自适应光学技术与产品指南（第 5 版）

Technical & Product Guide to Adaptive Optics（5nd Edition）

灵动智能光学（杭州）有限公司

Inspiration Optics Co., Ltd.

浙江省杭州市钱塘综合保税区钱诚创新中心 4 幢

更新日志：

- 2025 年 3 月，第 5 版更新如下：
  1. 更新了常用光学术语与常见问题回答；
  2. 调整了自研产品内容；
  3. 增加了自研产品案例说明；
  4. 更新了最新论文动态；

- 2024 年 2 月，第 4 版更新如下：
  1. 增加了代理品牌 ALPAO 和 Dynamin Optics 产品的中文板块；
  2. 调整了目录与章节的先后顺序；

- 2023 年 1 月，第 3 版更新如下：
  1. 增加了自研产品的板块；
  2. 增加了推荐产品 2（96 通道微机械变形镜）；
  3. 更新最新论文动态；

- 2022 年 1 月，第 2 版更新如下：
  1. 增加了 AO 设计与测试指南模块资料；
  2. 增加了常见问题回答部分内容；
  3. 调整了目录与章节的先后顺序；

- 2021 年 10 月，第 1 版。

版本号：第 5 版，2026 年 3 月

版权所有：灵动智能光学（杭州）有限公司

注：本手册技术内容为本公司技术团队编写及翻译，产品资料内容来源于本公司所代理国内外公司的产品信息。

地　址：浙江省杭州市钱塘综合保税区钱诚创新中心 4 幢

邮　箱：info@inspiroptics.com

网　站：www.inspiroptics.com

电　话：152 5716 7514

每个人眼中都闪烁着自适应的光芒！

目　录

一、公司简介 1
二、自适应光学背景知识 4
1. 星星真的会眨眼睛吗？ 4
2. 什么是自适应光学？ 7
三、自适应光学常用术语 11
1. 一般光学术语（General terms on optics） 11
2. 变形镜相关术语（Terms on deformable mirrors） 15
3. 波前传感器相关术语（Terms on wavefront sensors） 19
4. 自适应光学系统相关术语（Terms on closed-loop system） 21
四、自适应光学系统设计 23
1. Phase Conjugation （相位共轭） 23
2. FrontSurfer in the AO mode（用 FrontSurfer 软件进行 AO 闭环校正） 25
3. Breadboard system （面包板系统） 34
五、光学测试平台 36
1. Testing of transmission optics （透射光学器件测试） 37
2. Testing of reflective optics （反射光学器件测试） 38
3. Testing of micro lenses （微透镜测试） 39
4. Optical conjugation （光学共轭） 41
六、自研产品及应用案例 46
1. 压电变形镜 47
2. 高速 SH 波前传感器 48
3. 自适应光学系统闭环软件 49
4. 大气湍流模拟系统 50
5. 嵌入式自适应光学系统 52
6. 应用案例 53
七、荷兰 OKO 公司 56
1. 微机械薄膜变形镜(MMDM) 58
2. 压电变形镜(PDM) 63
3. 波前传感器 67
4. 波前分析和控制软件 71
5. 自适应光学系统 73
八、法国 ALPAO 公司 74
1. 变形镜（DM） 76
2. 可变形模态反射镜（DMM） 82
3. 波前传感器（SHWFS） 84
4. 自适应系统套件 89
5. 大气湍流补偿套件（RTC） 94
九、意大利 DO 公司 100
1. 自适应变形透镜 102
2. 变形反射镜 106
3. 夏克哈特曼波前传感器 107

4. PHOTONLOOP（波前分析与控制软件） 109
5. PZT mini 控制器（驱动程序） 110
6. 可调焦透镜 111
7. 意大利 Dynamic Optic 产品的应用 112
十、常见问题回答 115
1. 关于公司自研业务 115
2. 关于公司代理业务 118
3. 自适应光学一般问题 120
4. 关于荷兰 OKO 公司的 AO 产品 123
十一、文献资料 130
1. 使用 OKO 自适应光学器件的论文 130
2. 最新动态 133

一、公司简介

灵动智能光学（杭州）有限公司成立于 2021 年，位于浙江省杭州市钱塘综合保税区钱诚创新中心 4 幢，是一家专门潜心于自适应光学（Adaptive Optics）领域创新与发明的科技型企业。

公司主营业务包括：自适应光学（Adaptive Optics）相关产品的自主研发、销售与技术服务。

1、自研产品：

- 压电堆栈变形镜：高精度校正、快速响应、高可靠性、易于集成、接受定制；
- 波前传感器：高速、大幅面 Shack-Hartmann 波前传感器；
- 自适应光学闭环控制软件：功能完善、可视化程度高、可集成至用户系统；
- 大气湍流模拟系统：热气扰动型大气湍流模拟系统、液晶扰动型大气湍流模拟系统；
- 嵌入式自适应光学系统：实时校正光路畸变，提升图像清晰度。

公司自研产品——压电堆栈变形镜，该产品具有大变形量、高响应速度、高稳定性的特点，可用于生物显微成像、视网膜成像、天文望远镜、激光束整形等众多领域。

主要服务包括：

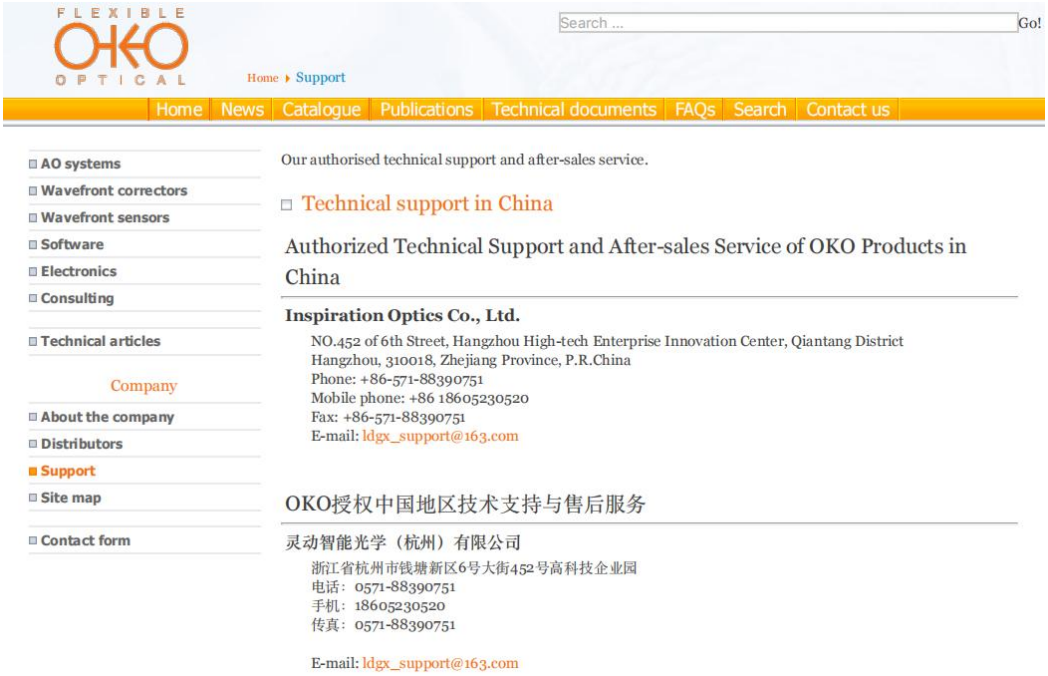
- 自适应光学器件开发；
- 自适应光学系统设计、AO 解决方案、器件选型；
- AO 产品二次开发、合作科研、联合项目申报。

2、代理产品：

- 荷兰 OKO 公司产品：MEMS 变形镜、压电变形镜、波前传感器、波前分析和控制软件、全套闭环自适应光学系统等；
- 意大利 Dynamic Optics 公司产品：自适应变形透镜、变形反射镜、波前传感器、波前分析和控制软件、全套闭环自适应光学系统等；
- 法国 ALPAO 公司产品：高速薄膜变形镜高速波前传感器、实时波前分析和控制系统、全套闭环自适应光学系统等。
- 我们不仅销售产品，而且提供技术服务！

我们的特点：技术+国际化

- **荷兰 OKO 国内首家“4S”技术中心**



2021 年，荷兰 OKO 公司正式授权灵动智能光学作为 OKO 产品在国内的技术支持和售后服务中心，这是他们第一次在国内设立这样的机构。我们可以提供“售前-售中-售后”全流程的服务与合作研发（类似于“OKO 在国内的 4S 店”）。

四大优势：

(1) 独立自主的研发能力，技术团队包含软件、机械、光学、电子等各类工程师，从设计、开发到测试，每个环节都有专业的团队成员负责。

(2) 专业的技术团队，可以根据需求进行自适应光学、二次开发，以及合作科研项目。

(3) 为荷兰 OKO、意大利 Dynamic Optics、法国 ALPAO 提供中国地区的技术支持和售后服务，可以协助进行定制产品的设计、采购和技术支持与售后服务。

(4) 跟踪整个采购流程以及器件安装和光路搭建、调试。

使用过程中有任何技术问题和产品问题都可以随时联系我们，我们会尽力解决。

特色服务：

(1) 只要是荷兰 OKO 公司生产的自适应光学产品，不论您什么时候、从哪个渠道购买，我们都会提供技术支持和售后服务。您那里要是有 OKO 的产品坏掉的或者不好用的，可以随时联系我们。

