



DOI: 10.12086/oe.2018.170489

## 自适应光学发展综述

姜文汉<sup>1,2\*</sup><sup>1</sup>中国科学院自适应光学重点实验室,四川 成都 610209;<sup>2</sup>中国科学院光电技术研究所,四川 成都 610209

**摘要:** 自适应光学(AO)是校正动态光学波前误差的技术。本文概述了近50年来AO的发展历程,包括发展初期,“星球大战”期间美国的发展,以及在地基高分辨力成像望远镜,激光系统(特别是惯性约束聚变)以及眼科等方面的应用,此外还给出AO的发展趋势。通过引用每一项技术发展,首创者的首篇文献,给出了比较清晰的发展脉络。

**关键词:** 自适应光学; 波前校正; 高分辨力成像

**中图分类号:** O439

**文献标志码:** A

**引用格式:** 姜文汉. 自适应光学发展综述[J]. 光电工程, 2018, 45(3): 170489

## Overview of adaptive optics development

Jiang Wenhan<sup>1,2\*</sup><sup>1</sup>Key Laboratory of Adaptive Optics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China;<sup>2</sup>Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China

**Abstract:** Adaptive optics (AO) is the technology for correcting the dynamic optical wavefront errors. This article reviews the development process of AO in recent 50 years including: the first stage of development, progresses of United States in the period of "Star War", and the applications of AO in the fields of high resolution imaging of ground-based telescopes, laser systems, especially for inertial confinement fusion (ICF), and ophthalmology. Moreover the development trends of AO are also presented. For each technical innovation, the first published paper of the innovator is cited as far as possible. Giving a development skeleton of AO is the purpose of this paper.

**Keywords:** adaptive optics; wavefront correction; high resolution imaging

**Citation:** Jiang W H. Overview of adaptive optics development[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2018, 45(3): 170489

### 1 AO 发展初期和原始思想的提出

17 世纪初人类就有了望远镜,400 余年来,它大大扩展了人类对远方目标的观察能力。但开始使用望远镜不久就发现大气对观测的影响,当放大倍率较大时,成像光斑模糊抖动,大大影响观测分辨力,这就是大气湍流产生动态波前误差的结果。18 世纪初牛顿(Newton)在《光学》一书中,就已经描述了大气湍流

使像斑模糊和抖动的现象,他认为没有什么办法来克服这一现象,“唯一的良方是寻找宁静的大气,云层之上的高山之巅也许能找到这样的大气”<sup>[1]</sup>。到 20 世纪 50 年代以前,天文界和光学界就像谈论天气一样谈论大气湍流的影响,还创造了一个专用名词“Seeing”(视宁度)来描述这一现象。几个世纪以来,人们对此无能为力,只能按照牛顿的思路,以极大的努力寻找 Seeing 特别好的观测站址。

收稿日期: 2017-10-11; 收到修改稿日期: 2017-12-24

作者简介: 姜文汉(1936-),男,中国工程院院士,研究员,主要从事自适应光学的研究。E-mail: adopse@ioe.ac.cn

1953 年美国天文学家 Babcock 提出用实时测量波前误差并加以实时补偿的方法来解决大气湍流等动态干扰的设想(图 1)<sup>[2]</sup>。其设想的核心是用光电探测器(超正析管)探测反映波前误差的望远镜物镜的刀口像,探测到的图像转化为投射反射镜表面油膜上的电荷,使油膜变形,以此来改变波前相位,实现波前反馈。

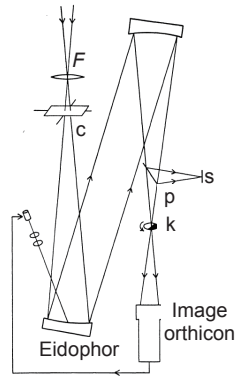


图 1 Babcock 设想的 Seeing 校正系统。望远镜物镜的刀口像成像在超正析管上,由此管探测的图像信号转化为投射到反射镜油膜上的电荷,以此来改变波前相位,实现波前反馈<sup>[2]</sup>

Fig. 1 The seeing correction system proposed by Babcock, the knife edge image of telescope's pupil is detected by the orthicon, the image is converted to correction signal which is projected by an electron beam at the oil film on the Eidophor, changing the wavefront phase, thus forms a feedback close loop<sup>[2]</sup>

1957 年,前苏联的天文学家 Linnik 也提出了类似的设想<sup>[3]</sup>,见图 2,将入射光经由多个压电或电容驱动的子镜组成的次镜 N,引入白光干涉仪,干涉条纹由与子镜对应的探测器探测,其信号用来控制子镜的移

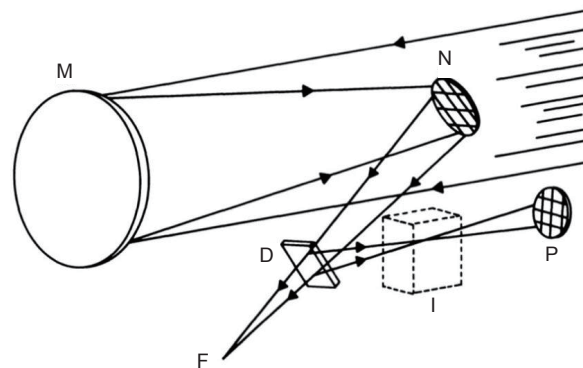


图 2 Linnik 设想的方案,次镜 N 由多个子镜组成,由驱动器调节光程,入射光经干涉仪 I 形成干涉条纹由探测器 P 探测, P 的分区与次镜 N 相对应<sup>[3]</sup>

Fig. 2 The proposal of Linnik. The secondary mirror N consists of several sub-mirrors, driven by actuators to change the optical light path, the interferometer I forms fringes of the incident light which are detected by the detector P, the detecting zones of P match with the sub-mirrors of the secondary mirror N<sup>[3]</sup>

动,产生反馈校正。

美苏两位天文学家的具体方案虽然有所不同,但实际上已经形成波前传感器和校正器的概念,利用传感器测到的波前误差信号,控制校正器进行补偿校正。如果这一过程足够快,就可以用不断变化的波前校正量来补偿校正不断变化的动态波前误差。这就是自适应光学(adaptive optics, AO)的原始思想,但是这两个方案都没有付诸实施。到了 20 世纪 60 年代后期和 70 年代初期,美国先进研究计划局(ARPA,即后来的 DARPA)开始资助自适应光学研究,主要有两个方向:激光传输和对卫星成像。1977 年 3 月,美国光学学会会刊(Journal of the Optical Society of America, JOSA)<sup>[4]</sup>集中发表了一批关于 AO 的文章,这是 AO 初期研究成果的首次集中发表。1978 年,Ittek 公司的 Hardy 发表了一篇综述<sup>[5]</sup>,比较全面地概括了美国前期有关 AO 的工作情况,该综述是首次关于 AO 原理和技术的全面介绍。这些文献的发表,标志着 AO 作为一个研究方向首次登上学术舞台。

## 2 美国“星球大战”计划期间在 AO 领域的发展

1983 年 3 月美国总统里根提出以反弹道导弹为主要目标的“战略防御倡议(strategic defense initiative, SDI)”的计划,1985 年 1 月正式立项研究,由于该倡议主要涉及对弹道导弹和卫星的攻防技术,被称为“星球大战”计划。AO 是其中主要的技术,刚刚出现的 AO 受到极大重视,美国将有关的工作从原来的 DARPA 主管改由战略防御计划局(strategic defense

initiative organization, SDIO)主管,并大大增加支持力度。这些工作中,MIT 的林肯实验室(Lincoln Laboratory)在技术上占主导地位。到 20 世纪 90 年代初,“星球大战”计划下马,林肯实验室将主要成果汇编于《Lincoln Laboratory Journal》于 1992 年第 1 期<sup>[6]</sup>发表,标志着将这一时期的重要进展解密。这期间最重要的进展有:

1) **大气湍流理论。**大气扰动是 AO 的主要校正对象,以 Fried 为首的物理学家,仔细研究了大气湍流造成光学波前误差的理论,提出影响大气校正的主要参数<sup>[7]</sup>:相干长度  $r_0$ 、Greenwood 频率<sup>[8]</sup>、等晕角  $\theta_0$ <sup>[9]</sup>和提前角等,成为 AO 校正大气湍流的理论基础。

2) **激光大气传输。**林肯实验室从 20 世纪 60 年代末开始研究激光大气传输,70 年代初开始 AO 的研究。从大气传输到 AO 系统原理进行大量开创性研究,并参与“星球大战”计划的多个重要试验。1988 年建立的短波长自适应技术(short wavelength adaptive technology, SWAT)系统,使用 241 单元的变形镜、Hartmann 波前传感器和数字波前处理机,首次利用 Na 波长(589 nm)激光,利用 90 km 高空大气层的共振散射形成的钠信标,实现对星体目标的湍流校正<sup>[13]</sup>。1990 年发射了专用的低功率大气补偿试验卫星(low-power atmosphere compensation experiment, LACE)。首次进行了用卫星上的前置合作目标以及钠信标,对卫星目标的激光发射和校正试验<sup>[10]</sup>。这是世界首次对卫星的激光发射和校正试验。继而在 1990 年 10 月,首次进行了多信标试验<sup>[11]</sup>。空军武器实验室星火(Starfire)光学靶场的 Fugate 于 1989 年在 1.5 m 望远镜上进行了瑞利导星的试验<sup>[12]</sup>。

