

## 智能光学的概念及发展

王建立, 刘欣悦\*

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

**摘要:**智能光学是在主动光学和自适应光学基础上发展起来的新兴的概念。本文介绍了智能光学概念的提出和发展过程,并进一步明确和扩展了智能光学的概念和范畴。对智能光学的技术基础及其应用现状进行了总结和评述,主要包括动态光学调制技术、动态光学探测技术、智能光学系统等,涉及了天文、军事、空间、生物医学等领域中应用的望远镜、显微镜、激光器等光学系统和光学设备。最后,对智能光学的未来发展和应用前景提出了展望。

**关键词:**智能光学;主动光学;自适应光学;动态光学调制;动态光学探测

**中图分类号:**TH74; O439 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/CO.20130604.0437

## Concept and development of smart optics

WANG Jian-li, LIU Xin-yue\*

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,  
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Corresponding author, E-mail: sirliuxy@sina.com

**Abstract:** Smart optics is an emerging concept developed from conventional optics based on the active optics and adaptive optics. This paper introduces the evolution and development of smart optics and explains and extends its concept and scopes further. Then, it summarizes and comments the developing states and applications of the smart optics, which mainly includes the dynamic optical modulation, dynamic optical sensing, and smart optics systems, involving the telescopes, microscopes, lasers, etc. in the applications of astronomy, military, space, biology, medicine, etc.. Finally, the future outlooks of developments and applications of smart optics are given.

**Key words:** smart optics; active optics; adaptive optics; dynamic optical modulation; dynamic optical detection

## 1 引言

随着现代光学的应用领域不断向宏/微观尺度、高精度、灵活性、智能化发展,光学系统已经不再是严格意义上的静态系统,基于传统静态认识的技术手段难以适应现代光学的要求。近年来提出并发展起来的智能光学概念,为人们提供了一条从动态系统角度重新认识现代光学系统的技术途径。

与智能相机(Smart Camera)和智能手机(Smart Phone)等概念类似,智能光学(Smart Optics or Intelligent Optics)也是一个新兴概念。在主动光学(Active Optics)<sup>[1]</sup>和自适应光学(Adaptive Optics)<sup>[2]</sup>技术的基础上,Greenaway明确提出了智能光学的概念:“能够动态调整的光学系统、组件和技术”<sup>[3]</sup>。目前,智能光学的研究主要集中在美国和欧洲,国内还没有建立智能光学研究的明确概念和范畴。美国陆军研究实验室在马里兰大学设立了智能光学实验室,主要研究自适应光学技术在军事和国防等领域的应用;欧盟也在近期设立了智能光学系统的研究项目,联合多所大学和研究所开展望远镜、显微镜、激光器等光学系统中的智能光学技术及其在天文、空间、生物医学等领域中的应用<sup>[4,5]</sup>。

智能光学融合了精密加工、新材料、微电子、信息现代技术,实现了对传统光学的进一步发展。智能光学的内容主要涵盖主动光学和自适应

光学,而且与微纳光学、微电子学、光电子学、激光光学、信息光学等学科领域都互有交叉,相关领域中的新方法和新技术也不断促进智能光学发展。智能光学与其他学科领域的关系如图1所示。

通过对智能光学技术发展的总结和综合,进一步明确智能光学的概念:具有动态可调、可测、可控能力的光学系统、组件、技术,可以对光学特性进行动态调制(尤其指对局部光学特性的动态调制),并/或可以对光学特性进行动态探测和控制,能够有效提高光学系统的性能以及光学设计的灵活性。

智能光学还是一个不断发展变化的概念,最初智能光学主要包括了主动光学和自适应光学,一般利用反射光学组件实现波前相位的动态调制。其中,主动光学通常是指利用具有动态支撑机构的整体或拼接反射镜进行低速大幅度波前调制,自适应光学通常是指利用变形镜(Deformable Mirror, DM)等进行高速小幅度波前调制。此外,二者都需要利用波前探测器(Wavefront Sensor)和波前控制器(Wavefront Controller)实现动态波前探测和控制。

随着目前光学和光电子学等技术的发展,智能光学的概念和范畴可以进一步扩展,包括利用动态调整的折射光学组件、衍射光学组件、光电子学组件等对波前相位的动态调制、探测和控制,以及利用动态调整的光学组件对波前幅度、光强、光谱、偏振、频率等其他特性的动态调制、探测和控制。如利用数字微镜阵列(DMD)和液晶空间光调制器(LC-SLM)实现光强动态调制,利用液晶调制器实现相位、幅度、光谱、和偏振动态调制,以及利用声光调制器(AOM)和电光调制器(EOM)实现相位、幅度、光强、光谱、和频率动态调制等。

利用智能光学技术可以有效降低光学系统的设计难度以及研制成本和周期。对于某些传统光学设计和加工难以实现的光学系统,甚至是非常复杂的常规光学系统,采用智能光学技术也可以在保证性能的同时大大简化系统实现过程。智能光学技术可以广泛应用于光学系统中的发射、传输、探测、处理等多个方面,如望远镜、显微镜、激光器等,是提高系统性能和实现系统自动化和智能化的关键技术,在天文、军事、空间、生物医学等



图1 智能光学与其他学科领域关系

Fig. 1 Relationship between smart optics and other fields

领域中都具有广阔的应用前景。

目前,国内外对智能光学的研究工作集中在以下3个方面:动态光学调制技术、动态光学探测技术、智能光学系统。其中多数研究工作是围绕波前相位的动态调制、探测和控制,基本可以归入主动光学和自适应光学范畴;此外也出现了一些新的应用以及对其他光学特性的动态调制、探测和控制技术。下文分别按照上述3个方面,根据作者对各项技术的熟悉和了解程度,对智能光学技术和应用在国内外的进展情况进行介绍,并在最后做出总结和展望。