(2) 即使不是 OKO 公司的产品，我们也会在能力范围内提供技术咨询和技术支持。

(3) 设计：我们可以根据您的需求协助进行自适应光学系统设计，提供 AO 解决方案和器件选型。

(4) 采购：我们会跟踪整个采购流程，技术向您反馈采购进度和商务、产品相关信息。

(5) 安装：我们会负责自适应光学器件安装、光路搭建、光路校准、软硬件调试等一系列工作，确保 AO 系统正常运行。

(6) 使用：您在使用过程中遇到任何技术和产品问题都可以随时联系我们，我们会尽力解决。

(7) 产品定制：我们可以协助您进行定制产品设计，将定制要求反馈给荷兰 OKO 公司总部，并负责定制产品的采购、技术支持和售后服务等。

(8) 合作科研：我们有专业的技术团队，可以根据您的要求进行自适应光学产品二次开发、合作科研、合作项目申报等。

二、自适应光学背景知识

（Background on Adaptive Optics）

本文简单介绍自适应光学发展相关历史背景及一些基础知识，以助于科研人员及对此感兴趣的读者更全面了解这一技术。

如有问题、意见或建议，欢迎随时和我们联系！

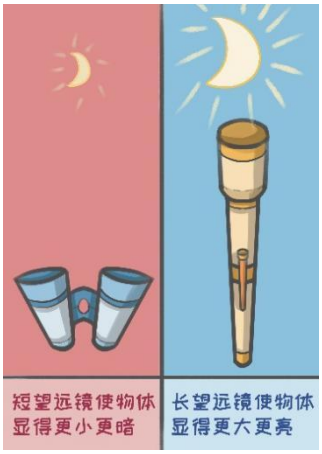
联系方式：info@inspiroptics.com，152 5716 7514（微信同号）

1. 星星真的会眨眼睛吗？

璀璨星空，繁星点点，一闪一闪眨着眼睛，好一幅诗情画意的场景！童谣唱曰：一闪一闪亮晶晶，满天都是小星星……

但你可曾想过：为什么星星会眨眼睛？真的是因为那颗星星自己在闪烁吗？

其实，早在 18 世纪，英国物理学家牛顿（Isaac Newton，对，就是那个牛顿）就对此进行了解释，他在《光学》一书中写到：“即使望远镜制造理论最终能够完全付诸实践，也仍会存在望远镜无法突破的特定界限。这是因为，我们仰望星体所透过的大气总是处于抖动状态中，这一点可以由高塔投影的颤动和恒星的闪烁看出……与短望远镜相比，长望远镜会使物体显得更亮也更大，但是它们不能消除大气抖动所引起的光线混乱。”





牛顿这段话给“星光闪烁”提供了答案：其实是大气的抖动引起了光线“混乱”，最终导致远处物体的图像发生颤动和闪烁；而且，即便是用长焦望远镜也无法克服这个现象。那么，为什么会这样呢？

其主要原因在于：大气并非真空，会对光线产生折射，而且不同位置的折射率也会随着温度、湿度、密度等参数发生变化。例如：在山顶和山脚、海岛和高原、白天和夜晚、夏天和冬天，大气的折射率就很不一样。所以，到达地面的星光并非沿直线传播，而是拐弯过来的（想想水里的筷子会变弯）。星星上某一点发出的光线，原本经过望远镜后要在图像上汇聚成同一个点的，但是因为每条光线受到大气干扰的程度不同，最后就无法汇聚到一点了，

图像就变得模糊了。而且，在风吹的作用下，大气的折射率无时无刻不在发生动态变化，所以星星看起来就一闪一闪的。





当然，这样飘忽场景并非星光独有，回想一下：在夏天烈日暴晒下的马路表面、透过跑道上飞机发动机喷出的尾流、透过煤炉上方那团热空气、水面倒影，你是不是也曾看到远处的物体在飘动？其实道理都是一样的！





诗意归诗意，研究归研究。既然图像模糊和闪烁是大气扰动引起的，那么怎么才能消除大气扰动的影响，怎么才能看到清晰的图像呢？

最直接的方法是：把望远镜架到太空中，不经过地球表面的大气，这样不就可以避开大气湍流的影响吗？1946 年，天文学家莱曼·斯皮策（Lyman Spitzer, Jr.）提出在太空中建造望远镜进行天文观测。1990 年，哈勃太空望远镜成功上天，成为首台在太空中进行天文观测的望远镜，并拍到了很多酷炫的太空照片，运行至今。



左：哈勃望远镜的示意图；右：哈勃望远镜拍到的星空图像

（图片来自 https://esahubble.org/）

但是，太空望远镜毕竟离我们太过遥远！全世界又能造几台太空望远镜呢？能不能在地面上解决这个问题呢？

有的，那就是自适应光学！Adaptive Optics！

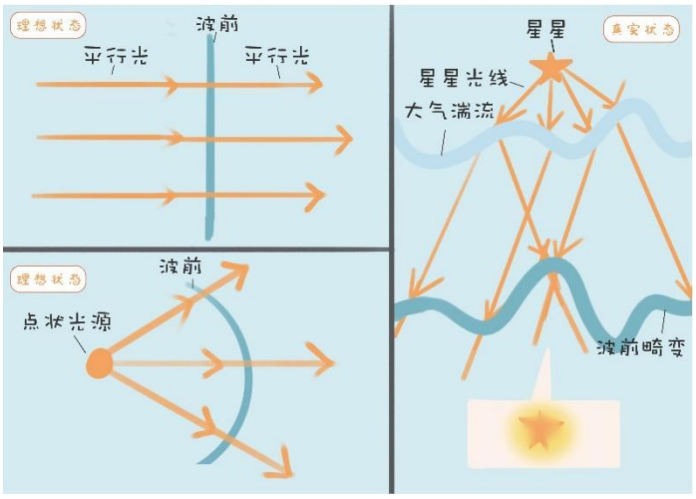
参考文献：

1. 《自适应光学》，周仁忠、阎吉祥、俞信、赵达尊、曹根瑞 编著，国防工业出版社，1996 年。
2. 《自适应光学技术》，姜文汉，自然杂志，第 28 卷第 1 期，2006 年。
3. 《自适应光学原理（第 3 版）》， (美)罗伯特·K.泰森(Robert K.Tyson) 著，马浩统、王三宏、许晓军等译，国防工业出版社，2017。
4. 科普中国：哈勃空间望远镜（https://baike.baidu.com/item/哈勃空间望远镜/29718）
5. https://esahubble.org/

2. 什么是自适应光学？

为了克服大气湍流的干扰，为了能在地面看清星星的真容，上世纪 50 年代天文学家 Horace Bobcock 提出了一个方法：可以用受波前传感器驱动的可变形光学元件来补偿大气扰动对望远镜成像的影响。这句话读起来有点拗口，但关键词就这么几个：波前传感器、可变形光学元件、补偿扰动。

先说专业名词：波前（英文名：Wavefront），有时也被称为波面。个人认为叫波面更贴切，因为它描述的就是一个和光线传输方向垂直的一个曲面。理想平行光的波前是一个平面，点光源的波前是一个球面（类似于电场线和等势面之间的关系）。因为大气折射率分布不均匀，所以光线穿过大气的时候，其波前就会产生畸变。因为有了波前畸变，所以图像就变得模糊；因为波前畸变在不停地发生变化，所以图像就模糊且抖动。

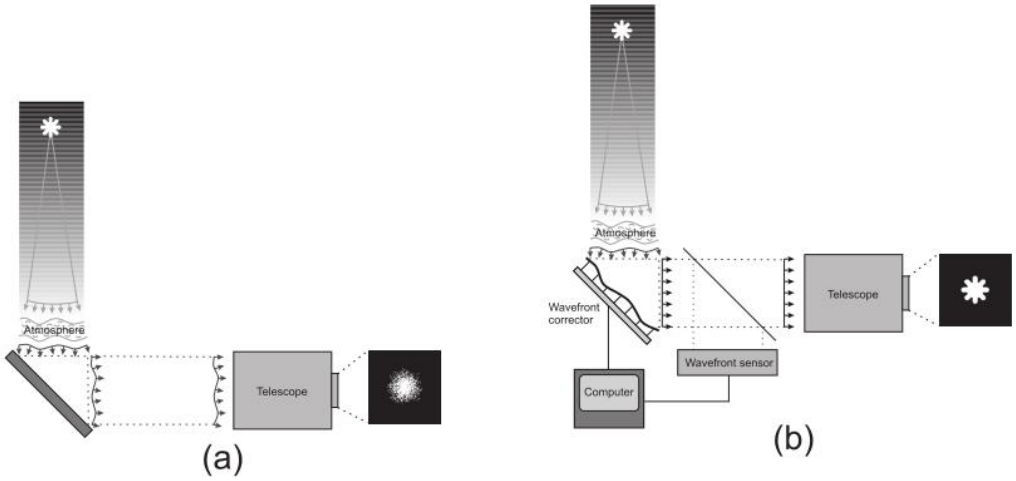


再回到 Bobcock 提出的方法：既然波前畸变是图像模糊和抖动的主要原因，那何不用一个元件产生反向的波前畸变，刚好和大气引起的畸变相互抵消？这样大气的干扰不就被消除掉了吗？多么巧妙的想法，赞一个！

但是，怎么知道应该抵消多少呢？万一抵消过头了怎么办？这就需要先用一个仪器（专业术语：波前传感器）测量大气引起的波前畸变，再通过可变形的光学元件（专业术语：波前校正器）来准确地补偿、校正、抵消这个畸变，从而达到“1-1=0”的效果。而且，因为大气是在不停运动的，所以这个测量、抵消的过程还需要不停地循环，以达到动态校正的效果。

这就是自适应光学（Adaptive Optics, AO）的核心思想：测量+控制+校正！厉害吧！

下图所示为闭环自适应光学系统原理图，主要包括：波前传感器、波前控制器、波前校正器。在工作过程中，波前传感器首先测量入射光束的波前畸变，再将畸变信息传输至波前控制器；波前控制器对畸变进行分析，并结合波前校正器的特性产生控制信号，驱动波前校正器对光束进行波前调节校正。由于系统不断地进行测量-控制-校正，因此可以对大气湍流等介质引起的波前畸变进行实时校正。