3) **热晕校正。**热晕是强激光大气传输遇到的主要问题,1985 年用 52 单元的水冷变形镜首次进行了对强激光产生热晕的 AO 校正,并发现相位补偿的小尺

度不稳定性(PCI)<sup>[13]</sup>。1986 年起,用当时功率最强的中红外化学激光器(mid-infrared advanced chemical laser, MIRACL)进行强激光的热晕校正试验,建立了用 69 单元和 241 单元两个变形镜串联应用的缩比大气热晕试验(SABLE),并进行了 10 kW 的 HF 激光 400 m 长光路的试验<sup>[14]</sup>,并建立了激光大气传输及校正的 MOLLY 四维仿真程序,试验和仿真结果表明,AO 对热晕校正有一定效果,但 PCI 还是限制了其校正效果。

4) **激光导引星。**因为波前探测需要光能很多,AO 的工作目标(信标)必须足够亮,为解决所需的信标问题,Foy 和 Labeyrie 于 1985 年最先提出了用激光在大气层散射形成信标,即激光导引星思想<sup>[15]</sup>。产生激光导引星有两种方法,即 10 km 左右大气的瑞利散射和 90 km 高空 Na 层对 589 nm 波长激光的共振散射<sup>[16]</sup>。

5) **高分辨力成像。**“星球大战”的另一成果是建立国际首台对卫星目标的高分辨力成像系统,在 DARPA 支持下,Itek 公司于 1972 年研制实时大气补偿(real-time atmospheric compensator, RTAC)系统,作为可行性验证研究。根据当时的技术条件,波前校正器是刚研制出来的 21 单元单块压电变形镜(MPM),波前传感器采用 32 单元的横向剪切干涉仪,用模拟电路进行波前复原。该系统于 1984 年在 Rome 空军基地进行 300 m 的水平光路试验<sup>[17]</sup>,获得良好的校正效果。试验成功后,Itek 公司在 Hardy 领导下开始研制补偿成像系统(compensated imaging system, CIS),该系统在美国空军毛伊岛光学站(AMOS)的 1.6 m 望远镜上,用 168 单元变形镜,光电倍增管探测的剪切干涉仪作波前探测,仍用模拟计算网络进行波前复原计算,工作的极限星等是 7 等。1982 年作为第一台实际使用的卫星目标高分辨力 AO 成像系统装到 AMOS 光学站,图 3 是校正前后的双星和哈勃望远镜的图像<sup>[18]</sup>。

Hardy 在 1993 年发表了的 AO 在美国 20 年的发

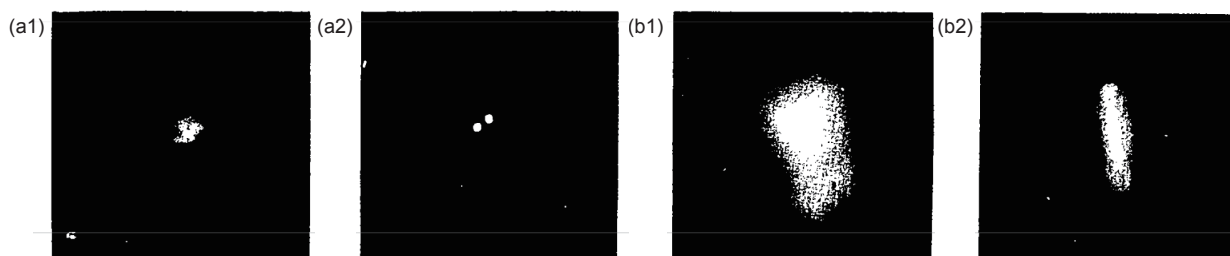


图 3 补偿成像系统 CIS 获取的双星和哈勃卫星的 AO 校正前(a1, b1)和校正后(a2, b2)的图像。(a1, a2) 双星(摄于 1982 年 5 月 18 日); (b1, b2) 哈勃卫星(摄于 1991 年 7 月 24 日)<sup>[5]</sup>

Fig. 3 Uncompensated (a1, b1) and compensated (a2, b2) images of binary stars and Hubble space telescope taken by CIS<sup>[5]</sup>. (a1, a2) Binary stars (taken on 18<sup>th</sup> May 1982); (b1, b2) Hubble space telescope (taken on 24<sup>th</sup> July 1991)<sup>[5]</sup>

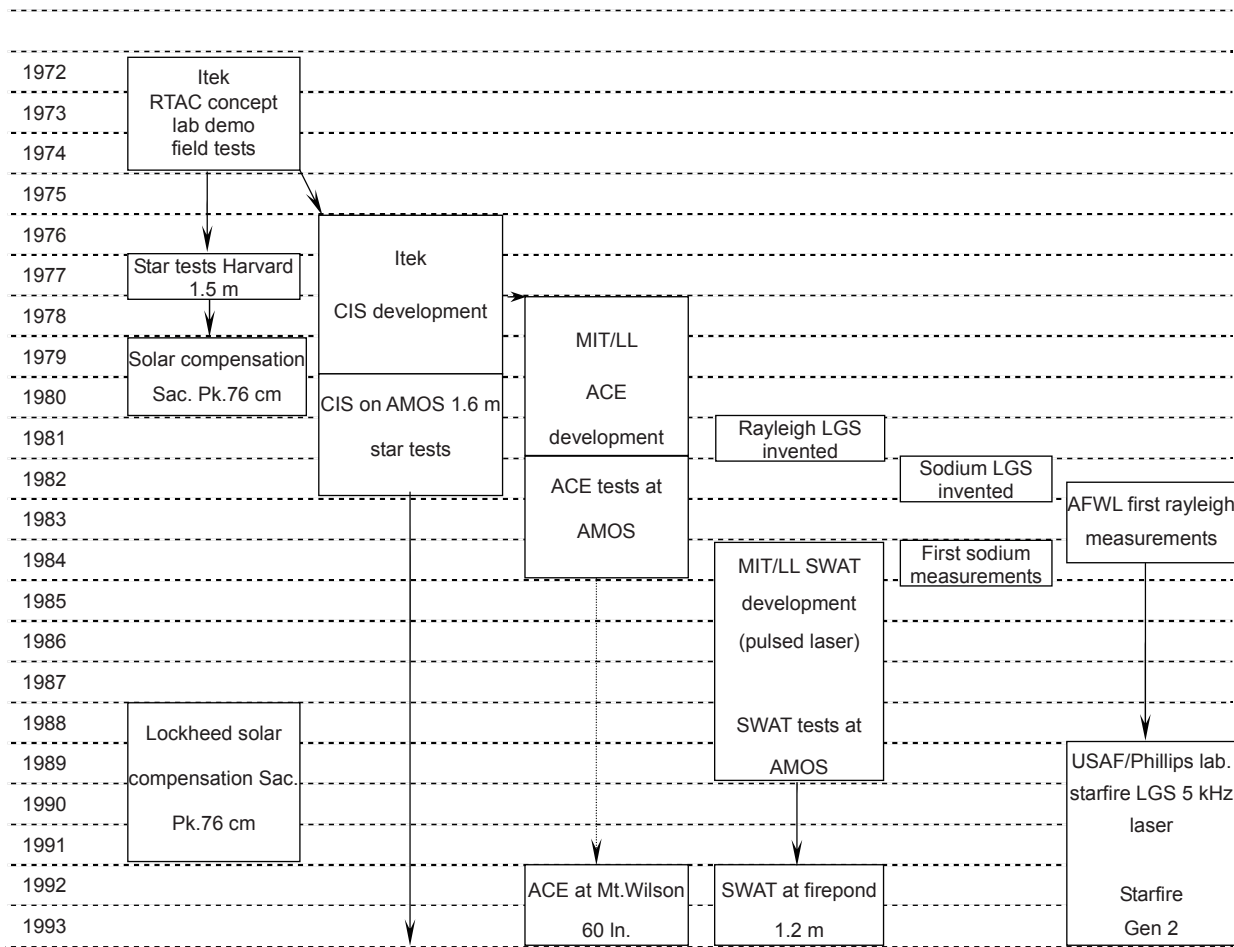


图 4 美国 1972~1993 年 AO 发展历程<sup>[19]</sup>

Fig. 4 The AO development course of US in the period of 1972~1993<sup>[19]</sup>

展进程，总结了这段发展历程，图 4 是其主要发展历程<sup>[19]</sup>。由此可见，“星球大战”计划尽管没有实现其最终目标，但对 AO 技术的发展打下了很好的基础。

### 3 在地基高分辨力望远镜中的应用

#### 3.1 夜天文望远镜的 AO

几百年来，天文学家一直盼望解决大气湍流干扰天文观测的问题，但是天文 AO 的发展明显晚于军用 AO，这是因为 AO 一开始是在美国军方支持下发展起来服务于“星球大战”计划，到二十世纪 70 年代后期起，天文 AO 才在有限经费支持下，开始研究。

与军用的观测人造卫星的 AO 系统相比，天文 AO 系统跟踪的目标角速度比较低，观测波段常常在比可见光波长较长的红外波段，大气湍流参数如相干长度，特征频率等都比较低，因此对系统的技术要求也相对较低。

