2011-07-18; **收到修改稿日期**: 2011-07-28

作者简介: 姜文汉(1938—), 男, 光电工程和自适应光学专家, 1995 年当选为中国工程院院士, 现任中国科学院光电技术研究所研究员, 中国科学院自适应光学重点实验室学术委员会主任, 国家 863 计划领域专家委员会顾问, 四川省决策咨询委员会委员, 中国光学学会常务理事, 美国光学学会会士。早年从事靶场光测设备和光刻机研制, 1979 年在国内开拓自适应光学研究方向, 1980 年建立我国第一个自适应光学实验室。30 余年来, 建立了整套基础技术并主持研制了多代自适应光学系统, 成功应用于星体目标观测、光波大气传输、激光核聚变光束控制和人眼视网膜成像等方面。作为主要参加者获得国家科技进步特等奖 1 次, 作为主持人获得国家科技进步二等奖 2 次、三等奖 2 次, 国家技术发明二等奖 1 次, 中国科学院科技进步特等奖 1 次、一等奖 9 次。2000 年被评为全国先进工作者, 2002 年获得光华工程科技奖, 2007 年获得中国科学院杰出科技成就奖。E-mail: adopse@ioe.ac.cn

直到 20 世纪 90 年代才真正开始。经过十几年的努力,目前世界上几乎所有用于夜天文观测的大型望远镜都配备了自适应光学系统,使得这些望远镜基本上能够以接近衍射极限的分辨力进行观测。与此同时自适应光学也正在推广应用到许多其他领域。

我国对自适应光学的研究起步于 1979 年,中国科学院光电技术研究所已独立自主地建立了自适应光学的技术基础,并取得了令人瞩目的成就^[2]。20 多年内已经研制成功多套自适应光学系统,其中 1985 年研制的 19 单元激光波前校正系统,被用于“神光 I”激光惯性约束核聚变(ICF)装置上^[3,4],用以校正这一装置中的静态误差,使静态焦斑能量集中度提高了 3 倍,成为国际同类装置中首先成功使用的自适应光学系统。1990 年 21 单元动态波前误差校正系统与云南天文台的 1.2 m 望远镜对接实现了对自然星体的大气湍流校正,获得了分辨双星的清晰照片^[5],使我国成为继美国和德国之后第三

个实现这一目标的国家。2000 年我国利用新研制出的 19 单元微小型变形镜建立了人眼视网膜成像自适应光学系统,并获得了较清晰的人眼眼底细胞图像^[6]。另外我国在自适应光学理论和单元技术方面也有不少创新。本文重点报道中国科学院光电技术研究所自适应光学系统在天文成像、ICF 装置光束控制以及人眼视光学等方面所取得的主要研究进展。

2 天文望远镜的自适应光学系统

地基望远镜在观测目标时受到大气湍流造成的动态波前误差的限制,其分辨力将大大降低。自适应光学可以实时校正波前误差,使望远镜的分辨力接近衍射极限。迄今为止,中国科学院光电技术研究所先后共研制了 8 套天文自适应光学系统,包括 5 套夜天文自适应光学系统和 3 套白天太阳自适应光学系统,其具体参数如表 1 所示。

表 1 天文观测用自适应光学系统

Table 1 Astronomical adaptive optical systems

No.	Wavefront sensor	No. of subaperture	Wavefront corrector	Beacon wave-length / μm	Imaging wave-length / μm	Sampling frequency /Hz	Location	Year
1 ^[5]	Shearing interferometer	2×16	21 actuator deformable mirrors and a fast steering mirror	0.4~0.7	0.4~0.7		φ375 mm pupil of 1.2 m telescope of Yunnan Observatory	1990
2 ^[7]	Shearing interferometer	2×16	21 actuator deformable mirrors and a fast steering mirror	0.4~0.7	2.2		2.16 m telescope of Beijing Observatory	1995
3 ^[8]	Hartmann-Shack	48	61 actuator deformable mirrors and a fast steering mirror	0.4~0.7	0.4~0.7	838	1.2 m telescope of Yunnan Observatory	1998
4 ^[9]	Correlation tracker		Fast steering mirror	0.4~0.7	0.4~0.7	419	Solar tower of Nanjing University	2000
5 ^[10]	Hartmann-Shack	54	61 actuator deformable mirrors and two fast steering mirrors	0.4~0.7	0.7~0.9	500~2000	1.2 m telescope of Yunnan Observatory	2004
6 ^[11]	Hartmann-Shack	128	127 actuator deformable mirrors and two fast steering mirrors	0.4~0.7	0.7~0.9	500~2000	1.8 m telescope of Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences	2009
7 ^[12]	Correlating Hartmann-Shack	32	37 actuator deformable mirrors and a fast steering mirror	0.55	0.55	1350	26 cm solar telescope of Yunnan Observatory	2009