## 2 动态光学调制技术

通常波前相位畸变对光学系统性能影响最大,主动光学和自适应光学技术的主要目的也是实现对光学系统波前相位畸变的动态校正/补偿,因此目前对动态光学调制技术的研究主要集中在波前相位的动态调制。为了能够进一步提高光学系统性能,在某些情况下还需要同时实现对波前幅度畸变的动态校正/补偿(全光场动态校正/补偿)。

在投影显示等领域中主要利用光强的动态调制技术,而光谱、偏振、频率等其他特性的动态调制技术也得到越来越广泛的应用。下文将以波前动态调制为重点,分别介绍各种动态调制技术。

### 2.1 波前动态调制技术

实现波前动态调制的光学组件可称为波前调制器(Wavefront Modulator),通常用于波前相位调制,也可用于波前幅度调制,有些波前调制器还可同时实现相位和幅度调制。波前调制器一般采用反射镜加促动器阵列的结构形式来实现,按照整体镜面和拼接镜面可以分为连续和分立两种结构形式。目前,主动光学和自适应光学常用的促动器类型包括压力促动器、机电促动器、压电促动器、微机电促动器(MEMS)、以及其他类型的空间光调制器。

主动光学技术的用途单一,都是用于大口径反射式望远镜,因此,主动光学的波前调制器可以认为是具有动态支撑机构的望远镜主镜。主动光学实现低速大幅度波前调制需要较大支撑力,因

此动态支撑机构主要采用压力促动器和机电促动器两种类型,而且自身通常带有测量装置以实现闭环控制。其中机电支撑机构较为简单但产生的支撑力较小,通常用于较小口径的望远镜或与压力支撑机构结合用于较大口径的望远镜;压力支撑机构包括了液压支撑机构和气压支撑机构,在大口径望远镜中都得到了应用,目前多数采用液压支撑机构<sup>[6]</sup>。主动光学常用的动态支撑机构类型如表1所示。

表1 主动光学常用的动态支撑机构

Tab.1 Dynamic supporting mechanisms of active optics

主动光学	压力支撑机构	机电支撑机构
常用动态支撑机构	液压支撑机构 气压支撑机构	电机+配重块+杠杆 电机+滚珠丝杠+弹簧

自适应光学的波前调制器又可称为波前校正器(Wavefront Corrector),通常实现高速小幅度波前调制而且对精度要求很高。目前自适应光学常用的波前校正器包括压电变形镜、电磁变形镜、微机电变形镜、液晶空间光调制器等<sup>[7-9]</sup>。其中压电变形镜和电磁变形镜的应用较多,分别采用压电陶瓷促动器(PMN或PZT材料)和基于音圈电机的机电促动器;微机电变形镜基于微电子技术,促动器是通过半导体刻蚀工艺制造并且由静电驱动;液晶空间光调制器包括透射和反射两种类型,通常采用向列液晶材料通过改变局部折射率实现波前调制。自适应光学常用的波前校正器类型如表2所示。

表2 自适应光学常用的波前校正器类型

Tab.2 Types of wavefront correctors of adaptive optics

自适应光学常用波前校正器	
压电变形镜	层叠促动器压电变形镜 (连续式/分立式)
	双/单片促动器压电变形镜 (Bimorph/Unimorph)
电磁变形镜	微型电磁变形镜
	自适应望远镜次镜
微机电变形镜	连续式微机电变形镜
	分立式微机电变形镜
液晶空间光调制器	向列液晶空间光调制器

波前校正器的性能指标主要包括促动器单元数、调制幅度、响应速度、滞后等,其中促动器单元数和调制幅度决定了波前的空域拟合能力,响应速度决定了波前的时域拟合能力,滞后是动态波前控制的重要影响因素。上述波前校正器中,压电变形镜的优点是促动器可扩展到较多单元及响应速度较高,但调制幅度较小、存在滞后现象且成本较高。电磁变形镜最初以望远镜自适应次镜的形式出现,随着音圈电机的微型化成为独立的波前校正器。电磁变形镜的优点是调制幅度较大及没有滞后现象,但促动器单元数通常较少、响应速度较低且成本较高。微机电变形镜和液晶空间光调制器都是近年来出现且很有前景的新型波前校正器,微机电变形镜的响应速度更高、没有滞后现象而且成本很低,缺点是促动器单元数较少以及调制幅度较小;液晶空间光调制器的优点是促动器单元数很多、调制幅度较大、没有滞后而且成本较低,但是需要线偏振光而且光谱范围较小,响应速度也有待进一步提高。自适应光学常用波前校正器的主要优缺点比较如表3所示。

表3 自适应光学常用的波前校正器比较  
Tab.3 Comparison of wavefront correctors of adaptive optics

	优点	缺点
压电变形镜	促动器单元数较多 响应速度较高	调制幅度较小 存在滞后现象 成本较高
电磁变形镜	调制幅度较大 没有滞后现象	促动器单元数较少 响应速度较低 成本较高
微机电变形镜	响应速度高 没有滞后 成本低	促动器单元数较少 调制幅度较小
液晶空间光调制器	促动器单元数多 调制幅度较大 没有滞后 成本较低	需要线偏振光 光谱范围较小 响应速度较低

目前,自适应光学波前校正器的发展方向主要是高促动器密度、大调制幅度、以及集成化<sup>[10]</sup>。其中,提高促动器密度可以降低大规模波前校正器的实现难度,但是,同时也会降低调制幅度和/

或响应速度;提高调制幅度可以扩展波前校正器适用范围,但是也会影响响应速度等其他性能;集成化是指将多种功能集成在单一的波前校正器中,如可将倾斜镜和变形镜相结合同时实现倾斜和高阶像差校正功能,将波前相位和幅度校正功能集成到单一校正器等。