欧洲南方天文台(European southern observatory,

ESO)于 1985 年开始的 Come-On 计划是国际上最早的天文 AO 计划，其最终目的是为 ESO 的 8.2 m 的 VLT 望远镜提供衍射极限分辨力成像的技术<sup>[20]</sup>。Come-On 的第一步是用 19 单元的变形反射镜和 Hartmann-Shack 波前传感器，1989 年 4 月在法国的 Haute-Provence 天文台首次获得 AO 校正的天文目标图像<sup>[21]</sup>。接下来，1992 年 12 月到 1993 年 4 月，在 3.6 m 的新技术望远镜(new technology telescope, NTT)上用 52 单元变形镜和 32 子孔径的 Hartmann 传感器实现对天文目标的红外波段的高分辨力成像。

稍后，各国天文台纷纷启动 AO 研究，其中法国天文学家 Roddier 提出用曲率传感器探测波前，用产生弯曲变形的双薄片变形镜作波前校正的新概念<sup>[22]</sup>，并且与 1992 年 6 月在夏威夷的 3.6 m 加拿大 - 法国 - 夏威夷(CFHT)望远镜上实现天文目标校正。

天文 AO 经过初期的突破后，20 世纪 90 年代初，美国军方对其 AO 开始解密，世界上大部分大型望远

镜纷纷建立队伍研制 AO 系统。当时建成一批 8 m ~ 10 m 级的大型望远镜,如 Keck、VLT、Subaru ,Gemini 等等,都要装备 AO 系统,迎来了 AO 大发展的时期。这个时期的特点是:波前校正器单元数大大增加,波前探测的 CCD 向大规模、高速、低噪声和高量子效率发展,数字波前处理机的处理能力大大提高,普遍采用 Na 信标。

进入 21 世纪,推出了口径达 30 m ~ 40 m 的超大型天文望远镜计划,目前有三个超大型天文望远镜正在设计中,即 TMT<sup>[23]</sup>,ELT<sup>[24]</sup>,GMT<sup>[25]</sup>。这三台望远镜的主要参数如表 1 和图 5。超大型望远镜 AO 系统需要解决的技术有:几万到十万单元变形反射镜(压电及 MEMS),自适应次镜,几万到十万子孔径 Hartmann 传感器及其高速、低噪声、高量子效率 CCD 探测器(需要不同方向的长条形像素子阵),高速实时波前控制计算机,150 W 级 Na 光激光器等。此外,由于光学镜面制造能力和运输的限制,这些超大型望远镜的主镜只

能采用多块较小镜面拼合而成。为保证大口径的极限分辨能力,拼合镜面必需采用主动光学方法,保证镜面严格共相,如此众多镜面的光学共相,也是一个技术挑战。

大型望远镜的科学目标,要求在大视场(几角分),宽光谱范围(可见到中红外)实现 AO 校正,这就提出了许多技术挑战,要根据不同的科学目标,设计多套 AO 系统,如多共轭 AO(multi-layer conjugation AO, MCAO),多目标 AO(multi-layer object, MOAO),地面层 AO(ground layer AO, GLAO),并针对不同成像波段,用不同的系统。所用的技术有的已经超出目前的技术能力,只能逐步实施。例如,TMT 在初期阶段先研制首光 AO(first light AO)<sup>[23]</sup>,见表 2。

### 3.2 人造卫星成像望远镜的 AO

迄今为止,最大的对人造卫星成像用的 AO 望远镜是美国星火导弹靶场(starfire optical range, SOR)的

表 1 三台超大型光学天文望远镜的主要参数

Table 1 The primary parameters of three extreme large astronomical telescopes

望远镜名称	口径/m	主镜构成	主镜材料	集光面积/m <sup>2</sup>
ELT	39.3	798x1.4 m	mULE	978
TMT	30	738x1.21 m	ULE	655
GMT	24.5	7x8.4 m	硼硅酸盐	368

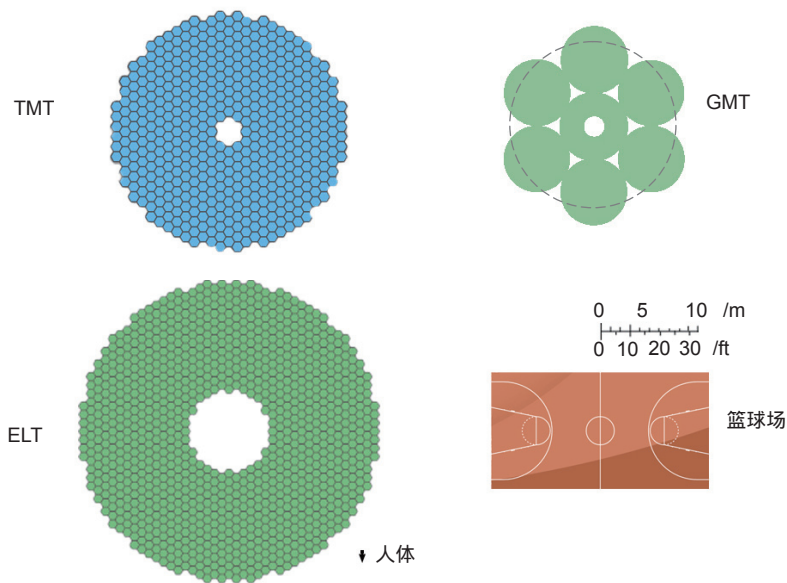


图 5 三台超大型望远镜的主镜布局,与之对比也画出篮球场和人体的大小

Fig. 5 Primary mirrors arrangement of three super large astronomical telescopes, for comparing, the sizes of basketball field and human body are also shown (update from Wikipedea)

3.5 m 望远镜<sup>[26]</sup>和毛伊岛光学站(AMOS)的 3.67 m 先进电光系统(advanced electro optical system, AEOS)<sup>[5]</sup>。SOR 望远镜主镜是由 Steward 天文台 Mirror Lab 用硼硅酸盐材料熔融旋转成型而成, AEOS 望远镜主镜是 Zerodur 的薄镜面, 两台望远镜的 AO 系统都用 941 单元的变形镜(实际在光瞳内不到 800 单元), 32×32 子孔径的 Hartmann 传感器, 探测器是由林肯实验室提供的 128 像素×128 像素的背照明帧转移低噪声的专用 CCD。两者都可以用于可见到近红外波段。SOR 望远镜主体建成于 1994 年, 1997 年装上 AO 系统, 以后又都配备了钠信标系统。

这两台属于美国空军的大型望远镜, 其主要用途

是卫星目标成像。图 6 是 SOR 对低轨卫星和恒星的跟踪误差, 方差都在几十纳弧度量级。图 7 是 SOR 获取的低轨卫星成像结果。SOR 还进行过对低轨卫星发射激光试验, 图 8 是用和不用 AO 在卫星上激光能量分布, AO 校正后峰值功率密度有很大提高<sup>[23]</sup>。

### 3.3 太阳望远镜 AO

太阳表面的精细观察对太阳物理的研究以及空间天气预报有重要意义, 太阳望远镜 AO 与夜天文望远镜的 AO 不同之处在于太阳是低对比扩展目标, 波前传感器的子光斑只能用相关提取算法, 而且白天大气湍流也比较强。Lockheed 公司的 Acton 和国立太阳天

表 2 TMT 的首光 AO 系统主要参数

Table 2 The primary parameters of the first light adaptive optical systems of TMT telescope

AO 系统	变形镜	导星和波前传感器
NFIRAOS (MCAO)	60×60 单元, 共轭高度 0 km, 行程 8 mm~10 mm >30×30 单元, 共轭高度 12 km, 行程>4 mm	钠导星 6~9, 功率 17 W~25 W, 倾斜及聚焦导星 1~3, 红外自然导星
MIRAO	单元数 15×15 到 30×30	钠导星 1~3, 功率 17 W~25 W, 倾斜及聚焦导星 1, 红外自然导星

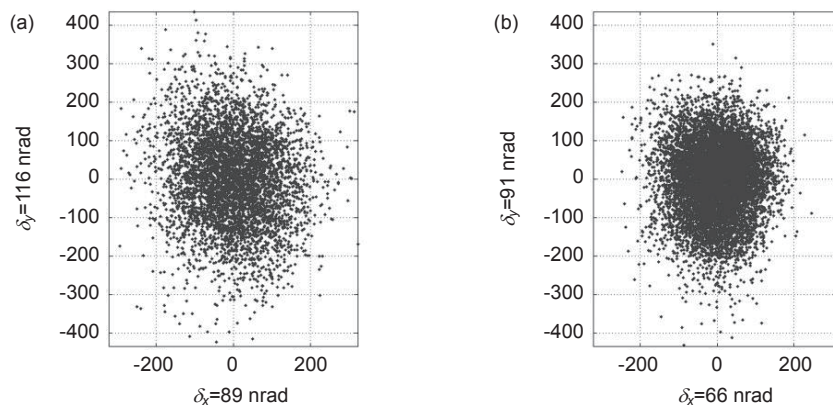


图 6 SOR 望远镜对低轨卫星(a)和恒星(b)的跟踪精度<sup>[26]</sup>

Fig. 6 Tracking precision of SOR 3.5 m telescope for low orbit satellite (a) and star (b)<sup>[26]</sup>