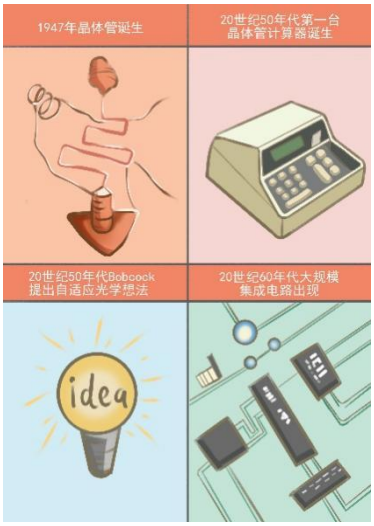
（a）大气湍流引起光束波前畸变，图像模糊；

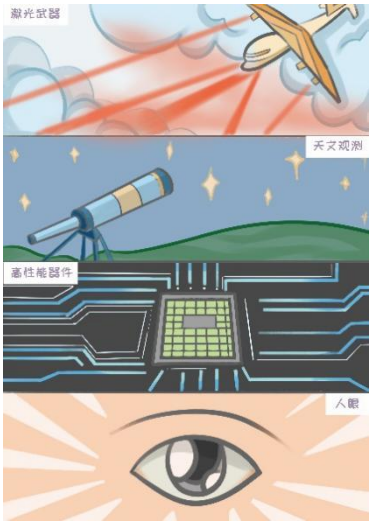
（b）利用自适应光学系统进行波前畸变校正，提高图像清晰度

（以上图片来自荷兰 OKO 公司产品手册：OKO Guide to Adaptive Optics）

自适应光学的思想非常先进，也非常伟大！因为它突破了传统光学的局限，把“测量---控制---校正”的理念引入了光学领域，而且还要求系统能够实时、动态地消除大气的干扰。这哪里是单纯的光学系统？机械、电子、图像、控制，啥都有啊！按照目前时髦的说法，这属于交叉领域，而且是深度交叉！

话说回来，Bobcock 的想法听起来很好，但是实现起来却很难！为了满足“实时测量---控制---校正”的要求，自适应光学系统关键器件（如波前传感器、变形镜、控制系统等）需要达到很高的性能指标要求。但是，想想看：晶体管是 1947 年诞生的，第一台晶体管计算机直到 50 年代才被研制出来，大规模集成电路要到 60 年代才出现。在这个想法被提出的 1950 年代，要想完成实时、高速的波前测量、计算、校正这一系列神操作，谈何容易？





因此，自适应光学最开始主要用在激光武器、天文观测等非常前沿、尖端的领域，不是一般人能玩得起的。直到后来，随着半导体、光电子行业的迅猛发展，各种高性能、相对廉价的器件出现了，这一技术才慢慢进入大家的视野，开始被更多人了解、接触、接受。

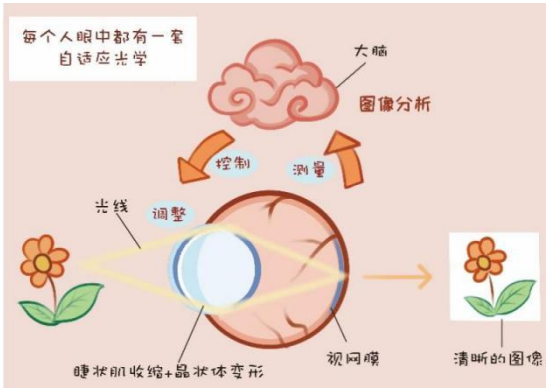
尤其是近年来，很多应用领域不再满足于传统光学系统的性能局限，开始追求“更快、更高、更强”（更快速的通信速率、更高精度或分辨率的投影或成像、更强的激光能量），自适应光学开始在这些领域大显身手！例如：

- 天文观测：校正大气湍流引起的光束波前畸变，提高图像清晰度；
- 生物显微成像：校正生物介质折射、散射引起的光束波前畸变（如双光子、多光子显微成像、深层显微成像），提高图像清晰度；
- 人眼视网膜成像：校正人眼组织对视网膜反射光的非均匀折射，提高视网膜图像清晰度；
- 激光束质量校正：校正介质受热形成的“热镜”（Thermal lens）对光束产生的波前畸变，提高光束质量；
- 无线激光通信：校正大气湍流引起的光束波前畸变，提高光束质量、信噪比；
- 激光精细雕刻：校正材料本身引起的光束波前畸变（如进行深层精细雕刻）；
- 光刻：校正光刻机投影物镜受热引起的高阶像差，如 ASML、Nikon 公司的投影物镜均采用了自适应光学技术；
- 量子计算、成像：光束波前高精度校正。

2021 年 10 月，国际期刊 Nature 上刊登了一篇将自适应光学技术和三光子显微镜（Three-photon microscopy）相结合，成功进行深度脑部成像（Deep brain imaging）的学术论文，再一次体现了“自适应光学+”的作用和巨大潜力！

顺便插一句：自适应光学这个词虽然听着很陌生，但离我们并不遥远！因为我们每个人人身上就有这么一套自适应光学系统！在哪里？人眼！人眼接收外界环境的光线，在视网膜成像。图像被送入大脑，大脑实时地对图像进行处理，分析判断图像的清晰度，然后控制人眼的睫状肌收缩、调整晶状体变形，最后在视网膜呈现清晰的图像。整个就是一典型的“测量（视网膜成像）—控制（大脑分析并发送指令）—调整（睫状肌收缩+晶状体变形）”过程。只不过这一切发生的太快、太过自然，所以你没有感觉到而已！

有没有觉得人体很神奇？有没有觉得自己很厉害？ 加油吧！



参考文献：

1. 《自适应光学》，周仁忠、阎吉祥、俞信、赵达尊、曹根瑞 编著，国防工业出版社，1996 年。

2. 《自适应光学技术》，姜文汉，自然杂志，第 28 卷第 1 期，2006 年。

3. OKO Guide to Adaptive Optics (4th Edition), G. Vdovin, O. Soloviev, M. Loktev, V. Patlan, Flexible Optical B. V., 2013. (http://www.okotech.com/)

4. 《自适应光学及激光操控》，张雨东、饶长辉、李新阳著，国防工业出版社，2016 年。

5. 《自适应光学原理（第 3 版）》， (美)罗伯特·K.泰森(Robert K.Tyson) 著，马浩统、王三宏、许晓军等译，国防工业出版社，2017 年。

6. 《自适应光学技术在天文观测中的研究进展》，胡立发、刘超、穆全全、宣丽等，中国科学：物理学 力学 天文学，2017 年 08 期。

7. Streich, L., Boffi, J.C., Wang, L. et al. High-resolution structural and functional deep brain imaging using adaptive optics three-photon microscopy.Nat Methods 18, 1253–1258 (2021). https://doi.org/10.1038/s41592-021-01257-6.

三、自适应光学常用术语

（Glossary of adaptive optics terms）

为了便于技术交流，本栏目列出了本产品手册中涉及的部分专业名词，对其进行了解释。

考虑到部分术语和名字的专业性较强，为便于理解，在保证正确性的前提上用更通俗的语言进行了注释。

如果术语注释存在歧义、错误，或者您有任何疑问、建议、意见，欢迎随时联系我们！我们会及时对相关条目进行修改和完善。

1. 一般光学术语（General terms on optics）

(1) 波前（Wavefront）

光束中各等相位点所形成的等相位面，与光束各点的传播方向垂直。例如，平行光的波前是平面、点光源的波前是球面、存在畸变的光束的波前可能是任意曲面。

(2) 波前畸变（Wavefront distortion/aberration）

光束在传输的过程中，因传输介质折射率不均（如大气、玻璃、液体、生物组织等）引起光束的波前发生变化，与理想波前存在一定差别，即为波前畸变。

自适应光学系统最主要的作用就是用来校正光束的波前畸变，提高系统成像、通信、聚焦的性能。

(3) 干涉（Interference）

当两束或更多束相干波在空间相遇时，它们会相互叠加，在某些点振动持续加强，在另一些点振动持续减弱，形成稳定的强度分布图样（即干涉条纹）。当波峰与波峰（或波谷与波谷）相遇时，振幅相加，形成亮条纹或强信号；当波峰与波谷相遇时，振幅相互抵消，形成暗条纹或弱信号。

(4) 光程差（Optical path difference, OPD）

光程是光在介质中传播路径长度与介质折射率的乘积。不同路径的光线到达目标点的光程会产生差异，形成光程差。这种光程差会导致波前像差，使点光源无法会聚成一个理想的点，而是形成一个弥散斑，降低成像清晰度。例如，当光束在大气中传输时，由于大气折射率的变化（时间变化及空间变化），就会导致光程发生变化，从而引起光

束的波前产生畸变。类似地，当光束在生物介质中传输时，由于生物介质折射率变化也会使光程发生变化，引起波前畸变。自适应光学就是用于校正波前畸变的一种技术。

(5) 光学像差（Optical aberration）

对于一个光学系统而言，光学像差一般可分为单色像差（Monochromatic Aberration）和色差（Chromatic Aberration）。

单色像差是指该像差即使在使用单一波长的光时也会出现。常见的单色像差主要包括：

1) 球差（Spherical Aberration）：由于透镜或球面镜的边缘部分与中心部分对平行光的聚焦能力不同。边缘光线会聚焦在靠近镜片的位置，而中心光线聚焦在稍远的位置，导致无法汇聚成一个清晰的点，而是一个模糊的弥散斑。
2) 彗差（Coma）：轴外点光源发出的宽光束，经过透镜不同环带后，形成的像不是一个点，而是一个类似彗星的、带有尾巴的亮斑（一头亮、一头暗并扩散）。
3) 像散（Astigmatism）：轴外点光源发出的光线，在透镜的子午面（包含光轴和主光线的平面）和弧矢面（与子午面垂直的平面）上聚焦在不同位置。因此，一个点会被拉长成两条分离的、相互垂直的焦线。
4) 场曲（Field Curvature）：一个平面的物体（如一张纸），经过成像后，其清晰的像并不落在一个平面上，而是落在一个弯曲的曲面上。
5) 畸变（Distortion）：不影响成像的清晰度，但会改变物体的形状，使图像中的直线发生弯曲，分为桶形畸变和枕形畸变。