目前,能够提供自适应光学波前校正器的厂商主要包括法国 CILAS 和美国 Xinetics(压电变形镜),法国 ALPAO、意大利 Microgate 和 ADS(电磁变形镜),美国 BMC 和 IrisAO、荷兰 OKO 和 TNO(微机电变形镜),美国 BNS(液晶空间光调

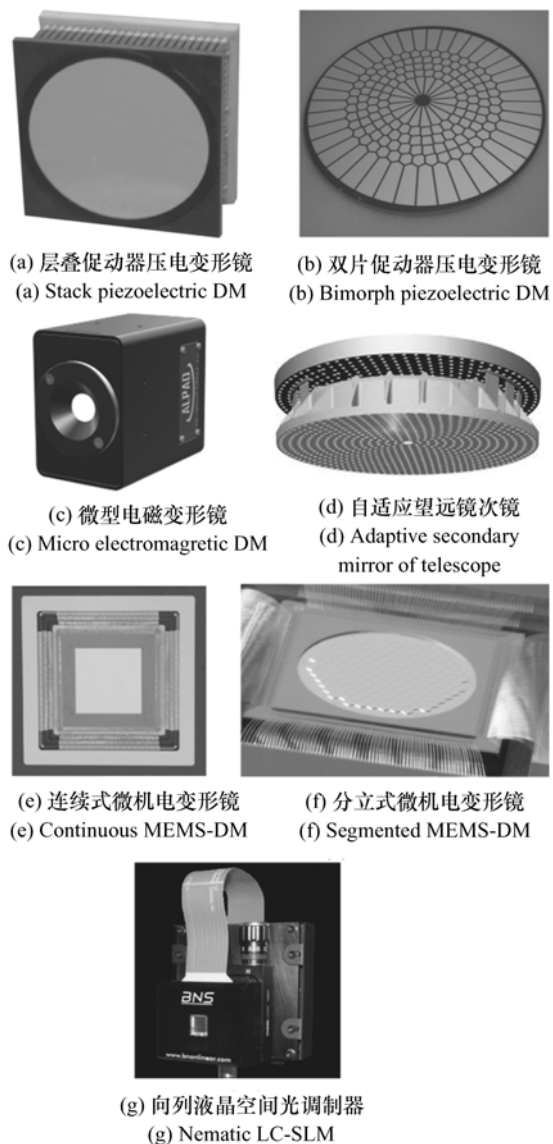


图2 自适应光学常用的波前校正器产品

Fig.2 Products of wavefront correctors of adaptive optics

制器)等,自适应光学常用的波前校正器产品如图2所示。

## 2.2 其他动态调制技术

光强动态调制可以利用空间光调制器,如数字微镜阵列以及液晶空间光调制器等,主要用于投影显示等领域的光学系统。上述调制器一般采用分立式结构,分立式波前调制器也可以用于光强调制。光强调制的液晶调制器可以采用透射或反射类型,除了向列液晶材料外还可以采用铁电等液晶材料。

光谱动态调制可利用液晶调谐滤波器(LCTF)和声光调谐滤波器(AOTF)等实现对光谱的动态滤波,在显微成像、遥感成像等领域的多光谱和超光谱光学系统中都有重要的应用。其中,液晶调谐滤波器的成像质量很高,但透过率和响应速度较低;声光调谐滤波器的响应速度快,但成像质量较低。

DMD光强调制器和LCTF光谱调制器如图3所示,除了光强和光谱动态调制以外,目前也出现了一些偏振和频率等特性动态调制的组件和应用。

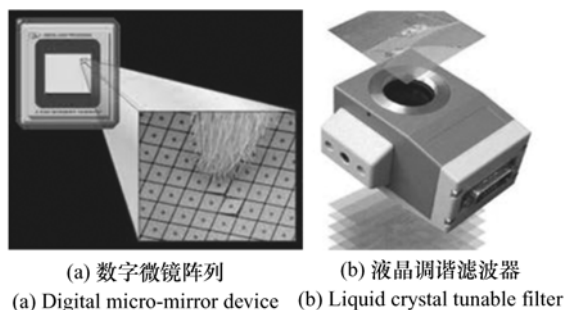


图3 光强和光谱动态调制器

Fig. 3 Dynamic modulators of optical intensity and spectrum

## 3 动态光学探测技术

利用动态探测的光学特性可以实现对光学调制的动态控制,波前相位和光强信息是目前动态探测的主要光学特性。主动光学和自适应光学通常利用波前相位信息实现波前畸变的动态校正/补偿,对于精度要求不高的应用也可利用光强信息实现对波前畸变的动态控制。波前和光强动态

探测的基础都是各种光电传感器,包括光电耦合器件(CCD)、互补金属氧化物半导体,CMOS、光电倍增管(PMT)、及雪崩二极管(APD)等。光电传感器可以直接探测光强信息,波前信息则是由光电传感器和其他光学器件构成的波前探测器(WFS)通过间接方式探测。

目前常用的波前探测器主要包括了夏克哈特曼波前探测器(Shack-Hartmann WFS)、横向剪切干涉仪(Lateral Shearing Interferometer)、角锥波前探测器(Pyramid WFS)、全息波前探测器(Holographic WFS)、相位提取(Phase Retrieval)、相位差异(Phase Diversity)等,这些波前探测器各具不同的特点,在主动光学和自适应光学等领域中都得到了应用。波前探测器按照波前探测位置可以分为光瞳面和焦面波前探测,按照波前重构方式可以分为区域和模式波前探测,按照波前重构过程可以分为线性和非线性波前探测,上述波前探测器的分类如表4所示。