No.	Wavefront sensor	No. of subaperture	Wavefront corrector	Beacon wave-length / μm	Imaging wave-length / μm	Sampling frequency /Hz	Location	Year
	Correlating Hartmann-Shack	30	37 actuator deformable mirrors and a fast steering mirror	0.55	1.55		1 m solar telescope of Yunnan Observatory	2011

图 1(a) 是 1.8 m 自适应光学望远镜(如表 1 第 6 项所示)对单星 FK5-780(星等 $2.^\text{m}48.$) 的闭环成像结果,在 x 和 y 方向上星像半峰全宽(FWHM)分别是 $1.0\lambda/D$ 和 $1.06\lambda/D$,其中 λ 是波长, D 是口径, $\lambda/D=0.155''$,斯特雷尔比(Strehl ratio)是 0.66,由

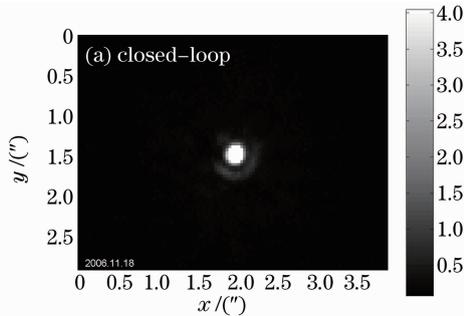


图 1(b) 是连续 450 frame 的斯特雷尔比,其平均值为 0.525。图 2 是该望远镜对角间距为 $0.245''$ 的双星 WDS BU 989(星等 4.1) 的开环和闭环长曝光成像结果。

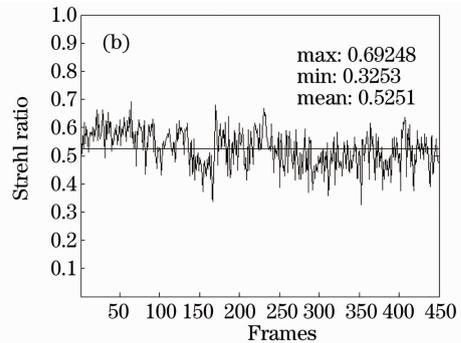


图 1 单星 FK5-780 的闭环单帧短曝光像(a)和连续 450 frame 的斯特雷尔比(b)

Fig. 1 Closed-loop one frame short-exposure image of single star FK5-780 (a) and the Strehl ratio for 450 frame images (b)

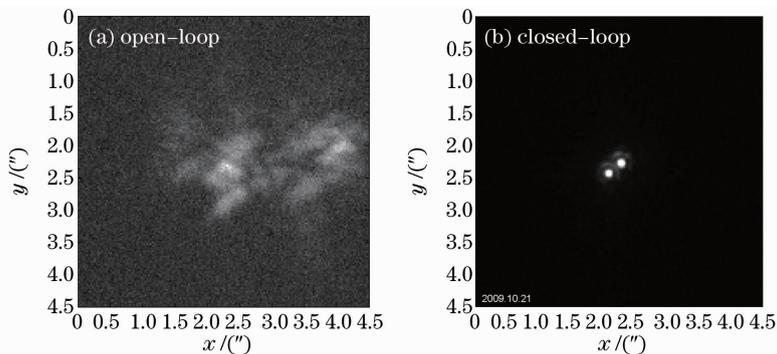


图 2 双星 WDS BU 989 的开环(a)和闭环长曝光像(b)

Fig. 2 Open-loop (a) and closed-loop long-exposure images (b) of the binary star WDS BU 989

3 白天太阳望远镜自适应光学系统

太阳是一个低对比扩展目标,波前信息的提取只能依靠太阳表面结构(如米粒结构和黑子等),波前斜率信息要用相关算法计算,计算量大。2000 年用相关算法在南京大学的太阳塔上实现太阳表面结构的波前倾斜误差校正^[9]。2009 年研制一套 37 单元太阳自适应光学系统,其波前传感器采用基于绝对差分算法的相关哈特曼-夏克波前探测器,在云南

天文台 26 cm 太阳精细结构望远镜上成功地实现了太阳目标的自适应光学波前误差校正,获取到太阳目标的高分辨力图像^[12],如图 3 所示,工作波长为 550 nm。2011 年这套自适应光学系统经改进后应用在云南澄江抚仙湖的 1 m 太阳望远镜上^[13],图 4 和图 5 是该次实验取得的太阳米粒结构和黑子校正前后的 $1.55 \mu\text{m}$ 波段的图像,经自适应光学系统对波前误差低阶校正后太阳图像对比度有明显提高。