以上五种像差由德国数学家路德维希·冯·赛德尔于 19 世纪中叶系统性地提出和数学描述，因此又被称为赛德尔像差（Seidel aberration）。这五种像差是光学成像不完美的主要根源之一，它们描述了实际光线与理想“高斯光学”（近轴光学）所预测的完美成像点之间的偏差。它们通常是同时出现且相互影响的。

色差是因为不同波长的光在介质中折射率不同，导致光程差异而产生的像差。源于透镜材料对不同颜色（波长）光的折射率不同，导致各色光焦点分离，在图像边缘产生彩色镶边。

(6) Zernike 多项式（Zernike polynomials，泽尼克多项式）

Zernike 多项式是以 1953 年获诺贝尔物理学奖的荷兰物理学家弗里茨·泽尼克（Frits Zernike）命名的。

Zernike 多项式是一组多项式，由无穷多个多项式完全集组成。多项式都定义在单位圆内，采用极坐标定义，有两个变量，即 ρ（长度）和θ（角度）。Zernike 多项式一个显著特点就是：每两个多项式都是单位正交的（类似于线性代数中定义空间的“单位正交基”），因此常用来描述光束的波前。值得注意的是，泽尼克多项式仅在单位圆的内部连续区域是正交的，通常在单位圆内部的离散的坐标上是不具备正交性质的。

(7) Zernike 模式（Zernike modes）

波前（或者波前畸变）是个空间曲面。为了便于描述这个曲面，通常把这个曲面分解为若干“基曲面”的线性组合，这样只需要知道每个基曲面的系数即可描述该空间曲面。这就类似于把一个多维空间向量分解为若干“基向量”的线性组合，用每个基向量的系数来描述这个空间向量。

Zernike 多项式所对应的曲面称为 Zernike 模式，具有单位正交性，即不同模式之间彼此独立、正交，不会相互干扰。这些模式的面形在形态上与常见的波前畸变相似，因此在自适应光学中广泛用于作为“基曲面”描述波前畸变。

常见的 Zernike 模式有：

一阶（1 项）：活塞（Piston）

二阶（2 项）：水平/竖直倾斜（Tip/tilt）

三阶（3 项）：离焦（Defocus）、斜向/竖直像散（Astigmatism）

四阶（4 项）：竖直/水平彗差（Coma）、竖直/斜向三叶草（Trefoil）

1) 在自适应光学领域，Zernike 模式应用比较广泛，但也有别的模式来用来描述波前畸变，例如，Lukas 模式、变形镜本征模式等。

2) 在高速自适应光学或控制算法研究中，也常使用“傅里叶模式（Fourier modes）”对波前进行分解，将波前表示为不同空间频率的正弦和余弦函数之和，便于进行频域分析和控制设计。

3) 对于某些特殊孔径形状（如矩形孔径或不规则孔径）的光学系统，Zernike 模式的正交性可能不再严格成立，可采用“正交函数集（Orthogonal Function Set）”或自定义基模式来进行波前分解，以提高校正精度。

(8) Zernike 多项式编号

Zernike 多项式是通过两个指数(n, m)来唯一确定一个多项式的，其中非负整数 n（n≥0）为径向阶数，代表了多项式在径向方向的复杂性；整数 m 为角向频率，|m|≤n 满足以及 n-|m|为偶数，代表了多项式在角向（圆周方向）的正弦/余弦变化频率。

1) m = 0： 代表旋转对称项（如离焦、球差）。

2) m > 0： 通常与 cos(mθ)相关联的项。

3) m < 0： 通常与 sin(|m|θ)相关联的项。

从指数(n, m)映射到单一编号 j 有几种不同的方法。著名的包括 Noll 编号、OSA/ANSI 编号、Fringe/亚利桑那大学编号、ISO 14999 编号、Born 和 Wolf 编号和 Malacara 编号等。例如，ANSI 编号和 Noll 编号的 Zernike 多项式如下表所示。

n	m	ANSI 编号	Noll 编号	数学表达式	名称
0	0	0	1	1	活塞
1	-1	1	2	$2\rho\sin\theta$	倾斜（x 方向）
	1	2	3	$2\rho\cos\theta$	倾斜（y 方向）
2	-2	3	5	$6\rho^2\sin2\theta$	初级像散（45º）
	0	4	4	$3(2\rho^2-1)$	离焦
	2	5	6	$6\rho^2\cos2\theta$	初级像散（0º）
3	-3	6	9	$8\rho^3\sin3\theta$	三叶草（垂直）
	-1	7	7	$8(3\rho^3-2\rho)\sin\theta$	初级彗差（y 方向）
	1	8	8	$8(3\rho^3-2\rho)\cos\theta$	初级彗差（x 方向）
	3	9	10	$8\rho^3\cos3\theta$	三叶草（斜向）
4	-4	10	15	$10\rho^4\sin4\theta$	四叶草（斜向）
	-2	11	13	$10(4\rho^4-3\rho^2)\sin2\theta$	二阶像散（45º）
	0	12	11	$5(6\rho^4-6\rho^2+1)$	初级球差
	2	13	12	$10(4\rho^4-3\rho^2)\cos2\theta$	二阶像散（0º）
	4	14	14	$10\rho^4\cos4\theta$	四叶草（垂直）

(9) 点扩散函数（Point spread function, PSF）

成像光学系统的点扩散函数就是当目标物体为一点光源（空间上无穷小）时，其生成图像的光强分布，也称点扩展函数。

这个概念类似于电子系统、控制论中的“冲击响应”（Impulse response），即当线性时不变（LTI）系统输入为一冲击函数（Delta 函数，时间上无穷短）时，系统的输出即为系统的冲击响应。只不过点扩散函数描述的是光学系统的空间响应特性，而冲击函数描述的是线性时不变系统的时间响应特性。

(10) 大气湍流 （Atmospheric turbulence）

大气湍流是大气的一种重要运动形式。它的存在使大气中的动量、热量、水气和污染物的垂直和水平交换作用明显增强，远大于分子运动的交换强度。

大气湍流的存在对光波、声波和电磁波在大气中的传播产生一定的干扰作用。例如，大气湍流引起大气折射率发生变化，导致在大气中传输的光束波前发生畸变，降低图像清晰度（天文观测）、通信信噪比（激光通信）等。

自适应光学的一大应用就是降低大气湍流对光束传输的影响，提升光束质量。

(11) 衍射极限（Diffraction limit）

衍射极限是指一个理想物点经光学系统成像，由于衍射的限制，不可能得到理想像点，而是得到一个夫朗和费衍射图样。例如，一个理想点光源成像，由于衍射的原因，最终会在像面形成一个艾里斑（Airy disk），而不再是一个点。艾里斑的直径与光束波长、透镜焦距、光孔大小等因素有关。

2. 变形镜相关术语（Terms on deformable mirrors）

(12) 变形镜（Deformable mirror, DM）

顾名思义，就是镜面可以变形的镜子，不过需要说明一下，这个变形是“主动变形”。

普通的镜子，其镜面形状是固定的，不能发生主动形变，如平面镜、凹面镜、凸面镜等，但变形镜的镜面在外部信号（如电压）的控制下可发生主动形变，而且镜面形变量可以根据控制电压的大小、分布进行实时调节，从而达到调节光束波前的目的，例如：活塞变形镜（Piston Corrector）、压电变形镜（Piezo-electric DM）、双压电变形镜（Bimorph DM）、音圈变形镜（Voice Coil DM）等等。

(13) 致动器（Actuator）

用于使变形镜镜面产生形变的机构或者器件，又被称为“执行器”、“促动器”等。

例如，薄膜变形镜（MMDM）常采用电极静电吸引使镜面产生形变，压电变形镜（PDM）采用压电晶体使镜面形变，双压电变形镜（Bimorph DM）采用双压电片使镜面形变等。

需要注意的是，在工程与机械领域有个器件叫“制动器”，通俗理解就是刹车，因此两个东西不能混淆。

(14) 微机械薄膜变形镜（MMDM）

变形镜的一种，英文全名 Micro-machined Membrane Deformable Mirror，简称 MMDM。镜面为薄膜，通过薄膜下方电极的静电吸引使薄膜镜面产生形变，从而达到波前调节的作用。

荷兰代尔夫特理工大学（TU Delft）的 Gleb Vdovin 教授于 20 世纪 90 年代在国际上率先采用微机械加工工艺研制出了微机械薄膜变形镜并成立了荷兰 OKO 公司（OKO Tech）对该技术进行产业化，极大地推动了变形镜及自适应光学技术的研究和应用。

(15) 压电变形镜（PDM）

变形镜的一种，英文全名 Piezo-electric Deformable Mirror，简称 PDM，主要执行器材料为压电陶瓷。当给执行器施加电压时，由于压电效应，压电陶瓷产生形变，带动镜面发生形变，从而对光束波前进行调节。

(16) 变形镜通道数（Channel）

即变形镜执行器的数量。例如，荷兰 OKO 公司生产的一款 MMDM 有 37 个执行器，也被称为 37 通道变形镜。

(17) 单执行器最大形变（Stroke）

当给变形镜某个执行器单独施加控制电压时（别的执行器仍然维持零电压），其镜面产生的最大形变量。例如，荷兰 OKO 公司的 PDM 单执行器最大形变量约为 8 微米，通过多个执行器联动，可以产生更大幅度的形变。