表4 常用的波前探测器分类

Tab. 4 Classification of wavefront sensors

	探测位置	重构方式	重构过程
夏克哈特曼波前探测器	光瞳面	区域	线性
横向剪切干涉仪	光瞳面	区域	线性
角锥波前探测器	光瞳面	区域	线性
全息波前探测器	光瞳面	模式	线性
相位提取	焦面	区域/模式	非线性
相位差异	焦面	区域/模式	非线性

波前探测器的性能指标要包括探测精度、速度、分辨率、灵敏度、动态范围、光谱范围等。上述波前探测器中,夏克哈特曼波前探测器的探测动态范围和光谱范围较大而且速度较高,但探测精度、灵敏度和分辨率较低;横向剪切干涉仪的探测动态范围和光谱范围较大、精度和分辨率较高,但探测速度和灵敏度较低;角锥波前探测器的探测速度和灵敏度较高、光谱范围较大,但探测精度和分辨率较低、动态范围较小;全息波前探测器的探测速度和灵敏度高、计算量小而且对光强闪烁不敏感,但探测精度和分辨率较低、光谱范围较小;相位提取和相位差异的探测精度、灵敏度和分辨

率较高,但探测速度较低而且光谱范围较小,相位提取的探测动态范围要比相位差异大,而相位差异适于对扩展目标进行波前探测。目前常用的波前探测器的主要优缺点比较如表5所示。

表5 常用的波前探测器比较

Tab.5 Comparison of wavefront sensors

	优点	缺点
夏克哈特曼波前探测器	动态范围较大	分辨率较低
横向剪切干涉仪	光谱范围较大 速度较高	灵敏度较低 精度较低
角锥波前探测器	动态范围较大 光谱范围较大 分辨率较高 精度较高	灵敏度低 速度较低
全息波前探测器	光谱范围较大 灵敏度较高 速度较高	动态范围较小 分辨率较低 精度较低
相位提取	精度高 分辨率高 灵敏度较高 动态范围较大	速度低 光谱范围较小
相位差异	精度高 分辨率高 灵敏度较高 适于扩展目标	速度低 光谱范围较小 动态范围较小

### 3.1 光瞳面波前探测技术

光瞳面波前探测是指在光学系统光瞳面位置对波前信息进行动态探测,这是最常用的波前探测器类型,包括夏克哈特曼波前探测器、横向剪切干涉仪、角锥波前探测器、全息波前探测器等。

夏克哈特曼波前探测器是利用微透镜阵列替代哈特曼模板实现对传统哈特曼技术的改进<sup>[11]</sup>,广泛应用于主动光学、自适应光学、光学检测、激光质量测量等领域。夏克哈特曼波前探测器主要由微透镜阵列和光电传感器构成,通过探测局部波前斜率并进行波前重构实现波前探测。夏克哈特曼波前探测原理如图4所示。

横向剪切干涉仪的原理是将入射光束分为多个横向剪切光束后通过干涉测量实现波前探测,

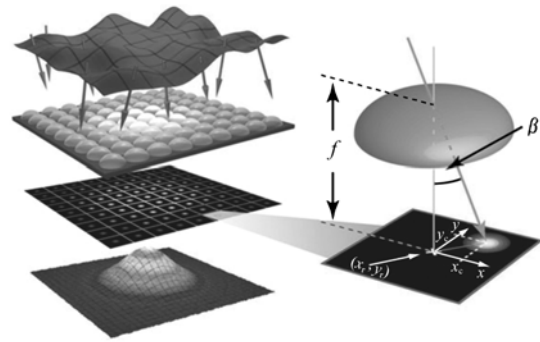


图4 夏克哈特曼波前探测的原理

Fig.4 Principle of Shack-Hartmann wavefront sensor

传统的横向剪切干涉仪通常采用两波干涉,而目前采用三波或四波干涉的多波横向剪切干涉仪可以更有效地实现波前探测<sup>[12-14]</sup>,在自适应光学、光学检测、激光质量测量等领域都有应用。多波横向剪切干涉仪主要由基于相位光栅的改进哈特曼模板和光电传感器构成,通过分析多波干涉模式进行波前探测,四波横向剪切干涉仪的改进哈特曼模板如图5所示。

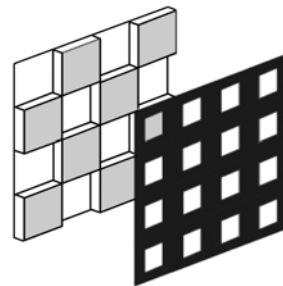


图5 四波横向剪切干涉仪的改进哈特曼模板结构

Fig.5 Structure of modified Hartmann mask of quadric-wave lateral shearing interferometer

角锥波前探测器的原理可以看作是夏克哈特曼的逆向过程,利用角锥将焦面图像转换为多个光瞳面图像进行波前探测<sup>[15-17]</sup>。与夏克哈特曼相比,角锥波前探测器的灵敏度更高,适于弱光条件下的波前探测如望远镜自适应光学。角锥波前探测器主要由角锥以及光电传感器构成,目前通常采用的四棱锥波前探测原理如图6所示。

与前3种区域波前探测器不同,全息波前探测器是一种模式波前探测器,利用相位全息图将入射光束分解为多个模式(泽尼克模式)实现波

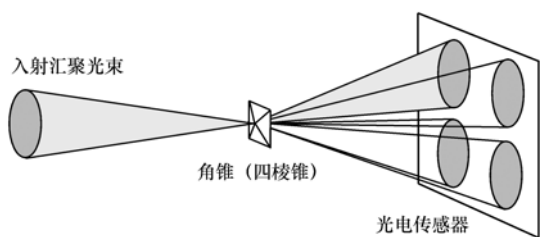


图6 四棱锥波前探测的原理

Fig. 6 Principle of rectangular pyramid wavefront sensor

前探测<sup>[18-20]</sup>。全息波前探测器的计算量很小,适于高速探测应用。目前全息波前探测器只适于单色光,通常在激光系统中应用。全息波前传感器主要由计算全息模板以及光电传感器阵列构成,每个光电传感器分别探测独立的模式,然后进行波前重构。全息波前探测的原理如图7所示。