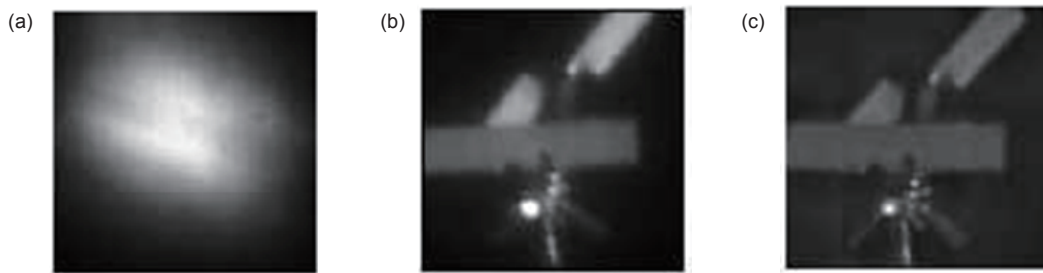


图 7 SOR 望远镜对低轨卫星的成像效果。(a) 校正前; (b) 校正后; (c) 校正+图像处理<sup>[26]</sup>

Fig. 7 Low orbit satellite Imaging by SOR telescope. (a) Uncompensated; (b) Compensated; (c) Compensated + image processing<sup>[26]</sup>

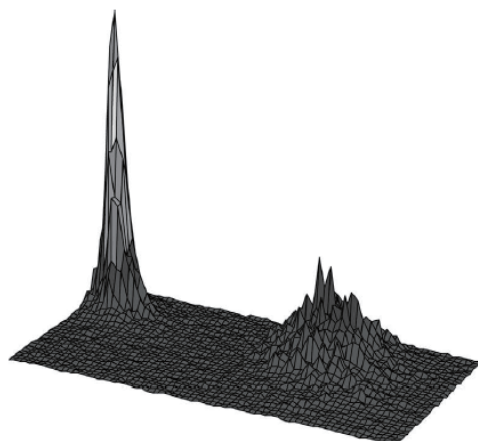


图8 SOR望远镜对低轨卫星发射激光试验,用AO校正前(右)后(左)卫星上的激光能量分布<sup>[26]</sup>  
Fig. 8 Laser emitting from SOR telescope, laser distribution on satellite, right: uncompensated; left: compensated<sup>[26]</sup>

文台(NSO)的Dunn于1986年在76 cm的DST望远镜建立了世界上首套太阳AO系统<sup>[27]</sup>,获得观测结果。随着技术的发展,国际上已经有十余台太阳望远镜配备了AO系统,校正单元数已达300余单元。

### 3.4 我国AO成像系统的发展<sup>[28]</sup>

我国对AO的研究起步较早,中国科学院光电技术研究所(Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, IOE, CAS,以下简称IOE)于1979年开始AO研究,1980年建立自适应光学研究室,38年来独立自主地建立了AO的技术基础,1982年研制出了我国第一块变形反射镜——7单元整体压电变形镜<sup>[29]</sup>,30余年来已研制成功十余套地基AO观测系统。

1990年10月,即在1989年ESO的Come-On计划在国际上第一次对天文目标实现AO校正后1年,IOE研制的21单元动态波前误差校正系统在云南天文台的1.2 m望远镜(利用其375 mm局部口径)上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<sup>[30]</sup>。该系统经过改造后,安装在北京天文台2.16 m天文望远镜上,实现了全口径的红外J波段的大气校正。

2004年,IOE在云南天文台的1.2 m望远镜上,用61单元变形镜实现了用全口径对星体目标的自适应光学校正<sup>[31]</sup>,2009年,IOE在新建的丽江1.8 m望远镜上,用127单元自适应光学系统实现首光<sup>[32]</sup>。

2011年IOE和中科院理化所等单位合作,国内首次成功激发人造钠信标<sup>[33]</sup>,并于2014年实现暗弱恒星(星等8.18等)的大气动态光学误差实时校正,获得

其近红外波段高分辨力图像<sup>[34]</sup>,并同时首次试验验证了长脉冲激光双峰谱形(D2a+D2b)钠信标激发钠层的有效性,较单峰谱型(D2a)回光效率提升约40%<sup>[35]</sup>。现在IOE正在研制用于4 m望远镜的914单元AO系统。

在太阳望远镜方面,IOE先后与南京大学天文系合作为43 cm太阳望远镜建立了国内首套太阳相关精跟踪系统<sup>[36]</sup>,与云南天文台合作为26 cm太阳精细结构望远镜建立了37单元太阳AO系统并在国内首次获得经过AO校正后的太阳观测结果,与云南天文台合作为1 m新真空太阳望远镜(NVST)先后建立37单元太阳AO系统和151单元高阶太阳AO系统<sup>[37]</sup>,并在国际上首次获取覆盖可见光至近红外波段的太阳外层的三维高分辨力成像结果(图9)。

在地面对卫星目标的自由空间光通信中,大气湍流使接收光斑发散抖动,通信激光信号的相干性下降,造成误码率增加。AO可以提高光斑质量,提高与接收光纤的耦合效率,降低误码率。在相干激光通信中,波前相位误差要校正到很小,更必需用AO技术。IOE进行多次自由空间光通信的AO校正试验<sup>[38]</sup>,用650 mm接收望远镜,137单元的AO系统对水平大气通道进行校正,使到达波前误差方差从1.88  $\mu\text{m}$ 降低到0.12  $\mu\text{m}$ ,耦合进入光纤的平均信号光功率可以提高约6 dB~13 dB,耦合光功率起伏在AO校正以后小于5 dB,误码率从AO校正前的 $10^{-3}$ 降低到校正后的 $10^{-6}$ ~ $10^{-7}$ 。

北京理工大学周仁忠及其团队,也很早开展了自适应光学研究,并在1996年分别出版了《自适应光学理论》<sup>[39]</sup>和《自适应光学》<sup>[40]</sup>两本专著,介绍了自适应光学早期的理论和技术发展。

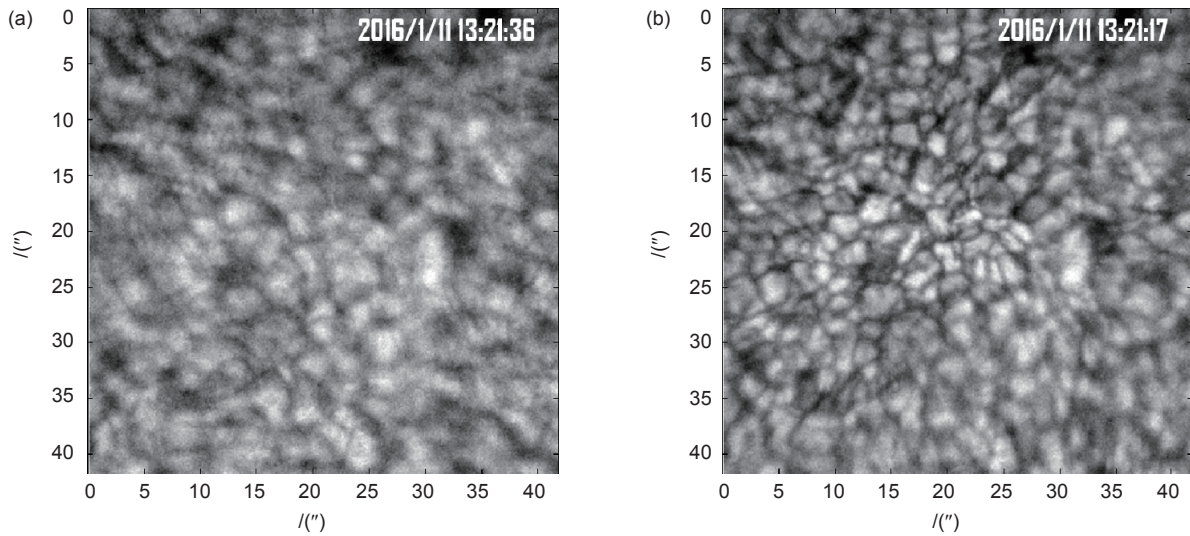


图 9 151 单元高阶 AO 系统获得的太阳米粒结构的开闭环图像<sup>[37]</sup>。(a) AO 开环(705.7 nm@0.6 nm); (b) AO 闭环(705.7 nm@0.6 nm)

Fig. 9 Sun granules structure imaged by the 151-element AO system<sup>[37]</sup>. (a) Uncompensated; (b) Compensated

#### 4 惯性约束聚变(ICF)中的应用

ICF 是将脉冲种子激光,经多级放大形成  $10^{12} \text{ W} \sim 10^{14} \text{ W}$  的高功率脉冲,多路激光汇聚到充满核聚变材料(氘和氚)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。

激光核聚变装置是当代规模最大、最复杂的激光工程。几十路激光,每路激光的光路长达几十米,有几百件光学元件组成。光学元件制造误差的累积,产生可观的波前误差,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。AO 是校正这一庞大系统波前误差的有效手段。

1985 年 IOE 与上海光机所合作,在当时上海光机所正在建造的神光 I(LF12)装置上加装 19 单元的 AO

系统,显著提高靶上功率密度,系统采用高频振动爬山法实现优化控制<sup>[41]</sup>。这是全世界第一套用于 ICF 的 AO 系统,9 年以后美国劳伦斯·利弗莫尔实验室(LLNL)发表了他们为 Beamlet 系统研制的 AO 系统<sup>[42]</sup>。此后,IOE 为我国的 ICF 装置研制过 3 种 35 套 AO 系统(见表 3)。除了神光 I 用的第一套 AO 系统是用高频振动爬山法之外,其余的系统都使用 Hartmann 传感器作波前探测。最初 3 种,变形反射镜都在主放大器的输入端,最后一套变形反射镜的位置改在主放大器的端镜,为此变形反射镜的大小扩大到  $390 \text{ mm} \times 390 \text{ mm}$ ,解决了预校正的光束通过空间滤波器小孔的问题。