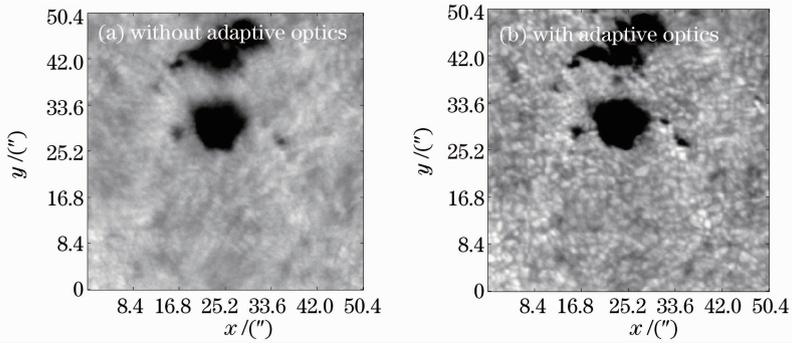


图 3 太阳表面结构自适应光学校正前(a)后(b)图像

Fig. 3 Solar images without (a) and with (b) adaptive optics

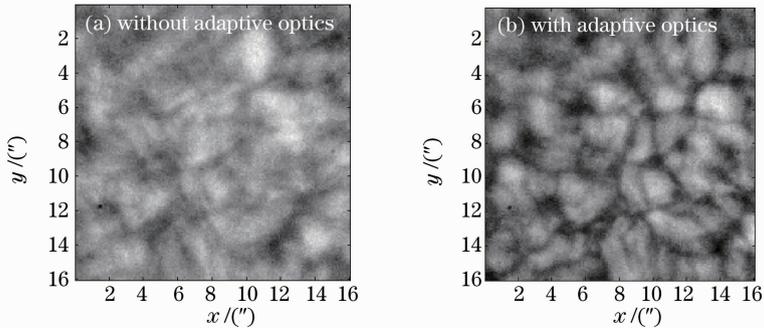


图 4 太阳表面米粒结构自适应光学校正前(a)后(b)图像

Fig. 4 Solar granulation images without (a) and with (b) adaptive optics

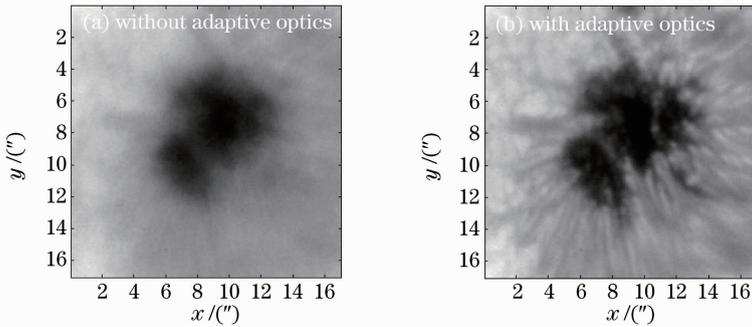


图 5 太阳表面黑子结构自适应光学校正前(a)后(b)图像

Fig. 5 Sunspot images without (a) and with (b) adaptive optics

4 ICF 装置中的自适应光学系统

ICF 是将脉冲种子激光,经多级放大形成 $10^{12} \sim 10^{14}$ W 的高功率脉冲,多路激光会聚到充满核聚变材料(氘和氦)的靶丸,依靠激光的超高功率引发核聚变,是人类产生可控核聚变的重要途径。ICF 装置是当代规模最大、结构最复杂的激光工程。每路激光的光路长达几十米,由几百件光学元件组成。光学元件的制造误差会累积成很大的波前误差,使激光难以集中聚焦到靶上。另外高功率激光传输过程中产生的光学元件热畸变也会引入动态波前误差,影响到靶光束质量。自适应光学是校正这一庞大系统波前误差的有效手段。

从 1985 年起,共为我国的 ICF 装置研制过 5 种 12 套自适应光学系统(如表 2 所示)。1985 年,在中国科学院上海光学精密机械研究所的合作下,研制了 19 单元的激光波前校正系统,成功用于该所的 LF12 ICF 装置中,采用高频振动爬山控制方法,实现该装置静态波前误差的校正^[3,4],使焦斑能量集中度提高 3 倍,如图 6 所示。这一系统是全球同类装置中第一次采用的自适应光学系统,比美国劳伦斯·利弗莫尔国家实验室的同类装置早 6 年。