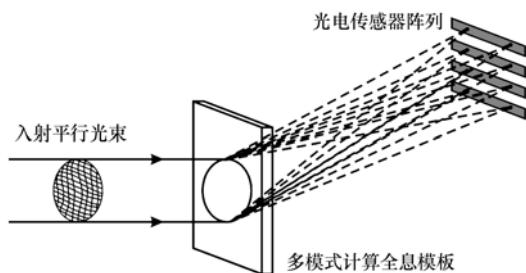


图7 全息波前探测的原理

Fig. 7 Principle of holographic wavefront sensor

### 3.2 焦面波前探测技术

焦面波前探测是指在光学系统焦面位置对波前信息进行动态探测,主要包括相位提取和相位差异等。相位提取和相位差异都是基于光学系统的焦面图像,采用区域或模式的方法通过非线性优化实现波前重构,而且重构的波前信息还可用于图像恢复<sup>[21-23]</sup>。相位提取与相位差异的不同之处在于相位提取仅能对点目标进行波前探测,而相位差异还适用于扩展目标的波前探测。

相位提取可以利用在焦图像进行波前探测,也可同时利用在焦和离焦图像进行波前探测,后者又称为相位差异相位提取,具有更高的精度以及更大的动态范围。相位差异通常利用在焦和离焦图像的差异进行波前探测,也可利用其他像差或其他特性的差异进行波前探测,后者可以称为

广义相位差异。由于计算量大、探测速度低,相位提取和相位差异通常用于图像恢复和光学检测等领域,但随着计算技术的发展,目前也应用于自适应光学等领域中的高速探测。基于离焦差异的相位提取和相位差异原理如图8所示。

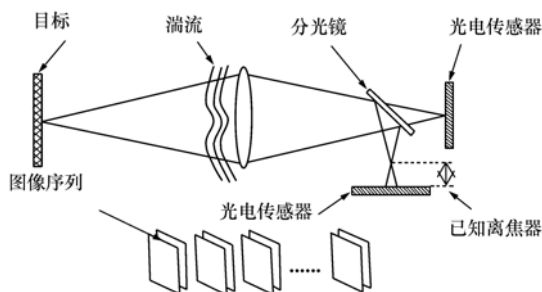


图8 基于离焦差异的相位提取和相位差异原理

Fig. 8 Principle of focus-diverse phase retrieval and diversity

## 4 智能光学系统

智能光学系统可以定义为具有动态光学调制和/或动态光学探测的光学组件,并能够对光学特性进行动态控制的光学系统。智能光学系统的动态控制可以采用闭环和开环两种控制方式,其中闭环控制系统由调制器、探测器和控制器共同构成,控制器根据探测器的探测信息对调制器实施反馈控制。开环控制系统可以包括探测器,但是控制器采用开环控制法则,也可以不包括探测器而是由控制器根据其他法则对调制器实施控制。

主动光学系统由于对控制速度要求很低,通常采用开环控制方式,但动态支撑机构的促动器带有测量装置,可以实现自身的闭环控制。自适应光学系统对控制的实时性要求很高,为了抑制误差通常采用闭环控制方式,而具有无滞后波前校正器的自适应光学系统也可采用开环控制方式。在光强调制和光谱调制等智能光学系统中,由于不需要对光强及光谱范围等特性进行动态探测,通常不包括探测器直接实施开环控制。

### 4.1 主动光学系统

主动光学系统均用于大口径反射式望远镜中,实现对望远镜主镜波前畸变的校正/补偿,因此主动光学系统需要根据望远镜主镜的材料和形

状等特性进行设计和定制。按照望远镜主镜的结构形式,主动光学系统可以分为整体镜面和拼接镜面两种类型,不同类型主动光学系统的动态支撑机构以及波前探测器和控制器都存在较大差别。

目前,主动光学已经成为大口径望远镜的必备技术,地基大口径望远镜普遍采用主动光学技术克服自身和外部环境因素对主镜面形的影响。随着口径的增大,天基望远镜也逐步采用主动光学技术,如詹姆斯韦伯空间望远镜(JWST)采用了复杂的拼接镜面主动光学系统<sup>[24]</sup>,其模型如图9所示。



图9 詹姆斯韦伯空间望远镜的拼接镜面主动光学系统

Fig. 9 Active optics system of segmented mirror of JWST

#### 4.2 自适应光学系统

自适应光学系统通常利用波前探测器实时探测的波前信息对波前校正器进行控制。但在某些应用场合如强湍流大气环境和显微镜系统中,往往难以对波前信息进行有效探测。无波前探测自

适应光学技术<sup>[25-26]</sup>可以利用从图像中提取的度量信息对波前校正器进行闭环控制,而随机并行梯度下降(SPGD)等技术<sup>[27-28]</sup>则可利用接收光强能量的变化信息实现闭环校正。由于图像度量信息以及能量变化信息与波前没有直接对应关系,这些方法一般采用非线性优化技术进行波前重构。

自适应光学系统最初用于地基望远镜成像的大气湍流补偿,对快速变化的波前畸变进行实时校正。目前自适应光学已经成为补偿大气湍流波前畸变的标准技术,在地基望远镜中普遍应用,并逐渐扩展到其他领域。图10为望远镜成像应用的自适应光学系统功能结构。