激光,特别是大功率和大能量激光,激光器输出光束质量改善(光束净化)和光束方向的稳定,以及激光大气传输的全程校正,AO 是必不可少的关键技术,我们将在另外的文章中加以评述。

表 3 IOE 研制的 ICF 用的 AO 系统

Table 3 AO systems for ICF developed by IOE

No.	ICF facility	Act. of DM	Aperture of DM	Wavefront sensor	Set	Year
1	Shenguang I	19	$\Phi 70 \text{ mm}$	Hill-climbing	1	1985
2	"Shenguang III" prototype	45	$70 \text{ mm} \times 70 \text{ mm}$	HS 22×22	1	2004
3	"Shenguang III" prototype	45	$70 \text{ mm} \times 70 \text{ mm}$	HS 22×22	8	2007
4	"Shenguang II" petawatt	55	$\Phi 380 \text{ mm}$	HS 22×22	1	2009
5	"Shenguang III"	31	$390 \text{ mm} \times 390 \text{ mm}$	HS 22×22	24	2011



## 5 人眼 AO

人眼作为成像光学系统是不完善的,人眼系统中的波前误差,无论是在对外观察(视觉)或对内观察(眼底检查)时都不能完善成像。对于人眼的应用,是 AO 在工业和民用领域应用最先实现的突破。

1997 年梁俊忠和 Williams 首次发表用 AO 校正人眼像差<sup>[43-44]</sup>,实现视网膜接近人眼瞳孔限定的衍射极限成像,开辟了 AO 在人眼视网膜成像应用的先河。2000 年 IOE 用 19 单元变形镜,建立了我国第一台活体人眼视网膜 AO 成像观察系统<sup>[45]</sup>(图 10)。以后几经改进,获得药监局批准为医疗仪器。

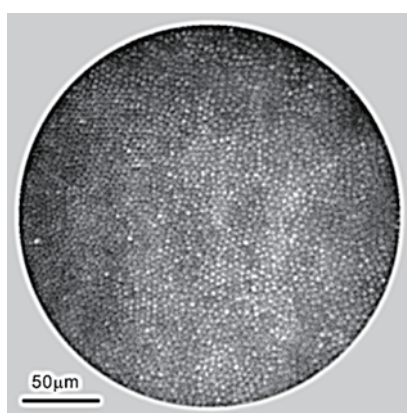


图 10 人眼视网膜 AO 成像观察系统拍摄的视网膜图像<sup>[45]</sup>

Fig. 10 Retina image taken by the AO retina imaging system<sup>[45]</sup>

AO 系统只能在像面两维方向实现高分辨力成像,光学相干层析成像技术(optical coherence tomography, OCT)和激光共焦扫描技术(confocal laser scanning, CLS)可以在轴向分层成像,与 AO 相结合,可以实现

三维的高分辨力成像。IOE 在研制成功人眼视网膜成像仪的基础上又研制成功 AO 光学相干层析(AO-OCT)<sup>[46]</sup>和 AO 共焦扫描检眼镜(AO-confocal scanning laser ophthalmoscope, AO-CSLO)<sup>[47]</sup>等先进视网膜成像系统。图 11 是 AO-CSLO 拍摄的视网膜分层图像。

AO 可以将人眼像差校正后获得完美成像,张雨东提出人眼训练仪的专利,人眼通过 AO 系统可以提高目标成像质量,可以用来训练弱视人群的视神经系统,改善其视力。IOE 研制成功的人眼训练仪,经过临床试验,证明对超过成长期的弱视患者也具有改善效果<sup>[48]</sup>。

## 6 自适应光学发展趋势

经过 50 余年的发展, AO 技术已经基本发展成熟,建立了基本的理论架构,波前探测器、处理器和校正器的基本形式也已成熟。下一步的发展集中在超大型的极致 AO 和小型化 AO 两个方面。

### 6.1 扩大 AO 系统的校正视场

普通的 AO 系统由于波前探测子孔径较小和采样频率较高,无法对暗弱目标进行工作,激光导引星提供了解决途径。AO 系统另一个限制是其有效校正视场由于大气等晕角的限制,只能在几个角秒之内。多信标 AO(MCAO)是扩大有效校正视场的重要方法,用多个信标进行同步探测,通过层析算法解算出大气湍流的三维分布,用共轭于不同高度的多个波前校正器校正。因此,大型望远镜所用的激光导引星都是一个由几台激光器构成的星座,图 12 是 TMT 计划用 9 台钠激光构成不同用途的星座以及发射系统。

地面层 AO(GLAO)是用多信标探测的大气分层分

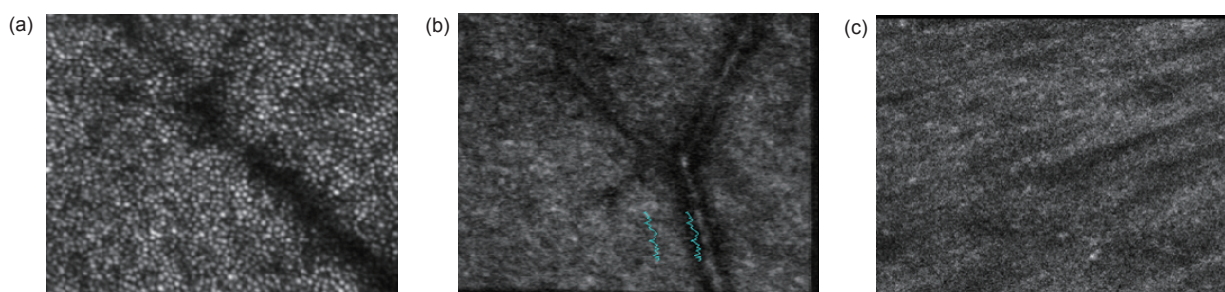


图 11 AO-CSLO 拍摄的人眼视网膜分层高分辨力图像。(a) 活体人眼视网膜感光细胞层; (b) 毛细血管层; (c) 神经纤维层图像<sup>[47]</sup>

Fig. 11 Layered high resolution images taken by the AO-CSLO system. (a) Layer of photoreceptors; (b) Layer of blood capillaries; (c) Layer of nerve fibers<sup>[47]</sup>

布,只用一块波前校正器校正贴近地面层的湍流波前,可以在较大视场内获得比较均匀的校正效果。

### 6.2 极致自适应光学(Extreme adaptive optics)

探测太阳系外行星是天文学研究的热点,用光学成像探测直接探测系外行星有很多优点, AO 校正可以提供所需的分辨力,但明亮恒星和行星之间的亮度

比高达 6 到 9 个量级, AO 校正的点扩散函数在中心亮核附近有一个由于波前校正残差等许多因素造成的光晕,因此,对 AO 提出了突破光晕限制,将校正效果发挥到极致的要求。Gemini 望远镜和 ESO 望远镜分别率先提出 Gemini Planet Finder (GPI)<sup>[49]</sup>和 SPHERE Extreme AO<sup>[50]</sup>(SXA0)两个计划,表 4 是这两套系统的参数。