一般来说，位于镜面中心位置的执行器所受到的周围执行器的约束比较大，因此形变量较小；而位于变形镜边缘的执行器所受到的约束较少，因此形变量更大。

(18) 波前调制量（Wavefront modulation）

当光束被变形镜反射时，其波前被镜面改变，也被称为波前调制。由于光束一来一回，它所受到的波前调制量为镜面机械形变量的 2 倍。例如，某变形镜反射镜面的机械形变量为 10 微米，则其对入射光束提供的光学波前调制量就是 20 微米。

(19) 镜面形变量（Mirror deformation）

变形镜镜面相对于其初始面形的实际机械变化量，是变形镜镜面的物理形变。

(20) 变形镜最大形变量（Maximum deflection/deformation）

变形镜最大形变指的是变形镜在施加不同驱动电压时，所能产生的最大形变量（去除活塞影响后）。

对于微机械薄膜变形镜，由于其边缘固定，通过给所有的致动器施加最大电压，可使之产生最大形变。

对于压电变形镜而言，由于其边缘悬空，因此如果同时给所有致动器均施加最大电压，则会使得致动器整体伸长或者收缩，镜面将以平面的方式整体上升或者下降（类似活塞运动，因此又被称为活塞模式），反倒对入射光的波前畸变没有了校正效果。因此，对于压电变形镜，一般对中心位置的致动器施加较大电压而对周围的致动器施加零电压（或者反之），才能产生最大形变。具体施加电压的组合需根据变形镜致动器的空间排布确定。

(21) 孔径 （Aperture）

变形镜的孔径一般指变形镜镜面的直径（对于圆形镜面）或者长宽尺寸（对于长方形镜面）。常见的变形镜孔径有 10 mm，15 mm，30 mm，50 mm 等。

(22) 工作（光学）波段（Wavelength range）

指的是变形镜镜面能够有效反射光波的波长范围，例如 400nm-1000nm, 400nm-10μm 等。

(23) 初始平整度（Initial flatness）

变形镜的初始平整度指变形镜在不加电压时，其表面的平整度。常用镜面初始面形与标准平面或者球面差值的方均根（root mean square,RMS）值表示。

(24) 闭环平整度（Closed-loop flatness，Active flatness）

在自适应光学系统中，可采用波前传感器或其他手段对变形镜的镜面进行闭环平整控制，也称为镜面找平或者校平。找平后变形镜镜面的平整度即为闭环平整度。

一般变形镜的初始平整度可达几百纳米甚至几微米，但经过找平以后，其闭环平整度可以达到几十、甚至几个纳米。这也体现了变形镜对于自身畸变的校正能力。

(25) 滞洄（Hysteresis）

一种非线性现象，常见于压电材料、磁性材料等，因此也被称为磁滞、迟滞。

以压电执行器为例，由于滞洄的存在，变形镜执行器的形变量不仅取决于当前时刻施加的电压值，还与历史电压值有关，导致同一电压产生不同的形变。

滞洄会在系统中引入不确定性，因此对自适应光学系统的性能造成一定影响，尤其对开环系统影响更大。但是对于闭环系统而言，因为传感器不断地测量形变数据、控制系统不断更新执行器的控制信号，所以可以在很大程度上减轻滞洄对闭环性能的影响。

(26) 上升时间（Rising time）

当给变形镜的执行器施加控制电压时，变形镜并非瞬间稳定，而是需要一段时间（例如，几个毫秒）才能达到最终稳定状态。上升时间一般指变形镜的形变量从最终形变量的 10%到 90%所需的时间。

上升时间、稳定时间反映的是一个器件或者系统在外部激励下产生响应的速度快慢，是系统瞬态响应的一个重要参数，也与闭环系统的刷新频率、带宽等密切相关。

(27) 稳定时间（Settling time）

参考“上升时间”定义，稳定时间指从给变形镜施加控制电压开始，直到变形镜的形变稳定在某一区间范围内（例如，最终稳定值的+/-5%范围内）所需的时间。

(28) 响应时间（Response time）

响应时间反映的是系统响应速度的快慢。在不同的场合和上下文，有时候指上升时间，有时候指稳定时间，需要根据具体情况具体分析。

(29) 共振频率（First resonant frequency）

变形镜产生共振的频率，是变形镜的固有属性。

与上升时间、稳定时间类似，常用共振频率描述变形镜的响应特性。但值得注意的是，变形镜共振会导致镜面不稳定或者严重损坏，因此变形镜的工作频率一般要低于其共振频率。例如，有的变形镜的共振频率可以达到 kHz 量级，但实际的工作频率（刷新频率）只有几百 Hz，否则就会发出比较大的响声，甚至导致机械结构损坏。

(30) 线性度（Linearity）

变形镜的线性度一般指变形镜的形变量与控制电压之间的线性程度。对于 MMDM，其镜面形变量与控制电压的平方成正比；对于 PDM，影响线性度的因素主要是滞洄、蠕变等。非线性响应会对变形镜的校正效果产生影响，闭环系统可以通过闭环反馈降低、减轻这种影响。

(31) 工作带宽（Operational bandwidth）

对于一个动态系统，当输入信号的频率发生变化时，系统输出（如幅度、相位等）也会随之改变，因此通常使用幅频和相频响应曲线来表示系统在不同频率下的幅度和相位变化。

系统的工作带宽指的是实际应用中系统真正可用的、能够有效响应的频率范围。变形镜的工作带宽即为镜体及控制驱动系统能够准确跟踪并响应控制信号的频率范围，也表征了其能够有效校正动态波前畸变的频率范围。工作带宽通常由变形镜的谐振频率所界定，代表了变形镜机械结构在振幅急剧下降前所能响应的最高频率极限，也是整个自适应光学系统对动态扰动的校正速度上限之一。

实际应用中，变形镜的工作带宽可用-3dB 带宽来表示，即变形镜响应幅度衰减至低频幅度的 70.7%时（即功率衰减为低频时的一半）所对应的频率范围。

(32) 影响函数（Influence function）

自适应光学特有概念，用来描述变形镜的波前校正量与其控制电压之间的定量关系。在自适应光学系统进行畸变校正前，一般需测量变形镜的影响函数，建立控制电压与波前校正量之间的关系；在实际校正时，可以根据影响函数设计变形镜的电压控制算法，进行畸变校正。

(33) 偏置操作（Bias operation）

因静电力吸引，MMDM 的薄膜只能向电极方向发生形变，产生凹面光学形状。为了实现双向操作，应事先给电极施加一定电压（例如最大控制电压的一半），使得镜面薄膜朝电极发生一定的形变，并以此为初始状态。后续再控制电极电压，薄膜就可以向正反方向发生双向形变。

3. 波前传感器相关术语（Terms on wavefront sensors）

(34) 波前传感器（Wavefront sensor, WFS）

用来测量光束波前（畸变）的器件，是自适应光学系统中的重要器件。常用的波前传感器有 Shack-Hartmann 波前传感器、四棱锥波前传感器、曲率波前传感器等。

(35) 波前传感器接口(Wavefront Sensor Interface）

波前传感器接口指波前传感器与外部控制系统或计算机之间进行数据通信和控制的物理及协议接口。它主要包括常用的 高速数字通信接口，如 USB 3.0、以太网接口（RJ45）、CXP 等。通过这些接口，波前传感器能够将采集到的光学波前数据实时传输到自适应光学控制系统或计算机，供算法进行波前分析、闭环控制和数据记录使用。

(36) Shack-Hartmann 波前传感器（Shack-Hartmann WFS）

Shack-Hartmann 波前传感器在自适应光学系统中应用广泛，其结构一般包括微透镜阵列（Microlens array）和相机两部分。

微透镜阵列是由多个微型透镜按照阵列式紧密排列而形成的光学元件，其结构类似于昆虫的复眼。当一束平行光垂直入射到微透镜阵列时，每一个微透镜都会将入射光汇聚到其焦点上，在焦平面形成一个排列规则的光斑阵列。如果入射光的波前产生畸变，则入射到微透镜的光线方向发生偏折而不再汇聚到焦点，焦平面的光斑阵列形状就会发生变化。因此，根据焦平面光斑阵列的形状变化，就可以计算出入射光波前的变化量。

相机一般放置于微透镜阵列的焦平面，获取焦平面光斑图像，用于后续波前计算和分析处理。

(37) 波前传感器工作波段(Wavefront Sensor Wavelength Range)

波前传感器的工作波段主要取决于相机对不同波长光线的灵敏度。波前传感器工作波段的测试原理，是通过用可调谐单色光源扫描波长，并监测传感器输出信号的信噪比，从而确定其能够进行高精度波前测量的波长范围。

(38) 波前传感器测量精度（分辨率）（Wavefront Measurement Accuracy (Resolution)）

波前传感器测量精度的核心原理，是基于 Shack-Hartmann 技术将不可直接测量的波前相位分布，转换为可精确测量的光斑位置偏移。其关键在于通过微透镜阵列将入射波前分割为多个子区域，每个子透镜将局部波前聚焦为一个光斑；若波前存在畸变，将导致光斑偏离理想位置，其偏移量即反映了波前的局部斜率。

(39) 微透镜个数（Number of Microlenses）

波前传感器工作时，入射波前经微透镜阵列分割为多个微小子孔径，每个子透镜将对应区域的波前汇聚为一个光斑，并成像在相机探测器上。通过对探测器上有效光斑数量进行统计，可确定参与测量的微透镜个数。另一方面，也可根据微透镜阵列的间距以及传感器靶面的有效尺寸进行估算，从而得到微透镜阵列在对应方向上的排布数量及总个数。

(40) 微透镜阵列（Microlens array)