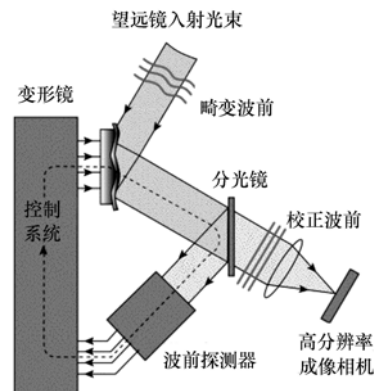


图10 望远镜自适应光学系统

Fig. 10 Adaptive optics system for telescopes

对于航空光学系统,自适应光学可以与共形光学结合实现湍流补偿<sup>[29-31]</sup>。图11为用于某航空光学系统气动湍流补偿的自适应光学系统<sup>[32]</sup>。

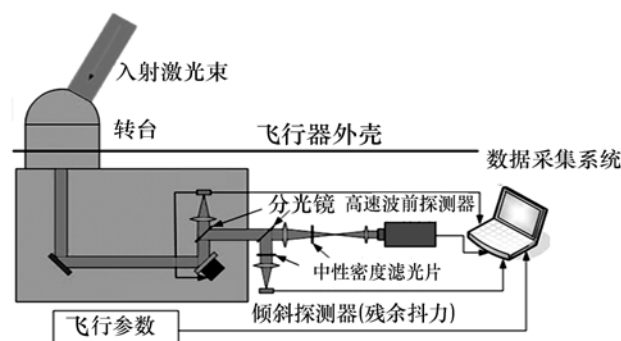


图11 航空光学自适应光学系统

Fig. 11 Adaptive optics system for aero optical system

在光学显微镜系统中,自适应光学可以对样品引起的波前畸变进行校正,实现对样本的清晰成像<sup>[33-36]</sup>。图 12 为某配备自适应光学系统的显微镜光学系统<sup>[37]</sup>。

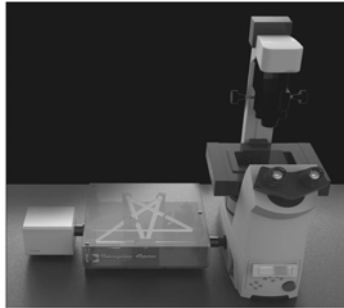


图 12 配备自适应光学系统的显微镜

Fig. 12 Microscope with adaptive optics system

在用于眼底成像的光学系统中,自适应光学



图 13 配备自适应光学系统的眼底相机

Fig. 13 Retinal camera with adaptive optics system

可以对眼睛自身的波前畸变进行校正得到清晰的视网膜图像<sup>[38-40]</sup>。图 13 为某配备自适应光学系统的眼底相机光学系统<sup>[41-42]</sup>。

在高功率激光系统中,自适应光学可以对输出光束整形以补偿激光器自身的波前畸变,还可以对发射光束传播路径中大气湍流引起的波前畸变进行预补偿,使光束能量集中从而提高系统性能<sup>[43-46]</sup>。图 14 为用于补偿激光传播路径中大气湍流的自适应光束控制系统<sup>[47]</sup>。

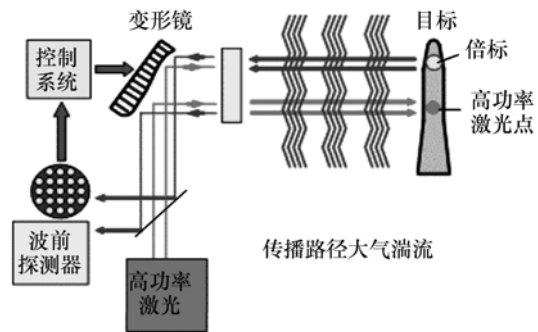


图 14 通过大气湍流激光传播的自适应光束控制系统

Fig. 14 Adaptive beam control system for laser propagation through turbulence

在自由空间激光通信的收发光学系统中,自适应光学可以对传播路径中大气湍流引起的波前畸变进行预补偿,使光束能量集中从而降低误码率<sup>[48-51]</sup>。图 15 为用于激光通信的某自适应光学系统<sup>[52]</sup>。

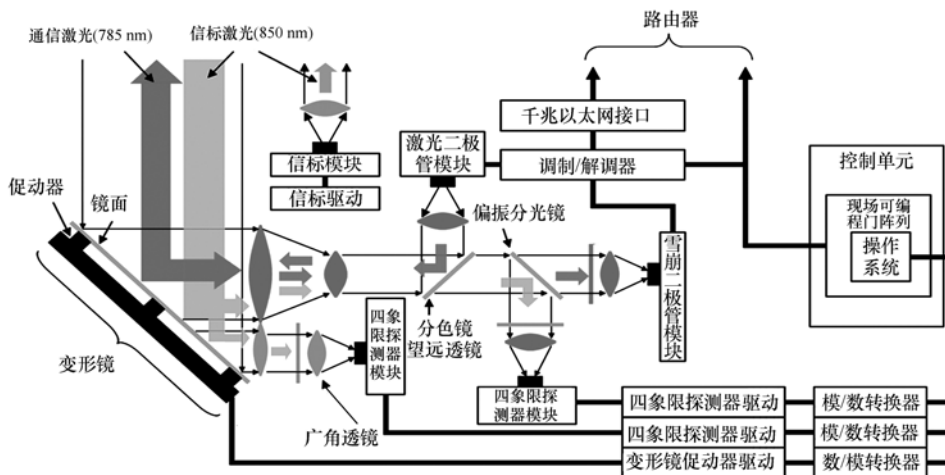


图 15 用于激光通信的自适应光学系统

Fig. 15 Adaptive optics system for laser communications

## 5 结束语

智能光学是在主动光学和自适应光学基础上发展起来的一个新兴的概念,它提供了一条从动态系统角度认识现代光学系统的技术途径。智能光学技术可使光学系统具有动态可调、可测、可控的能力,从而能够有效提高系统的性能以及设计