2004 年,为“神光 III”原型单路装置研制了一套以校正系统静态和动态波前误差为目的的自适应光学系统,采用 45 单元方形变形反射镜,用哈特曼

传感器测量波前误差分别校正系统静态误差和打靶过程中产生的动态误差^[14,15],图7是未经校正、静态误差校正和动态误差校正后的系统远场光斑。

表2 ICF 装置中的自适应光学系统

Table 2 Adaptive optical systems for ICF facilities

No.	ICF facility	Number of actuator deformable mirrors	Aperture of deformable mirror	Wavefront sensor	Sets	Year
1	“Shengguang I”	19	$\phi 70$ mm	Hill-climbing	1	1985
2	“Shengguang III” prototype	45	70 mm \times 70 mm	Hartmann-Shack 22 \times 22	1	2004
3	“Shengguang III” prototype	45	70 mm \times 70 mm	Hartmann-Shack 22 \times 22	8	2007
4	“Shengguang II” petawatt	55	$\phi 380$ mm	Hartmann-Shack 22 \times 22	1	2009
5	“Shengguang III”	31	390 mm \times 390 mm	Hartmann-Shack 22 \times 22	1	2011

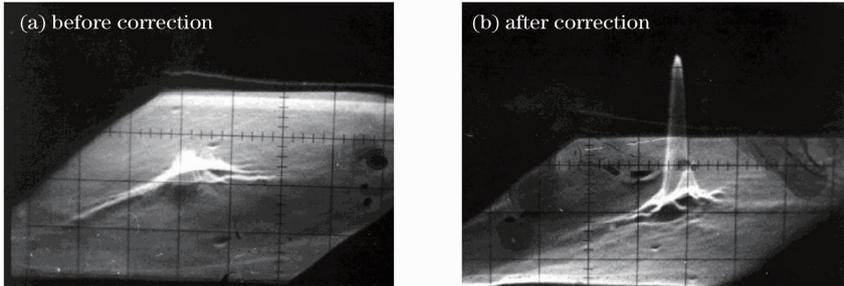


图6 自适应光学校正前(a)后(b)的“神光 I”LF12 装置的焦斑能量分布

Fig. 6 Focal spot energy distribution before (a) and after (b) correction for “Shengguang I” LF12 facility

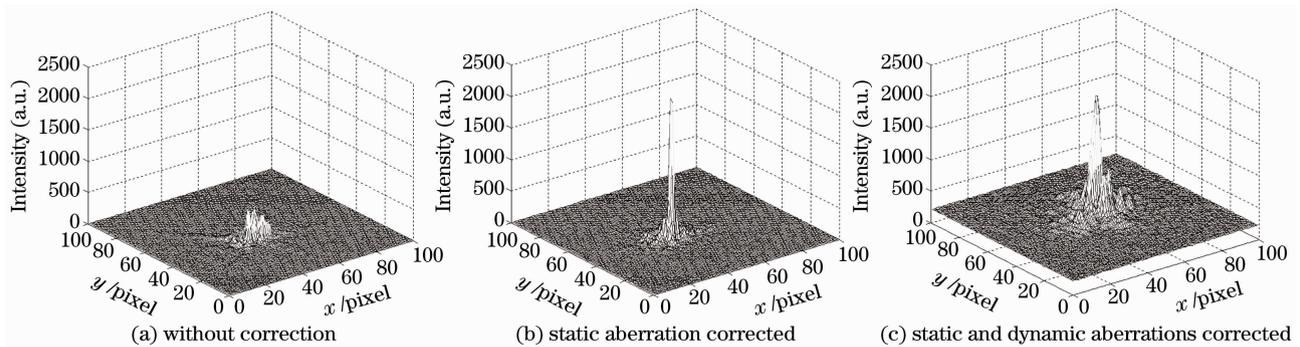


图7 “神光 III”原型装置单路自适应光学系统远场校正效果

Fig. 7 Far-field images for single path of “Shengguang III” prototype without and with adaptive optics

2007年为“神光 III”原型装置建立了8路高度工程化的自适应光学系统,并集成到激光系统中,由计算机集中控制,对主放大系统输出光束的静态和动态波前进行校正。2008年,又对该自适应光学系

统进行了升级,将波前校正范围延伸到了靶点。8路工程化自适应光学系统在“神光 III”原型装置上实现了到靶点的全系统静态像差校正,改善了靶点焦斑能量分布。图8为自适应光学校正前后“神光

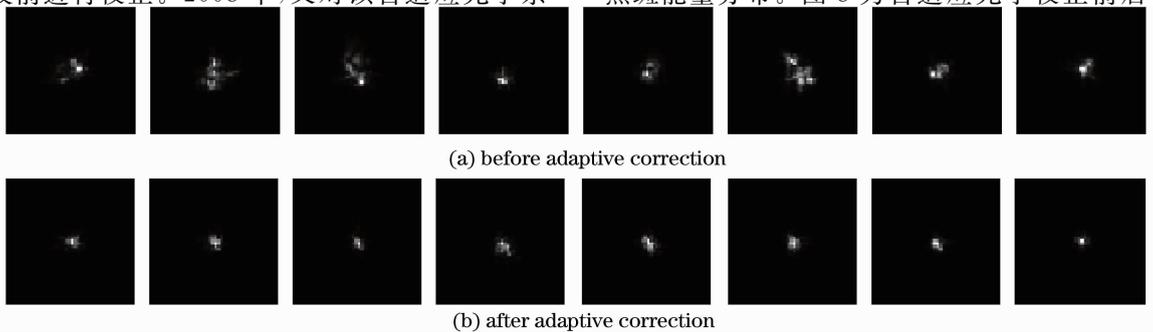


图8 “神光 III”原型装置8路工程化自适应光学系统的校正效果

Fig. 8 Images of 8 sets of laser beams at “Shengguang-III” ICF prototype before and after adaptive correction