定义见“Shack-Hartmann 波前传感器”。微透镜阵列一般有正交排列、六边形排列等方式。微透镜阵列目前不仅用于自适应光学，也用于计算成像、量子成像等领域。

(41) 微透镜间距（Pitch）

相邻两个微透镜中心之间的距离，一般在微米、毫米量级。

(42) 采样频率（Sampling frequency）

在自适应光学系统中，一般用传感器测量光束特性（如光强、波前等），并以此为依据计算下一时刻的控制信号。因此，采样频率一般指传感器的刷新频率。对于 Shack-Hartmann 波前传感器而言，其采样频率一般等于传感器相机的刷新帧率。

(43) 绝对模式/相对模式（Absolute mode/Reference mode）

Shack-Hartmann 波前传感器的绝对模式：测量入射光相对于平行光的绝对波前。波前传感器事先采用平行光校准，确定光斑质心坐标。实际测量时，以平面为基准面，直接根据获得的微透镜阵列光斑图像计算得到入射光束的绝对波前，只需要单帧图像即可计算出入射光的波前。

Shack-Hartmann 波前传感器的相对模式：测量入射光相对于某一束参考光束的相对波前变化量或者差别。将某一光束定义为参考光束，记录其产生的微透镜阵列光斑坐标，并将该坐标设置为波前计算参考坐标；将后续获得的微透镜阵列光斑坐标与参考坐标比较，从而计算得到该光束与参考光束之间的相对波前变化。因此需要两张图像才能计算出相对波前变化。

4. 自适应光学系统相关术语（Terms on closed-loop system）

(44) 闭环自适应光学系统（Closed-loop adaptive optics system）

采用传感器获取光束的性能参数（如波前畸变、远场光斑亮度等），并以此为依据实时更新波前校正器件的控制信号。例如，常规的闭环自适应光学系统采用 Shack-Hartmann 波前传感器实时测量光束残留波前畸变，并据此实时更新变形镜的控制信号，实现对波前畸变的实时校正。

(45) 无波前自适应光学系统（Wavefront-sensor-less adaptive optics system）

与常规自适应光学系统不同，无波前自适应光学系统并未安装波前传感器，而是直接以优化某个目标函数（如远场光斑亮度、远场光斑图像等）为目的，控制变形镜产生形变。

无波前 AO 系统的控制目标更直接，但是一般需要多次迭代才能获得最优值，因此速度较慢，一般用于某些难以直接准确测量波前畸变的应用。

(46) 闭环系统刷新频率（Closed-loop refresh frequency）

在闭环自适应光学系统中，系统的刷新频率一般取决于：波前传感器的最大刷新频率（如相机最高帧率）、控制器的最大刷新频率、变形镜的允许工作频率等。

随着机器视觉、高速相机的发展，刷新频率达百赫兹、千赫兹的相机已经越来越多，因此波前传感器的刷新频率也可以达到百赫兹、千赫兹（在入射光强足够的情况下）。控制器主要是电子器件、计算机，其速率也可以做得比较高。变形镜大多还是依靠机械形变进行波前调节，受到共振频率的限制，目前刷新频率大多在百赫兹量级。因为传感器、控制器、变形镜三者是串联的，根据木桶原理，系统的刷新频率一般取三者中最小的。

(47) 系统闭环带宽（Closed-loop bandwidth）

在实际应用中，对于自适应光学系统的闭环带宽有不同的定义。

一种定义是将闭环系统带宽等同于闭环系统的刷新频率。例如，系统在闭环状态下的最大刷新频率为 500 Hz，则认为该系统的闭环带宽为 500 Hz。

还有定义认为，自适应光学系统的闭环带宽是指经校正后波前畸变残差功率达到初始畸变（即未校正畸变）的 50%所对应的频率，又被称为-3 dB 带宽。例如，某闭环系统刷新频率为 500 Hz，但仅能校正使得 10 Hz 及以下的波前畸变功率达到原始值的 50%，因此该系统的闭环带宽为 10 Hz。

此外，闭环带宽有时还被称为校正带宽、闭环校正带宽，因此需要针对不同场景进行具体分析。

四、自适应光学系统设计

Design of an Adaptive Optical System

原文：Flexible Optical B.V.,The Netherlands（OKO Tech）

翻译：灵动智能光学，152 5716 7514 , info@inspiroptics.com

1. Phase Conjugation（相位共轭）

The optical scheme of a phase-conjugated AO system should satisfy the following conditions.

相位共轭的自适应光学（AO）系统应满足以下条件:

（1）.The optics should re-image the plane of the mirror to the plane of the Hartmann mask (or microlens array) with proper scaling. An example of such an optical conjugation scheme is shown in Figure 1.

光学系统应以适当的比例将反射镜平面重新成像到哈特曼掩模 (或微透镜阵列) 的平面。这种光学共轭方案的示例如图 1 所示。

（2）. In a similar way, optical conjugation should be provided between the DM and the source of aberrations.

类似地，变形镜 (DM) 和像差源之间应该是共轭的。

（3）. In a similar way, optical conjugation should be provided between the system pupil, and the tip-tilt corrector, if any.

类似地，系统的入瞳和倾斜校正器（如有）之间应该是光学共轭的。

In general, phase-conjugated AO contains three planes conjugated to the pupil: the DM, the WF sensor and the tip-tilt corrector. Each conjugation requires a telescope, and each telescope introduces additional static aberration and scattering.

一般来说，相位共轭的 AO 系统包含三个与光学入瞳共轭的平面，即 DM、波前 (WF) 传感器和倾斜校正器。每个共轭面之间都需要一个望远镜光路，每个望远镜光路都会引入额外的静态像差和散射。

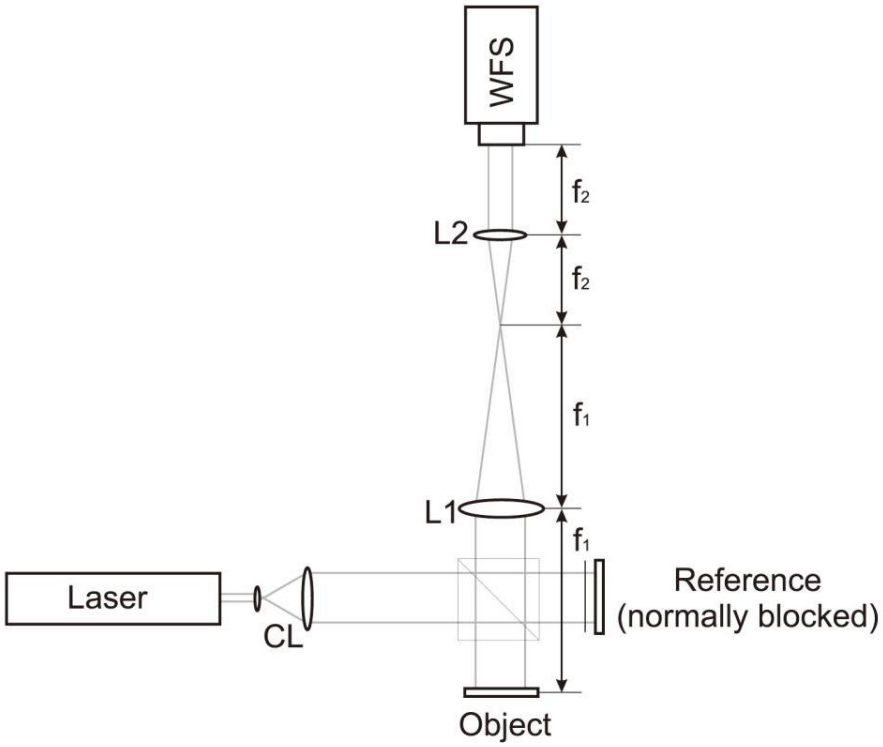


图 1. 利用 Shack-Hartmann 波前传感器测试反射光学平面的测量方案。CL 表示准直器；L_1 和 L_2 是焦距分别为 f_1 和 f_2 的透镜；WFS 是波前传感器。

Typical measurement scheme for testing of reflective optics with Shack-Hartmann wavefront sensor. Here CL is a collimator; L1 and L2 are lenses with focal distances f1 and f2, respectively; WFS is the wavefront sensor.

To reduce the number of conjugated planes, OKO fabricates MMDM15-17-tip-Tilt—special deformable mirror mounted on a tip-tilt stage.

为了减少 AO 系统中共轭平面的数量，OKO 公司制造了一种将变形镜直接安装在倾斜台上的专用变形镜—MMDM15−17, 这是一种倾斜专用变形镜。

An important remark should be done regarding the use of micromachined membrane deformable mirrors (MMDM). As the membrane can only be pulled by electrostatic forces but cannot be pushed, it should be biased to provide deformation in both directions. It means that one will get much better results when optimizing the mirror with respect to a sphere, than when optimizing it with respect to a flat surface. This sphere should be taken into account when the mirror is incorporated into the optical setup. The optimum radius of the bias curvature can be evaluated assuming the mirror flexure to be in the middle of the range.