的灵活性。目前,对智能光学概念尚缺乏统一明确的认识,智能光学的动态调制和动态探测技术还在继续发展并与其他领域的技术融合,智能光学系统的应用范围仍在逐渐扩展,其新应用也不断出现。根据目前的发展趋势,我们认为智能光学技术在现代光学系统中必将起到越来越重要的作用,而且在更多的领域中也将会得到越来越广泛的应用。

### 参考文献:

- [1] NOETHE L. Active optics in modern large optical telescopes[J]. *Progress in Optics*, 2002, 43: 1-69.
- [2] TYSON R K. Principles of Adaptive Optics[M]. 3rd ed. Boca Raton: CRC Press, 2011.
- [3] WHYNDHAM M. Space science meets smart optics[J]. *Astronomy & Geophysics*, 2003, 44(3): 31-32.
- [4] WELCH S, GREENAWAY A, DOEL P, et al. Smart optics in astronomy and space[J]. *Astronomy & Geophysics*, 2003, 44(1): 26-29.
- [5] VERHAEGEN M. Smart optics programme [EB/OL]. [2013-7-19]. <http://www.dsc.tudelft.nl/~mverhaegen/n4ci/sos.htm>.
- [6] 张景旭. 地基大口径望远镜系统结构技术综述[J]. *中国光学*, 2012, 5(4): 327-336.  
ZHANG J X. Overview of structure technologies of large aperture ground-based telescopes[J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(4): 327-336. (in Chinese)
- [7] MADEC P Y. Overview of deformable mirror technologies for adaptive optics and astronomy[J]. *SPIE*, 2012, 8447: 844705.
- [8] 林旭东, 薛陈, 刘欣悦, 等. 自适应光学波前校正器技术发展现状[J]. *中国光学*, 2012, 5(4): 337-351.  
LIN X D, XUE CH, LIU X Y, et al. Current status and research development of wavefront correctors for adaptive optics[J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(4): 337-351. (in Chinese)
- [9] 曹召良, 李小平, 宣丽, 等. 液晶自适应光学的研究进展[J]. *中国光学*, 2012, 5(1): 12-19.  
CAO ZH L, LI X P, XUAN L, et al. Recent progress in liquid crystal adaptive optical technologies[J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(1): 12-19. (in Chinese)
- [10] WIRTH A, CAVACO J, BRUNO T, et al. Deformable mirror technologies at AOA Xinetics[J]. *SPIE*, 2013, 8780: 87800M.
- [11] PLATT B C, SHACK R. History and principles of Shack-Hartmann wavefront sensing[J]. *J. Refractive Surgery*, 2001, 17: S573-S577.
- [12] PRIMOT J, SOGNO L. Achromatic three-wave(or more) lateral shearing interferometer[J]. *J. Optical Society of America A*, 1995, 12(12): 2679-2685.
- [13] PRIMOT J, GUERINEAU N. Extended Hartmann test based on the pseudoguiding property of a Hartmann mask completed by a phase chessboard[J]. *Appl. Optics*, 2000, 39(31): 5715-5720.
- [14] VELGHE S, PRIMOT J, GUERINEAU N, et al. Wave-front reconstruction from multidirectional phase derivatives generated by multilateral shearing interferometers[J]. *Opt. Lett.*, 2005, 30(3): 245-247.
- [15] RAGAZZONI R. Pupil plane wavefront sensing with an oscillating prism[J]. *J. Mod. n Opt.*, 1996, 43(2): 289-293.
- [16] VERINAUD C. On the nature of the measurements provided by a pyramid wave-front sensor[J]. *Opt. Commun.*, 2004, 233(1-3): 27-38.
- [17] CHEW T Y, CLARE R M, LANE R G. A comparison of the Shack-Hartmann and pyramid wavefront sensors[J]. *Opt. Commun.*, 2006, 268(2): 189-195.
- [18] ANDERSEN G, REIBEL R. Holographic wavefront sensor[J]. *SPIE*, 2005, 5894: 589400.