III”原型装置上 8 路远场光斑分布。结果表明,通过自适应光学校正,所有各路像差均得到有效的校正,提高了激光打靶效率。

在“神光 II”拍瓦装置中,高功率是所追求的重要目标之一,它要求远场光斑在直径 $25 \mu\text{m}$ 的范围内(约 $3L_D$, L_D 为衍射极限)集中 50% 的能量。然而,由于装置中光学元件的畸变、氙灯抽运过程中造成的钨玻璃材料内的热沉积等因素,在装置输出波前中存在较大的波前畸变,从而导致焦斑上的能量集中度大大下降。自适应光学技术提供了提升激光装置聚焦能力的可能性,是实现高功率目标

的基本技术途径。为“神光 II”拍瓦装置研制的自适应光学系统由一块外径 $\phi 380 \text{ mm}$ 、工作口径 $\phi 320 \text{ mm}$ 的 55 单元变形反射镜和一台 22×22 子透镜阵列的哈特曼波前传感器以及控制系统组成^[16]。该系统已集成到“神光 II”拍瓦装置上并进行了校正实验。图 9 为动态波前校正前后的远场能量分布。开环时,光束质量为 $11.6L_D$, 50% 能量集中在 $7.4L_D$ 内;闭环时,通过对系统静态波前畸变的校正和动态波前畸变的预校正,光束质量为 $4.7L_D$, 50% 能量集中在 $2L_D$ 内。自适应光学闭环时,远场峰值能量水平提升了近 10 倍。

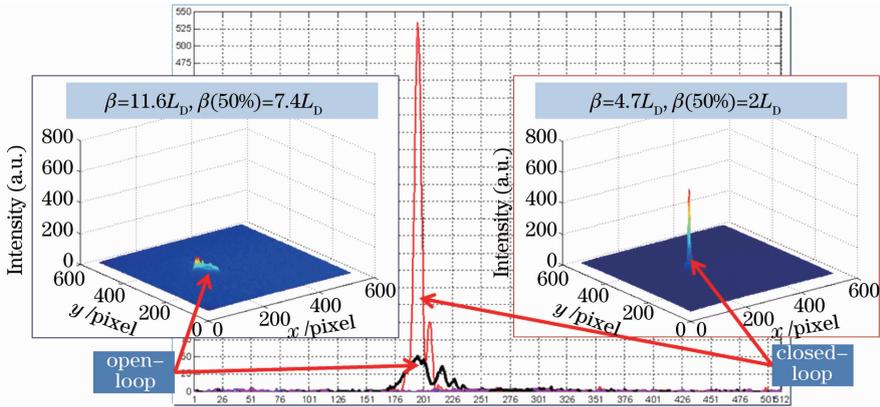


图 9 “神光 II”拍瓦装置开环和闭环时的焦斑效果

Fig. 9 Open-loop and closed-loop focal spots for petawatt laser beam at “Shenguang-II” ICF facility

的 $10.9L_D$ 校正到 $3.3L_D$ 。2011 年研制了一块大口径大行程变形镜并在“神光 III”主机上进行了实验,该变形镜的位置将从原来放在主放大器输入端,移到主放大器腔镜位置,其通光口径增大到 $360 \text{ mm} \times 360 \text{ mm}$,研制了外径 $390 \text{ mm} \times 390 \text{ mm}$ 的 31 单元变形镜,该变形镜的驱动器可以拆修,初始面形峰谷(PV)值仅为 $0.78 \mu\text{m}$,为目前国内制作的面形精度最高的大口径变形反射镜,如图 10 所示。在激光装置中试用,将 PV 值为 7.823λ ,均方根(RMS)值为 1.223λ 的波前畸变校正到残差 PV 值为 0.825λ ,RMS 值为 0.134λ 。图 11 为校正前后的远场焦斑,从开环时