在使用微机械薄膜变形镜(MMDM)时需要注意：由于薄膜只能通过静电力拉动而不能推动，因此在搭建光路时，应该施加偏置电压(bias)使其产生球面形变，才能在校正时获得推拉两个方向上的形变。也就是说球面初始面形会产生比平面初始面形更好的校正效果。在

设计和搭建光路时，应该考虑到 MMDM 初始球面。假设 MMDM 的镜面弯曲度为形变中间值则可以计算出最佳的偏置曲率半径。

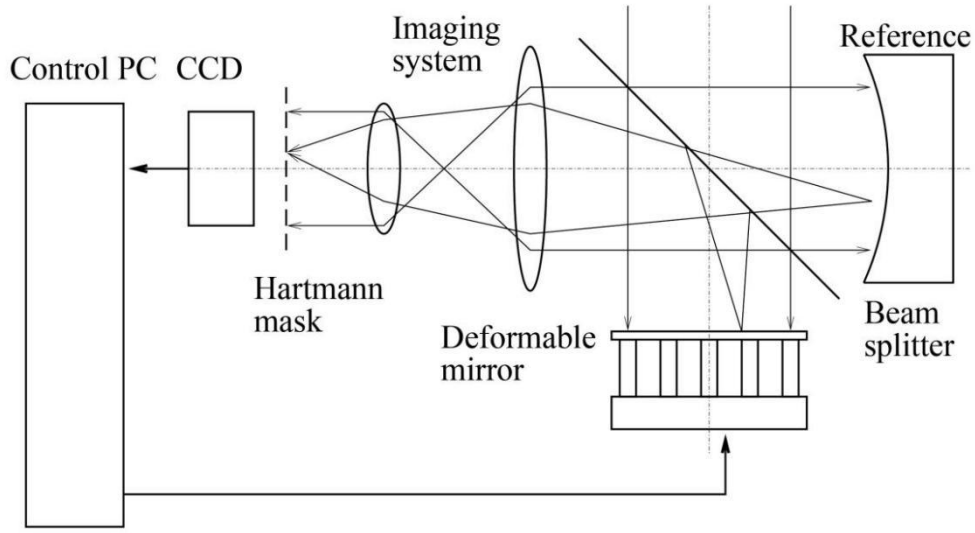


图 2. 典型自适应光学装置方案

Scheme of typical adaptive optics setup.

The typical setup for functional feedback loop is shown in the Figure 2. A high-quality flat or spherical mirror can be used as a reference. A concave spherical mirror is preferable for the use with MMDM due to its biased operation, and a flat mirror for PDM systems.

典型的反馈回路如图 2 所示。可以用一个高质量的平面镜或球面镜作为参考面。对于 MMDM，则选用凹面球面镜作为参考面(考虑 MMDM 的偏置)；对于压电变形镜(PDM), 一般用平面镜作为参考面。

2. FrontSurfer in the AO mode (用 FrontSurfer 软件进行 AO 闭环校正)

Closed-loop correction mode is implemented in the version of“FrontSurfer”for deformable mirrors.

采用“FrontSurfer”软件控制变形镜，可实现 AO 系统的闭环校正。

Before starting closed-loop correction with a deformable mirror (DM), the mirror should be properly configured. “FrontSurfer” supports standard OKO’s ISA, PCI, USB and ethernet interface modules for deformable mirrors. Configuration files can be supplied for standard OKO’s DM types. It is possible to integrate “FrontSurfer” with a non-OKO DM interface by developing a custom plugin according to our specification.

在使用 DM 进行闭环校正之前，应在软件中正确配置 DM 相关参数。“FrontSurfer”软件支持用标准的 OKO 的 ISA、PCI、USB 和以太网接口模块控制 DM。OKO 的 DM 一般均随产品提供配置文件。此外根据我们的规范，用户也可以开发一个自定义插件，将“FrontSurfer”与非 OKO 的 DM 进行集成控制。

2.1 Calibration of the AO (AO 系统校准)

After the mirror is coupled with the wavefront sensor, it should be calibrated.

反射镜与波前传感器耦合后，需要进行标定 (校准)。

The calibration consists in the measurement of all Shack-Hartmann sensor responses (displacements of spots) corresponding to the actions of the actuators. These responses form the influence matrix of the mirror; we shall denote it as A. Calibration should be performed after any change in the optical setup.

在校准过程中，需测量与 DM 每个致动器的动作相对应的 Shack-Hartmann 波前传感器的响应(即所有点的位移)。这些响应构成 DM 的影响矩阵，我们将其表示为 A。光学设置发生任何变化以后，都需要进行校准。

Before calibration, one needs to make sure that:
1. The DM is optically conjugated to the WF sensor;
2. The pupil of the system is optically conjugated to the DM.

校准前，需要确保：

(1) DM 与 WFS 光学共轭；

(2) 该系统的光学入瞳与 DM 光学共轭。

The first condition is extremely important for the stability of the feedback. Bad alignment of conjugated planes causes geometrical distortions and movement of the beam on the WF sensor, resulting in an unstable behavior of the AO system. The second condition is important, as it defines the final quality of the AO correction. Conjugation between the DM and the WF sensor can be checked by introducing tilts in the mirror plane. These tilts should not cause any movement of the beam in the sensor input. In the HS response one should observe only movement of spots. If the conjugation is correct, no new spots, caused by the beam movement on the sensor input, should appear with the DM tilts.

第一个条件 (DM 与 WF 共轭) 对闭环反馈系统的稳定性极其重要。共轭平面对准不良会导致 WF 传感器几何畸变和光束移动，导致 AO 系统不稳定。第二个条件 (DM 与入瞳共轭) 也很重要，因为它决定了 AO 校正的最终质量。DM 和 WF 传感器之间的共轭可以通过在镜平面中引入倾斜来检查。这些倾斜不应引起传感器输入端光束的任何移动。对于 HS 传感器，应该只观察到光斑的移动。如果共轭正确，DM 倾斜时就不会出现因传感器输入端光束移动而引起的新光斑。

After the pupil images are aligned and conjugated, the reference spot pattern, corresponding to the ideal performance of the AO system, should be obtained. The method of obtaining such an image depends on the AO system structure. Usually it is registered by injecting a diffraction limited reference beam into the the AO system in such a way, that all internal aberrations of the system are accounted for in the reference image. In the Fig. 2 it is achieved by blocking the DM arm and registering the spot pattern obtained by reflection on the reference mirror. In practice,obtaining the reference image that takes into account all the internal aberrations of the AO

system can happen to be one of the most important and cumbersome operations in the whole process of the AO system alignment and calibration.

在对光学入瞳图像进行校准和共轭后，接下来就要获得参考光斑。该参考光斑应该与 AO 系统理想性能相对应。如何获得参考光斑取决于 AO 系统结构。通常做法是将一束衍射极限的参考光束射入 AO 系统，使系统的所有内部像差都包含在参考图像中。在图 2 中，通过阻挡 DM 光路并记录经基准镜反射获得的光斑图案。在实际应用中，获得包含 AO 系统所有内部像差的参考图像可能是 AO 系统校准全过程中最重要但最麻烦的操作之一。

After calibration, the influence matrix **A** is subjected to singular value decomposition (SVD) $\mathbf{A} = \mathbf{USV}^{\mathbf{T}}$ [1]. The columns of the matrix **U** make up an orthonormal set of the mirror deformations (modes), and the values of the diagonal matrix **S** represent the gains of these modes. Discarding modes with small singular values improves controllability of the system [2], however can lead to the accumulation of errors that are correctable by the mirror, but excluded from the set of SVD modes.

校准后，对影响矩阵 **A** 进行奇异值分解 (SVD)，即 $\mathbf{A} = \mathbf{USV}^{\mathbf{T}}$ [1]。矩阵 **U** 的列构成一组单位正交的镜面变形（模式），对角矩阵性 **S** 的值表示这些模式的增益。舍弃奇异值较小的模式可提高系统的可控性[2]，但是会导致误差积累。这些误差本可由镜面进行校正，但因舍弃了较小的奇异值而被排除在 SVD 模式集合之外。

The “FrontSurfer” software allows to visualize the modes and singular values, and to limit the number of modes employed for the WF correction.

“FrontSurfer”软件允许模式和奇异值的可视化，用以限制 WF 校正所采用的模式数（提高闭环系统性能和稳定性）。

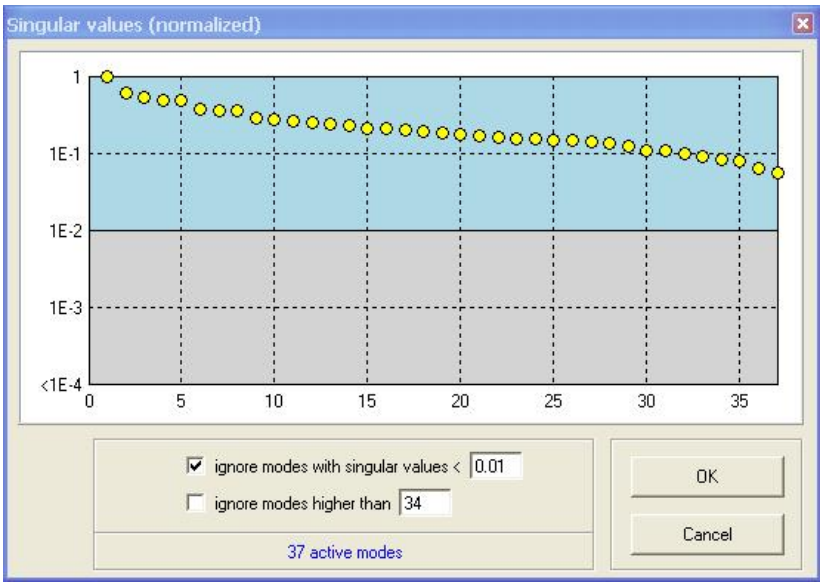


图 3. 37 通道 MMDM 的奇异值。

Singular values of a 37-channel MMDM.

Experimental singular values for a 37-channel micromachined membrane deformable mirror are given in Figure 3; first 20 SVD modes are shown in Figure 4.