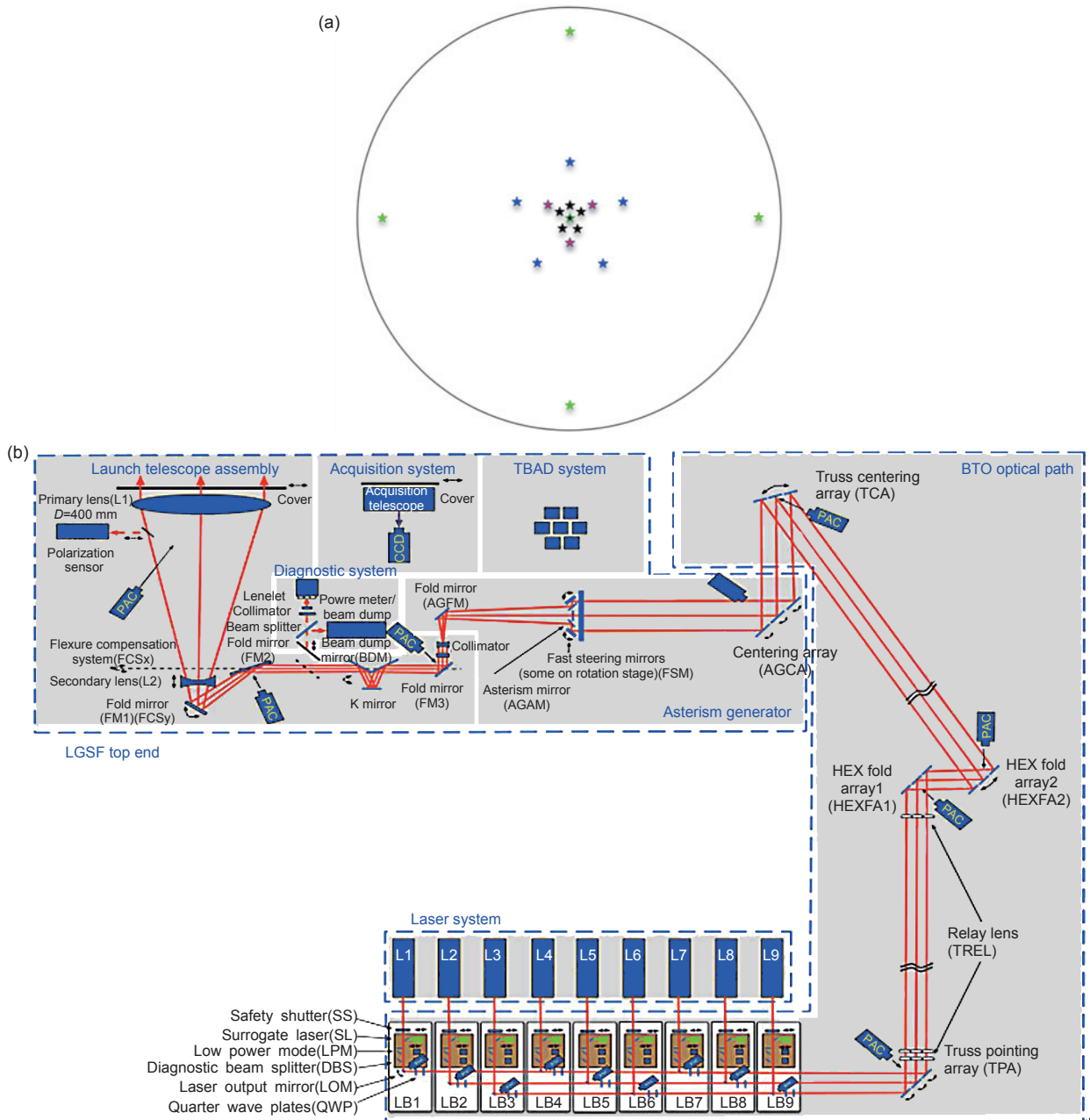


图 12 TMT 计划的钠导星星座。(a) 根据不同 AO 系统的星座;(b) 9 套钠激光发射系统(IOE 提供)  
 Fig. 12 The planned constellation of Na beacons for TMT. (a) Constituents of the constellation, different stars used for different AO system; (b) Launching system of 9 Na lasers (provided by IOE)

这两套系统的参数十分接近,所用技术也大致相同,除了 AO 系统之外,波前倾斜校正回路都使用线性平方高斯算法(LQG)抑制外来抖动,都用相位差法(phase diversity)对非共光路波前误差测量和在算法中校正,都校正光瞳位置的漂移以保证光轴一致,都用长时间累加来减少随机斑点的影响。

两套系统先后于 2013 年 11 月(GPI)和 2014 年 5 月(SPHERE)实现首光(图 13)。SPHERE<sup>[51]</sup>系统在 Seeing 0.85 角秒,风速 12.5 m/s 下,对 9 等星在 H 波段(1.6 μm)实现 Strehl 比 90.3%,全系统 RMS 波前误差 81 nm,倾斜校正 RMS 残差 0.23 毫角秒(mas)。

GPI<sup>[52]</sup>系统首光时在 H 波段 Strehl 比 0.89,在 0.75 角秒处的对比度为 10<sup>6</sup>,0.35"对比度为 10<sup>5</sup>,拍摄到恒星 Beta Pictorie 的行星以及 HR4796 星周围的尘埃盘(图 14)。

其他 10 m 级望远镜如 Subaru 和 Keck 等也都在研发极致 AO 系统。

### 6.3 AO 系统小型化

AO 在民用领域的推广,要求系统小型化和低价

化。因此小型化也是 AO 硬件的努力方向。而波前校正器的大小是决定 AO 系统体积的主要因素,因此波前校正器的小型化是 AO 系统小型化的关键。

**小型分立式压电变形镜:**分立驱动器的压电变形镜是目前常用的变形反射镜,驱动器间距大致在 8 mm ~ 12 mm,减小变形镜大小必需缩小驱动器间距,但会降低驱动器的强度,增加制作难度。图 15(a)是 IOE 研制的 1085 单元的变形镜,其驱动器间距 3 mm,透光口径 100 mm。

**双膜片变形镜(Bimorph DM)<sup>[53]</sup>:**其电极尺寸可能做到 2 mm ~ 3 mm,这种变形镜的变形影响函数比较宽,对温度比较敏感。图 15(b)是 IOE 研制的 Bimorph 变形镜,单元数 35,透光口径 20 mm。

**MEMS 变形镜:**用微机械(MEMS)技术可以制作单元尺寸几百微米的变形镜。Boston Micromachines 最早研制 MEMS 变形镜<sup>[54]</sup>,其连续面板静电力驱动的 MEMS 变形镜,行程可达 5.5 μm,单元间距 450 μm,单元数可达 4092 (64×64)。法国的 ALPAO 研制的音圈电机驱动的 MEMS 变形镜<sup>[55]</sup>,单元间距 1.5 mm 和 2.5 mm,单元数可达 277,行程较大可达 15 μm,响应时

表 4 两套极致 AO 系统主要参数

Table 4 The primary parameters of two extreme adaptive optical systems

系统	望远镜	口径	变形镜类型及单元数	波前传感器	帧频	波前处理算法	星冕仪
GPI	Gemini	8 m	高价 MEMS 1493	空间滤波 SH 沿	2500 Hz	傅里叶变换	孔径截趾
			低价压电 44 单元	直径 43 子孔径			Lyot 光阑
SPHERE	VLT	8 m	CILAS 压电 41×41	空间滤波 SH	1200 Hz	积分和 LQG	孔径截趾
				40×40 子孔径			Lyot 光阑

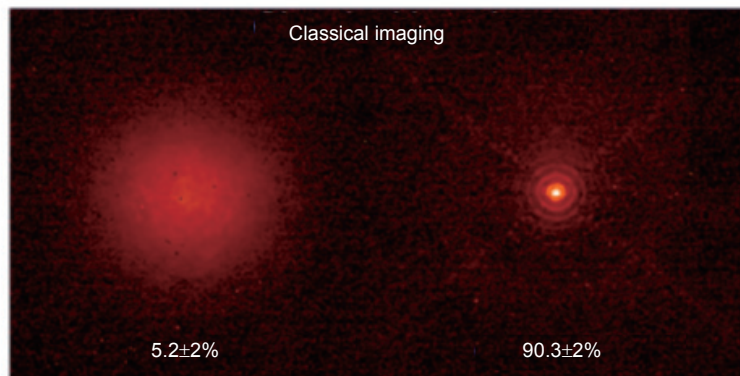


图 13 SPHERE 系统获得的点扩散函数,对 H 波段 Strehl 比从校正前的 0.052 提高到校正后的 0.90<sup>[51]</sup>。

Fig. 13 Point spread function (PSF) of SPHERE system, the Strehl ratio of H band is increased from 0.052 before correction to 0.90 after correction<sup>[51]</sup>.

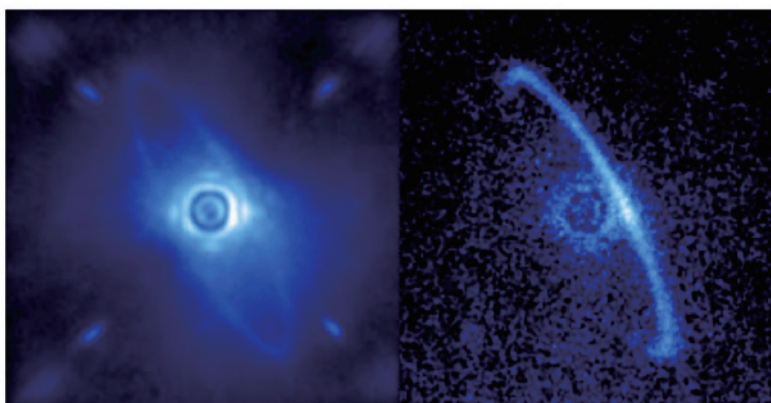


图 14 GPI 拍摄的 HR4796 星周围的尘埃盘，主星形成的中心亮斑被星冕仪遮挡<sup>[52]</sup>  
 Fig. 14 Star HR4796 and surrounding dust disk, the bright image of main star is obscured by coronagrapher<sup>[52]</sup>

间 $<1$  ms。图 15(c)是 IOE 研制的 140 单元的 MEMS 变形镜，行程  $1.8\ \mu\text{m}$ ，驱动器间距  $0.4\ \text{mm}$ 。

**液晶空间光调制器**：利用向列型液晶在外加电压下晶畴转动引起折射率变化产生相位调制，每一个像素就是一个调制单元，因此单元数可以很多，单元间隔可小到  $10\ \mu\text{m}$  量级，用于 AO 系统，有体积小、可以批量生产的优点<sup>[56]</sup>。但是其校正范围有限( $0 \sim 2\pi$  相位)，响应速度较慢，只能用于偏振光，光谱范围不宽，不能耐受强光等缺点而限制其应用<sup>[57]</sup>。

**变形次镜**：一般通用的变形镜的反射面都是平面，在系统中使用时要先将光束准直，并将变形镜设置在与光瞳共轭的位置，因而使光路复杂，增大系统体积，变形次镜是将望远镜的次镜直接做成可变形的，可以大大简化光路，2016 年 IOE 成功研制 61 单元变形次镜，并安装于  $1.8\ \text{m}$  望远镜上，实现了变形次镜自适应光学系统首光<sup>[58]</sup>。