- [19] GHEBREMICHAEL F, ANDERSEN G P, GURLEY K S. Holography-based wavefront sensing[J]. *Appl. Optics*, 2008, 47(4): A62-A69.
- [20] ANDERSEN G P, DUSSAN L, GHEBREMICHAEL F, *et al.*. Holographic wavefront sensor[J]. *Opt. Eng.*, 2009, 48(8): 085801.
- [21] GONSALVES R A. Phase retrieval and diversity in adaptive optics[J]. *Opt. Eng.*, 1982, 21(5): 215829.
- [22] FIENUP J R. Phase retrieval algorithms; a comparison[J]. *Appl. Optics*, 1982, 21(15): 2758-2769.
- [23] PAXMAN R G, SCHULZ T J, FIENUP J R. Joint estimation of object and aberrations by using phase diversity[J]. *J. Optical Society of America A*, 1992, 9(7): 1072-1085.
- [24] LIGHTSEY P A, CHANEY D, GALLAGHER B, *et al.*. Optical performance for the actively controlled James Webb Space Telescope[J]. *SPIE*, 2010, 7731: 77310B.
- [25] BOOTH M. Wave front sensor-less adaptive optics; a modal-based approach using sphere packing[J]. *Opt. Express*, 2006, 14(4): 1339-1352.
- [26] HUANG L H, RAO C H. Wavefront sensorless adaptive optics; a general modal based approach[J]. *Optics Express*, 2011, 19(1): 371-379.
- [27] VORONTSOV M A, CARHART G W, RICKLIN J C. Adaptive phase-distortion correction based on parallel gradient-descent optimization[J]. *Opt. Lett.*, 1997, 22(12): 907-909.
- [28] VORONTSOV M A, SIVOKON V P. Stochastic parallel-gradient-descent technique for high-resolution wave-front phase-distortion correction[J]. *J. Optical Society of America A*, 1998, 15(10): 2745-2758.
- [29] NIGHTINGALE A M, GORDEYEV S, JUMPER E J, *et al.*. Regularizing shear layer for adaptive optics control application[C]//Proceedings of the 36th AIAA Plasmadynamics and Lasers Conference, Jun 6-9, 2005, Toronto, Canada, 2005.
- [30] TESCH J, GIBSON J S. Optimal and adaptive correction of aero-optical wavefronts in an adaptive optics experiment[J]. *SPIE*, 2011, 8165: 816502.
- [31] TESCH J, GIBSON J S, GORDEYEV S, *et al.*. Identification, prediction and control of aero optical wavefronts in laser beam propagation[C]. Proceedings of the 41st AIAA Plasmadynamics and Lasers Conference, Jun 27-30, 2011, Honolulu, USA: AIAA, 2011.
- [32] JUMPER E J, ZENK M A, GORDEYEV S, *et al.*. Airborne aero-optics laboratory[J]. *Opt. Eng.*, 2013, 52(7): 071408.
- [33] ALBERT O, SHERMAN L, MOUROU G, *et al.*. Smart microscope; an adaptive optics learning system for aberration correction in multiphoton confocal microscopy[J]. *Opt. Lett.*, 2000, 25(1): 52-54.
- [34] BOOTH M J. Adaptive optics in microscopy[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 2007, 365(1861): 2829-2843.
- [35] DEBARRE D, BOTCHERBY E J, BOOTH M J, *et al.*. Adaptive optics for structured illumination microscopy[J]. *Opt. Express*, 2008, 16(13): 9290-9305.
- [36] DEBARRE D, BOTCHERBY E J, WATANABE T, *et al.*. Image-based adaptive optics for two-photon microscopy[J]. *Opt. Lett.*, 2009, 34(16): 2495-2497.
- [37] ANDILLA J, LEVECQ X. MICAQ: first universal all-in-the-box adaptive optics plug in accessory for stand high resolution microscopy[J]. *SPIE*, 2010, 7568: 75680U.
- [38] LIANG J, WILLIAMS D R, MILLER D T. Supernormal vision and high-resolution retinal imaging through adaptive optics[J]. *J. Optical Society of America A*, 1997, 14(11): 2884-2892.
- [39] AUSTIN R, FERNANDO R-B, WILLIAM J D III, *et al.*. Adaptive optics scanning laser ophthalmoscopy[J]. *Opt. Express*, 10(9): 405-412.
- [40] ZAWADZKI R J, JONES S M, OLIVER S S, *et al.*. Adaptive-optics optical coherence tomography for high-resolution and high-speed 3D retinal in vivo imaging[J]. *Opt. Express*, 2005, 13(21): 8532-8546.
- [41] VIARD C, NAKASHIMA K, LAMORY B, *et al.*. Imaging microscopic structure in pathological retinas using a flood-illumination adaptive optics retinal camera[J]. *SPIE*, 2011, 7885: 788509.
- [42] SAHIN B, LAMORY B, LEVECQ X, *et al.*. Adaptive optics with pupil tracking for high resolution retinal imaging[J].

- Biomed. Opt. Express*,2012,3(2):225-239.
- [43] KUDRYASHOV A V,SAMARKIN V V. Control of high power CO<sub>2</sub> laser beam by adaptive optical element[J]. *Opt. Commun.* ,1995,118(3-4):317-322.
- [44] ARANCIBIA N O P,CHEN N,GIBSON J S,*et al.* . Adaptive control of jitter in laser beam pointing and tracking[J]. *SPIE*,2006,6304:63041G.
- [45] BAHK S-W,FESS E,KRUSCHWITZ B E,*et al.* . A high resolution, adaptive beam-shaping system for high power lasers [J]. *Opt. Express*,2010,18(9):9151-9163.
- [46] 赵建川,郭汝海,孙涛. 舰载激光武器的发展历程及趋势分析[J]. *中国光学*,2013,6(2):151-155.  
ZHAO J C,GUO R H,SUN T. Development history and trend analysis of shipborne laser weapons[J]. *Chinese Optics*, 2013,6(2):151-155. (in Chinese)
- [47] LIU Y-T,GIBSON J S. Adaptive control in adaptive optics for directed energy systems[J]. *Opt. Eng.* ,2007,46(4): 046601.
- [48] TYSON R K. Adaptive optics and ground-to-space laser communications[J]. *Appl. Optics*,1996,35(19):3640-3646.
- [49] TING C,VOELZ D G,GILES M K. Laser satellite communications with adaptive optics[J]. *SPIE*,2005,5892:589213.
- [50] MAJUMDAR A K,RICKLIN J C. *Free-space Laser Communications:Principles and Advances* [M]. New York:Springer Press,2008.
- [51] 付强,姜会林,王晓曼,等. 空间激光通信研究现状及发展趋势[J]. *中国光学*,2012,5(2):116-125.  
FU Q,JIANG H L,WANG X M,*et al.* . Research status and development trend of space laser communication[J]. *Chinese Optics*,2012,5(2):116-125. (in Chinese)
- [52] URABE H,HARUYAMA S,SHOGENJI T,*et al.* . High data rate ground-to-train free-space optical communication system [J]. *Opt. Eng.* ,2012,51(3):031204.

#### 作者简介:



王建立(1971—),男,山东曲阜人,博士,研究员,博士生导师,2002年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事空间目标探测技术、地基高分辨率成像光电望远镜总体技术等方面的研究。E-mail: wangjianli@ciomp.ac.cn



刘欣悦(1973—),男,辽宁大连人,博士,副研究员,2006年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事光学成像技术及图像处理分析方面的研究。E-mail: sirliuxy@sina.com