的 $10.9L_D$ 校正到 $3.3L_D$ 。图 10 口径 $390 \text{ mm} \times 390 \text{ mm}$ 的变形反射镜

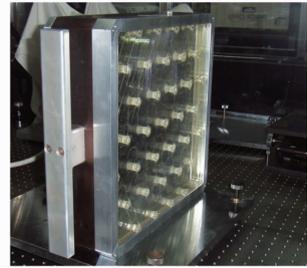


Fig. 10 Deformable mirror with the aperture of $390 \text{ mm} \times 390 \text{ mm}$

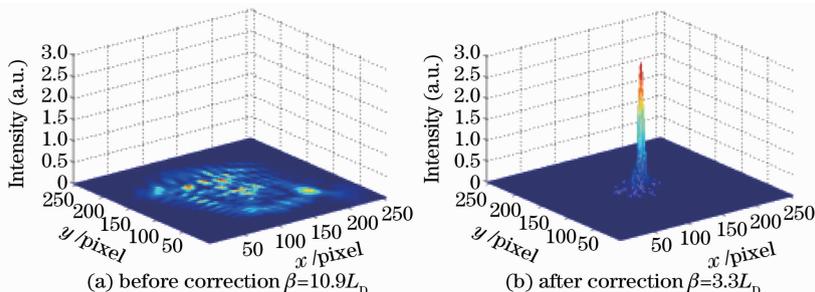


图 11 “神光 III”主机光路中的自适应光学系统校正前(a)后(b)远场光斑

Fig. 11 Focal spots for “Shenguang-III” ICF facility before (a) and after (b) correction

5 人眼视光学中的自适应光学系统

自 1998 年开始,中国科学院光电技术研究所所在人眼视网膜成像仪(AO-Camera)、自适应光学光学相干层析(AO-OCT)和自适应光学共焦扫描检眼镜(AO-CSLO)等视光学波前工程领域开展了长期的研究^[17],已经先后建立多套系统。

变形反射镜是自适应光学系统的核心器件,自适应光学民用化的基础就在于变形反射镜的尺寸和成本的降低。1999 年针对人眼成像,特别研制了微小型 19 单元变形反射镜^[18],其直径相当于硬币大小;2003 年又研制了 37 单元微小型变形反射镜,进一步提高了变形反射镜的像差校正能力。在此基础上先后研制了 19 单元和 37 单元两代 AO-Camera 系统,如图 12 所示,在世界上第二个获得了视细胞级分辨力的视网膜图像,如图 13 所示^[18,19]。



图 12 两代自适应眼底相机系统照片
Fig. 12 Two generations of AO-Camera

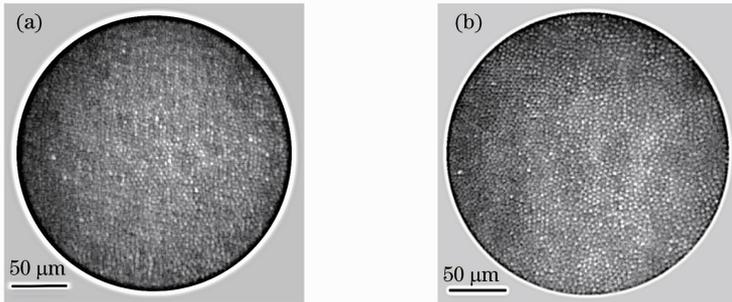


图 13 两代眼底相机获取的视网膜高分辨力图像

Fig. 13 Retinal images obtained by two generations of AO-Camera

AO-OCT 虽然具有很高的纵向分辨力,但是其三维数据获取速度很慢,使得获取的图像易受视网膜生理性颤动的影响形成图像失真;此外,OCT 技术本身的局限性使得其无法实现对眼底荧光信号的探测,这也部分制约了 AO-OCT 技术的进一步应用。AO-CSLO 以其高横向分辨力、较高的纵向分辨力、高速实时的成像速度以及可实现荧光探测等独特的优势,已经在视网膜前沿研究领域体现出越来越重要的作用。

光学相干层析技术是在 20 世纪 90 年代开始发展起来的新型的成像技术,它类似于 B 型超声成像,但是以低相干光作为光源,具有较高的纵向分辨力,可以达到 $1\sim 15\ \mu\text{m}$,比传统超声波探测技术高 $1\sim 2$ 个数量级。但是由于人眼像差的存在,检眼用 OCT 系统的横向分辨力都十分低(大于等于 $20\ \mu\text{m}$),无法获得三维高分辨力细胞成像。自适应光学的小型化和民用化,为细胞分辨的眼底视网膜成像提供了契机,自适应光学器件与 OCT 的有机结合可以实现优势互补,使得三维细胞分辨的视网膜成像成为可能。自 2003 年开始开展了 AO-OCT 的技术研究,并研制了成像平台,如图 14(a)所示。系统的横向分辨力约 $2\ \mu\text{m}$,其纵向分辨力达到了 $6.3\ \mu\text{m}$,实现了视网膜的在体三维高分辨力层析成像,如图 14(b)所示^[20]。