**无波前传感器 AO 技术**：波前传感器的小型化。

通用的波前传感器都是在与光瞳共轭的面上进行的，焦面波前探测技术，是在焦面上用焦斑(或焦面前后的光斑)提取波前信息。通常需要两个面上的光斑，通过反复迭代计算，获得光束的波前误差。需要很大运算量和相当长的运算时间，因此难于用在实时校正。1997 年 Vorontsov<sup>[59]</sup>提出随机平行梯度下降(stochastic parallel gradient-descent, SPGD)法，实现用像面信息直接闭环校正。这种方法类似于早期使用的多元高频振动法(multidither)，是以反映系统波前误差的焦面图像的特征量(如环围能量、峰值光强)为目标指标，通过在每个校正自由度上施加正负的随机扰动，测量目标指标的变化量来改变各个自由度的校正量，实现闭环校正。各种基于焦面图像的波前校正技术称为无波前传感器 AO 技术<sup>[60]</sup>。以校正显微镜观察样品深处时造成的样品像差的 AO 显微镜<sup>[61]</sup>是无波前传感器 AO 的理想应用目标，因为这种应用中，波前误差变化速度不快，系统小型化和低值化是追求的目标。



图 15 IOE 研制的几种小型变形镜。(a) 分立式驱动器，1085 单元间距  $3\ \text{mm}$ ；(b) Bimorph 变形镜，35 单元，间距  $3\ \text{mm}$ ；(c) MEMS 变形镜 140 单元，间距  $0.4\ \text{mm}$ 。(图均由光电所提供)

Fig. 15 Miniature deformable mirrors developed by IOE. (a) DM with discrete actuators, 1085 element spacing  $3\ \text{mm}$ ; (b) Bimorph DM, 35 element spacing  $3\ \text{mm}$ ; (c) MEMS DM spacing  $0.4\ \text{mm}$  (provided by IOE)

**四棱锥波前探测器**：波前传感器中的光电探测器，常用 CCD 或 CMOS 器件，为探测子孔径内的波前斜率，每个子孔径至少需要  $4 \times 4$  探测器像素，四棱锥波前探测器在焦面上用金字塔形的四棱锥(pyramid)将光束分为四个方向，经准直后成为四束平行光，在其光瞳的共轭面上，用阵列探测器探测光强分布。在  $x, y$  两方向上的四个光瞳像的同一位置像素探测的差分反映该位置上的波前斜率；每束光中，每个子孔径只需要一个探测器像素，因此一个子孔径总共只需 4 个像素。可以减少参与探测的光电探测器的像素数，提高探测效率<sup>[62]</sup>。IOE 在 2014 年，利用 1.8 m 望远镜平台，首次验证了无调制的四棱锥波前传感器探测方法，并成功首光获取恒星 1.2 倍衍射极限清晰图像<sup>[63]</sup>。

## 7 结束语

AO 概念的提出已 64 年，技术的开发也已 50 年了，在高分辨力成像、激光系统、视光学等方面都取得了重大应用成果，成为一些重要科技领域不可或缺的技术，正在一些超大型光学工程中发挥重要的关键作用；随着小型化技术的出现，也正向民用技术领域扩展。“旧时王谢堂前燕，飞入寻常百姓家”，原来高不可及的为大型光学工程服务的 AO 技术，一定会在工业和民用领域出现更多的应用。

## 参考文献

[1] 牛顿. 光学[M]. 北京: 北京大学出版社, 2007.

[2] Babcock H W. The possibility of compensating astronomical seeing[J]. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 1953, **65**(386): 229–236.

[3] Linnik V P. On the possibility of reducing the influence of atmospheric seeing on the image quality of stars[J]. *Optics and Spectroscopy* (in Russian), 1957, **3**. English translation, 401–402. CO-16 Satellite Conference on Active and Adaptive Optics, ESO Proc. **48**, 1993: 535–538.

[4] Fried D. L. edited Special issue on adaptive optics[J]. *JOSA*, 1977, **67**(3).

[5] Hardy J W. Active optics: A new technology for the control of light[J]. *Proceedings of the IEEE*, 1978, **66**(6): 651–697.

[6] Special issue on adaptive optics[J]. *Lincoln Laboratory Journal*, 1992, **5**(1): 170.

[7] Fried D L. Limiting resolution looking down through the atmosphere[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1966, **56**(10): 1380–1384.

[8] Greenwood D P. Bandwidth specification for adaptive optics systems[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1977, **67**(3): 390–393.

[9] Fried D L. Anisoplanatism in adaptive optics[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1982, **72**(1): 52–61.

[10] Murphy D V. Atmospheric-turbulence compensation experiments using cooperative beacons[J]. *The Lincoln Laboratory Journal*, 1992, **5**(1): 25–44.

[11] Murphy D V, Primmerman C A, Zollars B G, et al. Experimental demonstration of atmospheric compensation using multiple synthetic beacons[J]. *Optics Letters*, 1991, **16**(22): 1797–1799.

[12] Fugate R Q, Fried D L, Ameer G A, et al. Measurement of atmospheric wavefront distortion using scattered light from a laser guide-star[J]. *Nature*, 1991, **353**(6340): 144–146.

[13] Primmerman C A, Fouche D G. Thermal-blooming compensation: experimental observations using a deformable-mirror system[J]. *Applied Optics*, 1976, **15**(4): 990–995.

[14] Schonfeld J F. The theory of compensated laser propagation through strong thermal blooming[J]. *The Lincoln Laboratory Journal*, 1992, **5**(1): 131–150.

[15] Foy R, Labeyrie A. Feasibility of adaptive telescope with laser probe[J]. *Astronomy and Astrophysics*, 1985, **152**(2): L29–L31.

[16] Humphreys R A, Bradley L C, Herrmann J. Sodium-layer synthetic beacons for adaptive optics[J]. *The Lincoln Laboratory Journal*, 1992, **5**(1): 45–66.

[17] Hardy J W, Lefebvre J E, Koliopoulos C L. Real-time atmospheric compensation[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1977, **67**(3): 360–369.

[18] Hardy J W. *Adaptive Optics for Astronomical Telescopes*[M]. Oxford: Oxford University Press, 1998.

[19] Hardy J W. Twenty years of active and adaptive optics[C]// *ICO-16 Satellite Conference on Active and Adaptive Optics*, 1993, **48**: 29–34.

[20] Kern P, Merkle F, Gaffard J P, et al. Prototype of an adaptive optical system for astronomical observation[J]. *Proceedings of SPIE*, 1988, **860**: 9–16.

[21] Merkle F, Rousset G, Kern P Y, et al. First diffraction-limited astronomical images with adaptive optics[J]. *Proceedings of SPIE*, 1990, **1236**: 193–203.

[22] Roddier F. Curvature sensing and compensation: a new concept in adaptive optics[J]. *Applied Optics*, 1988, **27**(7): 1223–1225.

[23] Ellerbroek B, Britton M, Dekany R, et al. Adaptive optics for the thirty meter telescope[J]. *Proceedings of SPIE*, 2005, **5903**: 590304.

[24] Vernin J, Muñoz-Tuñón C, Sarazin M, et al. European extremely large telescope site characterization I: Overview[J]. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 2011, **123**(909): 1334–1346.

[25] GMT Project. Giant magellan telescope conceptual design review[EB/OL]. <http://www.gmto.org>, 2006.

[26] Fugate R Q. The starfire optical range 3.5-m adaptive optical telescope[J]. *Proceedings of SPIE*, 2003, **4837**: 934–944.

[27] Acton D S, Dunn R B. Solar imaging at national solar observatory using a segmented adaptive optics system[J]. *Proceedings of SPIE*, 1993, **1920**: 348–353.

[28] Jiang W H, Zhang Y D, Rao C H, et al. Progress on adaptive optics of Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(9): 900106. 姜文汉, 张雨东, 饶长辉, 等. 中国科学院光电技术研究所的自适应光学研究进展[J]. *光学学报*, 2011, **31**(9): 900106.

[29] 凌宁. 多元整体压电变形反射镜(研究阶段进展报告)[J]. *光电工程*, 1982, **9**(6): 43–52.

[30] Jiang W H, Li M G, Tang G M, et al. Adaptive optical image compensation experiments on stellar objects[J]. *Optical Engineering*, 1995, **34**(1): 15–21.

[31] Rao C H, Jiang W H, Zhang Y D, et al. 61-element adaptive optical system for 1.2 m telescope of Yunnan Observatory[J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2006, **23**(3): 295–302. 饶长辉, 姜文汉, 张雨东, 等. 云南天文台 1.2 m 望远镜 61 单元自适应光学系统[J]. *量子电子学报*, 2006, **23**(3): 295–302.