2010 年建立了国内第一套 AO-CSLO 临床样机系统^[21],该系统的横向分辨力为 $2\ \mu\text{m}$,纵向分辨力为 $60\ \mu\text{m}$ 左右,可以实现 $30\ \text{frame/s}$ 的动态高分辨力成像。在相应的活体人眼视网膜在体成像实验中,成功地获取了感光细胞层、毛细血管层和神经纤维层的高分辨力图像,如图 15 所示。

总体上说,目前本课题组已经完全掌握了 AO-Camera, AO-OCT 和 AO-CSLO 三种国际上最高分辨力的视网膜成像技术,而且研制了相应的成像技

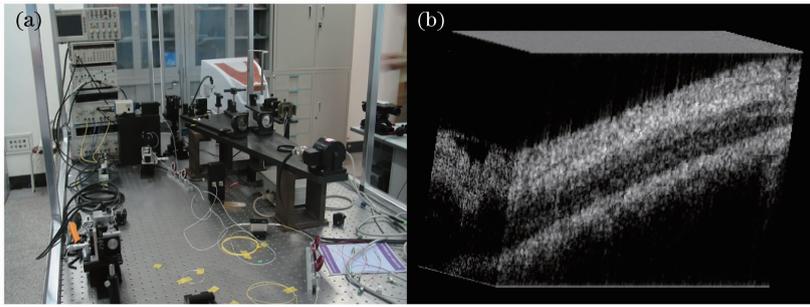


图 14 AO-OCT 成像系统(a)及其获取的三维视网膜图像(b)

Fig. 14 AO-OCT system (a) and three-dimensional retinal image (b)

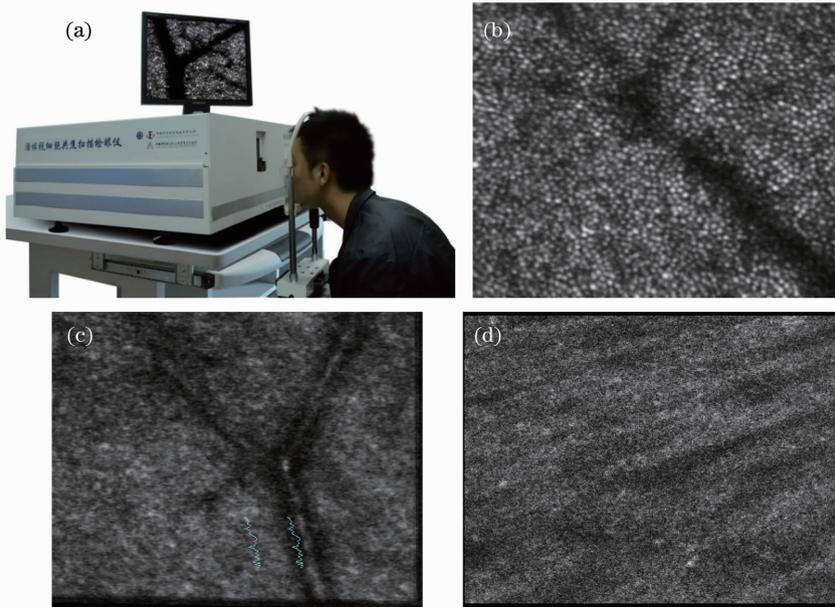


图 15 AO-CSLO 系统照片(a);AO-CSLO 获取的活体人眼视网膜感光细胞层图像(b);

毛细血管层图像(c)和神经纤维层图像(d)

Fig. 15 AO-CSLO system (a); the photoreceptor layer image (b); the capillary layer image (c) and the nerve fiber layer image (d)

术平台,而且已经初步尝试开展相关的临床医学实验研究。在未来的研究中,本课题组将与国内医疗单位合作利用上述三种技术,开展视网膜疾病的图像表征与疾病信息的相关度研究,争取实现相关视网膜疾病的早期诊断。

6 结 论

中国科学院光电技术研究所已研制成功几十套自适应光学系统并应用于天文观测、ICF 光束控制和眼科医学等领域。所有自适应光学系统中的波前校正器(变形镜/倾斜镜)、波前探测器和波前处理机等均是独立自主研制的。中国科学院光电技术研究所的自适应光学重点实验室因“研究范围之广、技术之全面、应用领域之广”受到国际同行的赞誉。

致谢 中国科学院光电技术研究所自适应光学研究是在国家 863 计划、国家自然科学基金委和中国科学院的各种基金和项目的支持下发展和壮大的,在此向参加和对此研究给予支持的所有同仁表示衷心的感谢。

参 考 文 献

- 1 H. W. Babcock. The possibility of compensating astronomical seeing[J]. *Pub. Astr. Soc. Pac.*, 1953, **65**(386): 229~236
- 2 Jiang Wenhan. Adaptive Optics Technological Progress [M]. Chengdu: Sichuan Science Technology Publishing House, 2007
姜文汉. 自适应光学技术进展[M]. 成都: 四川科学技术出版社, 2007
- 3 Jiang Wenhan, Huang Shufu, Wu Xubin. Hill-climbing wavefront correcting system [J]. *Chinese J. Lasers*, 1988, **15**(1): 19~22
姜文汉, 黄树辅, 吴旭斌. 爬山法自适应光学波前校正系统[J]. 中国激光, 1988, **15**(1): 19~22

- 4 W. Jiang, S. Huang, N. Ling *et al.*. Hill-climbing wavefront correcting system for large laser engineering[C]. *SPIE*, 1988, **965**: 266~272
- 5 W. Jiang, M. Li, G. Tang *et al.*. Adaptive optical image compensation experiments on stellar objects[J]. *Opt. Engng.*, 1995, **34**(1): 15~20
- 6 N. Ling, Y. Zhang, X. Rao *et al.*. Small table-top adaptive optical systems for human retinal imaging[C]. *SPIE*, 2001, **4825**: 99~108
- 7 W. Jiang, M. Li, G. Tang *et al.*. Infrared adaptive optics system of the 2.16-m telescope and its wavefront detecting error and performance analysis[C]. *SPIE*, 1996, **2828**: 322~331
- 8 W. Jiang, N. Ling, G. Tang *et al.*. 61-element adaptive optical system for 1.2-m telescope of Yunnan Observatory[C]. *SPIE*, 1998, **3353**: 696~703
- 9 C. Rao, W. Jiang, C. Fang *et al.*. A tilt-correction adaptive optical system for the solar telescope of Nanjing University[J]. *Chin. J. Astron. Astrophys.*, 2003, **3**(6): 576~586
- 10 C. Rao, W. Jiang, Y. Zhang *et al.*. Upgrade on 61-element adaptive optical system for 1.2 m telescope of Yunnan Observatory[C]. *SPIE*, 2004, **5490**: 943~953
- 11 C. Rao, A. Zhang, Y. Zhang *et al.*. First observations on the 127-element adaptive optical system for 1.8 m telescope[C]. *SPIE*, 2010, **7654**: 76541H
- 12 C. Rao, L. Zhu, X. Rao *et al.*. 37-element solar adaptive optics for 26 cm solar fine structure telescope at Yunnan Astronomical Observatory[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2010, **8**(10): 966~968
- 13 C. Rao, L. Zhu, X. Rao *et al.*. An update 37-element low-order solar adaptive optics system for 1-meter solar telescope at full-shine Lake Solar Observatory [C]. Submitted to the Topical Meeting of OSA, 2011
- 14 W. Jiang, Y. Zhang, H. Xian *et al.*. A wavefront correction system for inertial confinement fusion [C]. Proc. of the 2nd International Workshop on Adaptive Optics for Industry and Medicine, 1999
- 15 Y. Zhang, Z. Yang, C. Guan *et al.*. Dynamic aberrations correction in an ICF laser system[J]. *Springer Proc. Phys.*, 2005, **102**: 261~271
- 16 Z. Yang, E. Li, H. Wang. Adaptive optical system for a large-aperture Nd:glass laser for ICF[C]. *SPIE*, 2004, **5639**: 21~27
- 17 Zhang Yudong, Jiang Wenhan, Shi Guohua *et al.*. Application of adaptive optics in ophthalmology[J]. *Scientia Sinica (G)*, 2007, **37**(B10): 68~74
张雨东, 姜文汉, 史国华 等. “自适应光学的眼科学应用[J]. *中国科学:G 辑*, 2007, **37**(B10): 68~74
- 18 N. Ling, X. Rao, L. Wang *et al.*. Characteristic of a novel small deformable mirror[C]. Proc. of the 2nd International Workshop on Adaptive Optics for Industry and Medicine, 1999
- 19 Ling Ning, Zhang Yudong, Rao Xuejun *et al.*. A small adaptive optical imaging system for cells of living human retina[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(9): 1153~1158
凌宁, 张雨东, 饶学军 等. 用于活体人视网膜观察的自适应光学成像系统[J]. *光学学报*, 2004, **24**(9): 1153~1158
- 20 Guohua Shi, Yun Dai, Ling Wang *et al.*. Adaptive optics optical coherence tomography for retina imaging[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2008, **6**(6): 424~425
- 21 J. Lu, H. Li, L. Wei *et al.*. Retina imaging *in vivo* with the adaptive optics confocal scanning laser ophthalmoscope [C]. *SPIE*, 2009, **7519**: 751911