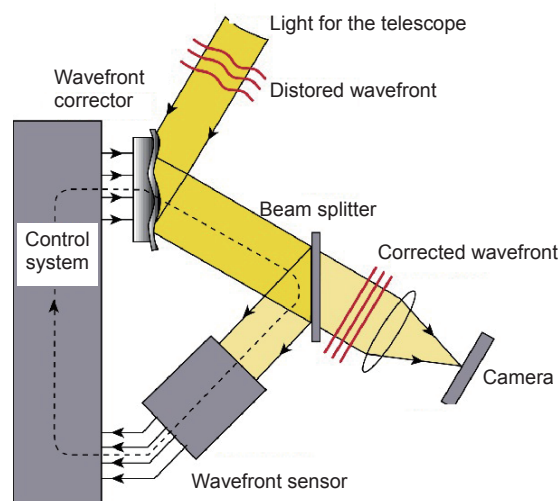
- [32] Rao C H, Wei K, Zhang X J, *et al.* First observations on the 127-element adaptive optical system for 1.8 m telescope[J]. *Proceedings of SPIE*, 2008, **7654**: 76541H.
- [33] Wei K, Bo Y, Xue X H, *et al.* Photon returns test of the pulsed sodium guide star laser on the 1.8 meter telescope[J]. *Proceedings of SPIE*, 2012, **8447**: 84471R.
- [34] Wei K, Li M, Chen S Q, *et al.* First light for the sodium laser guide star adaptive optics system on the Lijiang 1.8 m telescope[J]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2016, **16**(12): 183.
- [35] Jin K, Wei K, Feng L, *et al.* Photon return on-sky test of pulsed sodium laser guide star with D<sub>2s</sub> repumping[J]. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 2015, **127**(954): 749–756.
- [36] Rao C H, Jiang W H, Fang C, *et al.* A tilt-correction adaptive optical system for the solar telescope of Nanjing University[J]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2003, **3**(6): 576–586.
- [37] Rao C H, Zhu L, Rao X J, *et al.* Instrument description and performance evaluation of a high-order adaptive optics system for the 1 m new vacuum solar telescope at Fuxian solar observatory[J]. *The Astrophysical Journal*, 2016, **833**(2): 210.
- [38] Liu C, Chen M, Chen S Q, *et al.* Adaptive optics for the free-space coherent optical communications[J]. *Optics Communications*, 2016, **361**: 21–24.
- [39] 周仁忠, 阎吉祥. 自适应光学理论[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1996.
- [40] 周仁忠, 阎吉祥, 俞信, 等. 自适应光学[M]. 北京: 国防工业出版社, 1996.
- [41] Jiang W H, Huang S F, Ling N, *et al.* Hill-climbing wavefront correction system for large laser engineering[J]. *Proceedings of SPIE*, 1989, **965**: 266–273.
- [42] Salmon J T, Bliss E S, Byrd J L, *et al.* An adaptive optics system for solid-state laser systems used in inertial confinement fusion[R]. Monterey, CA: Office of Scientific & Technical Information Technical Reports LLNL, 1995.
- [43] Liang J Z, Williams D R, Miller D T. Supernormal vision and high-resolution retinal imaging through adaptive optics[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1997, **14**(11): 2884–2892.
- [44] Roorda A, Williams D R. The arrangement of the three cone classes in the living human eye[J]. *Nature*, 1999, **397**(6719): 520–522.
- [45] Ling N, Zhang Y D, Rao X J, *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. 用于活体人眼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.
- [46] Shi G H, Dai Y, Wang L, *et al.* Adaptive optics optical coherence tomography for retina imaging [J]. *Chinese Optic Letters*, 2008, **6**(6): 424–425.
- [47] He Y, Zhang Y D, Lu J, *et al.* Superresolution in adaptive optics confocal scanning laser ophthalmoscope[J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, **60**(3): 034207.  
何毅, 张雨东, 卢婧, 等. 超分辨率活体人眼视网膜共焦扫描成像系统[J]. *物理学报*, 2011, **60**(3): 034207.
- [48] Liu R, Zhou J W, Zhao H X, *et al.* Immature visual neural system in children reflected by contrast sensitivity with adaptive optics correction[J]. *Scientific Reports*, 2014, **4**: 4687.
- [49] Macintosh B A, Graham J R, Palmer D W, *et al.* The Gemini Planet Imager: from science to design to construction[J]. *Proceedings of SPIE*, 2008, **7015**: 701518.
- [50] Beuzit J L, Feldt M, Dohlen K, *et al.* A 'Planet Finder' instrument for the VLT[J]. *Proceedings of the International Astronomical Union*, 2005, **1**(C200): 317–322.
- [51] Fusco T, Sauvage J F, Petit C, *et al.* Final performance and lesson-learned of SAXO, the VLT-SPHERE extreme AO: from early design to on-sky results[J]. *Proceedings of SPIE*, 2014, **9148**: 91481U.
- [52] Macintosh B, Graham J R, Ingraham P, *et al.* First light of the Gemini Planet imager[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2014, **111**(35): 12661–12666.
- [53] Ning Y, Jiang W H, Ling N, *et al.* Response function calculation and sensitivity comparison analysis of various bimorph deformable mirrors[J]. *Optics Express*, 2007, **15**(19): 12030–12038.
- [54] Bifano T G, Perreault J A, Bierden P A. Micromachined deformable mirror for optical wavefront compensation[J]. *Proceedings of SPIE*, 2000, **4124**: 7–15.
- [55] Rooms F, Camet S, Charton J, *et al.* A new deformable mirror and experimental setup for free-space optical communication[J]. *Proceedings of SPIE*, 2009, **7199**: 71990.
- [56] Love G D. Wave-front correction and production of Zernike modes with a liquid-crystal spatial light modulator[J]. *Applied Optics*, 1997, **36**(7): 1517–1524.
- [57] Cai D M, Yao J, Jiang W H. Performance of liquid-crystal spatial light modulator using for wave-front correction[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(2): 285–291.  
蔡冬梅, 姚军, 姜文汉. 液晶空间光调制器用于波前校正的性能[J]. *光学学报*, 2009, **29**(2): 285–291.
- [58] Guo Y M, Zhang A A, Fan X L, *et al.* First on-sky demonstration of the piezoelectric adaptive secondary mirror[J]. *Optics Letters*, 2016, **41**(24): 5712–5715.
- [59] Vorontsov M A, Carhart G W, Ricklin J C. Adaptive phase-distortion correction based on parallel gradient-descent optimization[J]. *Optics Letters*, 1997, **22**(12): 907–909.
- [60] Yang H Z, Li X Y, Jiang W H. High resolution imaging of phase-distorted extended object using SPGD algorithm and deformable mirror[J]. *Proceedings of SPIE*, 2007, **6834**: 683411.
- [61] Booth M J, Neil M A, Juskaitis R, *et al.* Adaptive aberration correction in a confocal microscope[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2002, **99**(9): 5788–5792.
- [62] Wang J X, Bai F Z, Ning Y, *et al.* Wavefront response matrix for closed-loop adaptive optics system based on non-modulation pyramid wavefront sensor[J]. *Optics Communications*, 2012, **285**(12): 2814–2820.
- [63] Wang S Q, Wei K, Zheng W J, *et al.* First light on an adaptive optics system using a non-modulation pyramid wavefront sensor for a 1.8 m telescope[J]. *Chinese Optics Letters*, 2016, **14**(10): 100101.

# Overview of adaptive optics development

Jiang Wenhan<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Adaptive Optics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China;

<sup>2</sup>Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China



Principle of adaptive optics

**Overview:** Adaptive optics (AO) is the technology for correcting the dynamic optical wavefront errors. This article reviews the development process of AO in recent 50 years. Giving a development skeleton of AO is the purpose of this paper. The original ideas of Adaptive Optics were proposed by American astronomer H. W. Babcock in 1953, and Soviet astronomer V. P. Linnik in 1957. At that time, there were no technical basics for realizing the proposes. Until late of the 60th decade of 20th century ARPA of US initiated to support fundamental researches of AO, the first papers of AO were published in 1997. In the period of Strategy Defense Initiatives(SDI), since 1985 AO had its booming period, many innovations appeared, including: the theory of atmosphere turbulence and its correction, high resolution imaging of satellites, laser guide star, laser propagation through atmosphere and thermal blooming. From the 90th decade of 20th century, The applications of AO in different areas were expanded quickly. High resolution imaging of astronomical objects is firstly realized by the Come-On project of European Southern Observatory (ESO). Now AO becomes the standard configuration of large astronomical telescopes. Three giant optical telescopes of 30~50 meters are being constructed. In each of these projects, sophisticated AO systems with large scale wavefront correctors, wavefront sensors and constellation of laser guide stars are being developed. Ground based imaging of satellites is another important application of AO. The Air Force of US constructed two AO telescope with 3.6 meters mirror. In 1986 the first solar AO system was used for high resolution observation of the surface structure of the Sun. Correction of wavefront errors in large laser system such as Inertial Confinement Fusion (ICF) is another important application of AO. The first AO system used in ICF was realized in China in 1985. Since then, many AO systems were developed in ICF facilities in China and LLNL of US. The first AO system for civilian use was the retinal imaging of human eye in 1997 by Rochester University. The developing trends of AO are briefly reviewed in this paper, including expanding the correction field of AO system by Multi-layer Conjugation AO (MCAO) using constellation of laser guide stars, extreme AO for elimination the halo around the core of the corrected point spread function (PSF), miniaturization of AO system by using miniaturizing the wavefront correctors and sensors. In every section of the paper, the developments of AO in China, especially in Institute of Optics and Electronics (IOE), are also included. For each technical innovation, the first published paper of the innovator is cited as far as possible.

**Citation:** Jiang W H. Overview of adaptive optics development[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2018, 45(3): 170489

\* E-mail: adopse@ioe.ac.cn