37 通道微机械薄膜变形镜(MMDM)通过实验测得的奇异值如图 3 所示；前 20 个奇异值模式如图 4 所示。

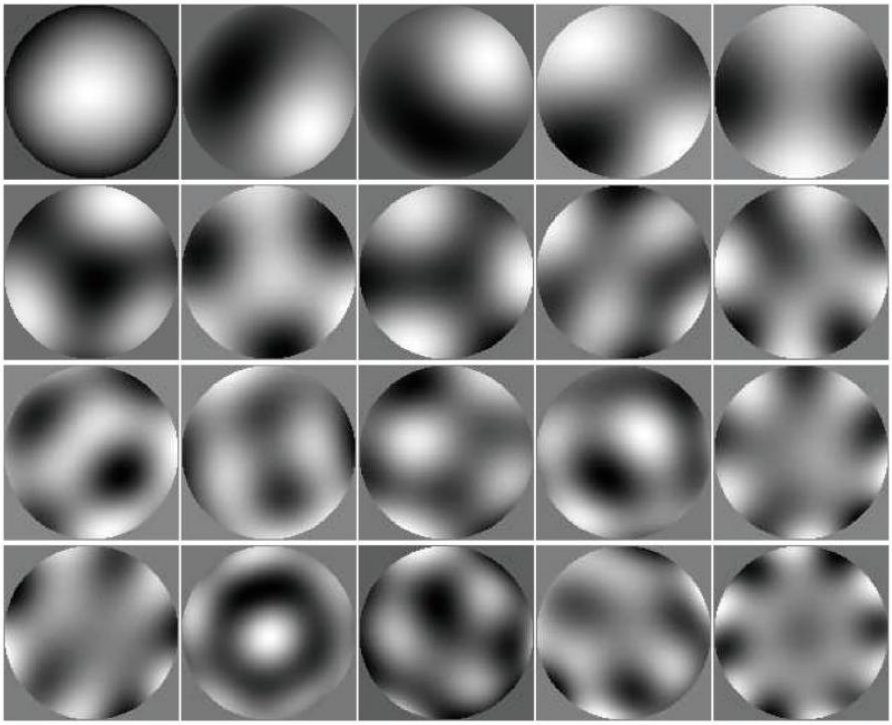


图 4. 37 通道 MMDM 的前 20 个 SVD 模式。

First 20 SVD modes of a 37-channel MMDM.

“FrontSurfer” perform wavefront correction in a series of iterations. If the residual aberration ϕ_n at the nth iteration corresponds to the set of actuator signals $\mathbf{X_n}$ then the actuator signals at the next step $\mathbf{X_{n+1}}$ will be given by

$$\mathbf{X_{n+1} = X_n - gA^{-1}}\phi_n,$$

where g is the feedback coefficient with value in the range (0..1], $\mathbf{A^{-1}}$ is the pseudo-inverse of A given by $\mathbf{A^{-1} = VS^{-1}U^T}$.

“FrontSurfer”通过一系列迭代进行波前校正。如果第 n 次迭代的残余像差 ϕ_n 对应于致动器信号组 $\mathbf{X_n}$，则下一步的致动器信号 $\mathbf{X_{n+1}}$ 将由下式给出

$$\mathbf{X_{n+1} = X_n - gA^{-1}}\phi_n,$$

其中 g 是值在范围（0..1]内的反馈系数，$\mathbf{A^{-1}}$ 是由 $\mathbf{A^{-1}=VS^{-1}U^T}$ 给出的 **A** 的伪逆。

The target wavefront is defined as a combination of Zernike polynomials, and can be manually controlled during the correction using arrow keys of the computer keyboard.’ “Left” and “Right” switch between Zernike modes while “Up” and “Down” control the amplitude of the chosen Zernike mode. Examples of Zernike aberrations with the maximum possible amplitude for which rms error was less than $\lambda/14$ (Maréchal criterion) generated in this way by 50-mm PDM with 39 actuators are shown in Figures 5-20.

目标波前可通过 Zernike 多项式的组合进行定义，并且可以在校正期间使用计算机键盘的箭头键手动控制。“左”、“右”键可在 Zernike 模式之间切换，“上”和“下”控制所选 Zernike 模式的振幅。图 5-20 显示了 50 mm PDM（39 个致动器）以这种方式产生的最大振幅的 Zernike 像差，其中均方根误差小于 λ/14 (Maréchal 标准)。

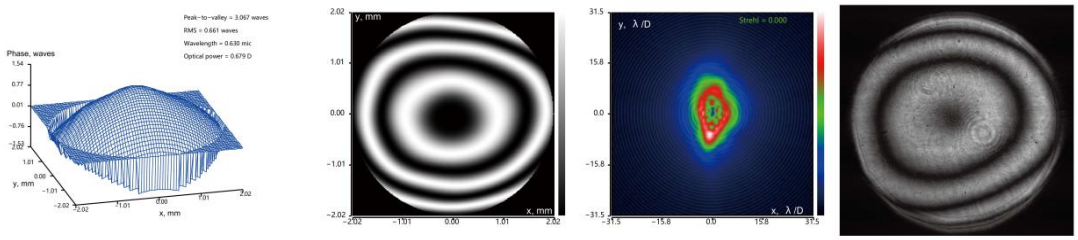


图 5. 系统初始畸变（从左到右：重建波前、模拟干涉图、模拟远场、测量干涉图）

Initial aberration of the system: reconstructed wavefront, simulated interferogram, simulated far field, and registered interferogram.

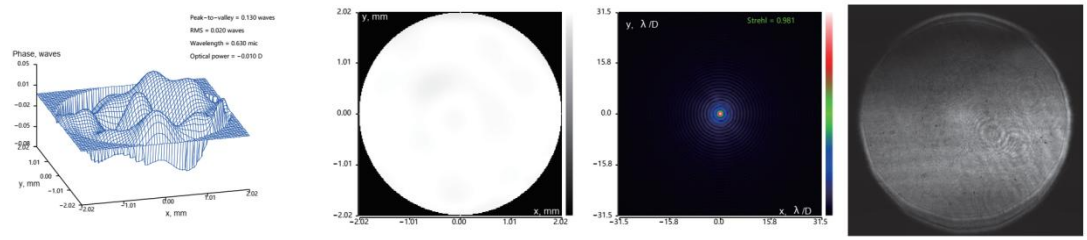


图 6. 镜面找平结果（从左到右：重建波前、模拟干涉图、模拟远场、测量干涉图）

Flatten mirror: reconstructed wavefront, simulated interferogram,simulated far field, and registered interferogram.

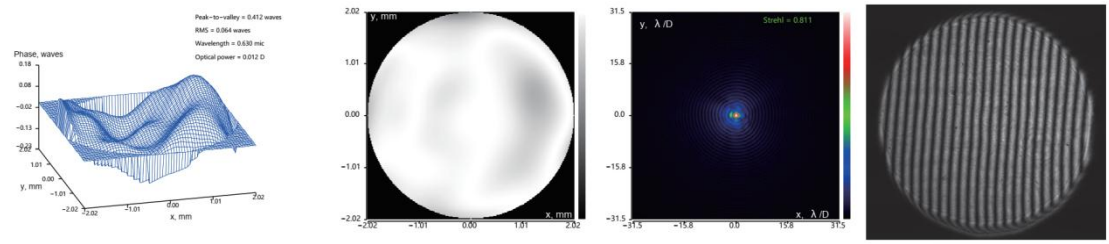


图 7. 产生的振幅为 7.6 μm 的倾斜 (Zernike 项 Z[1,-1])

（从左到右：重建波前、模拟干涉图、模拟远场、测量干涉图）

Tilt (Zernike term Z[1,-1]) of amplitude 7.6μm generated : reconstructed wavefront,simulated interferogram, simulated far field, and registered interferogram.

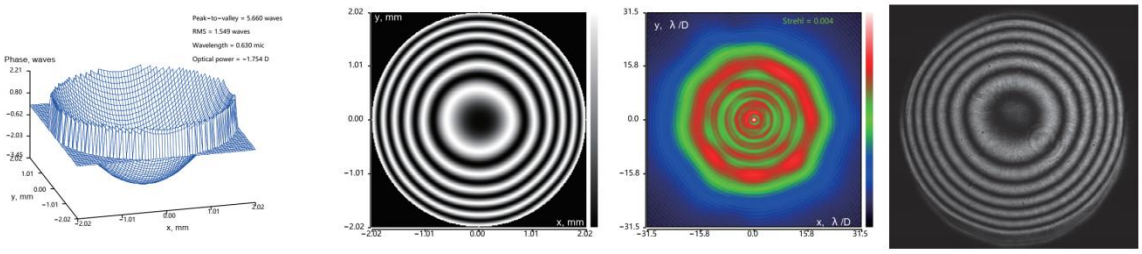


图 8. 产生振幅为 2.2 μm 的离焦 (Zernike 项 Z[2,0])

（从左到右：重建波前、模拟干涉图、模拟远场、测量干涉图）

Defocus (Zernike term Z[2,0]) of amplitude 2.2μm generated: reconstructed wavefront,simulated interferogram, simulated far field, and registered interferogram.

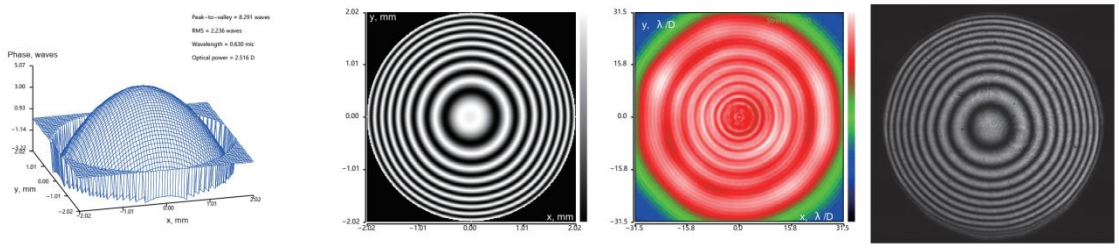


图 9: 产生振幅为−3.2 μm 的离焦 (Zernike 项 Z[2,0])

（从左到右：重建波前、模拟干涉图、模拟远场、测量干涉图）

Defocus (Zernike term Z[2,0]) of amplitude 2.2μm generated: reconstructed wavefront,simulated interferogram, simulated far field, and registered interferogram.

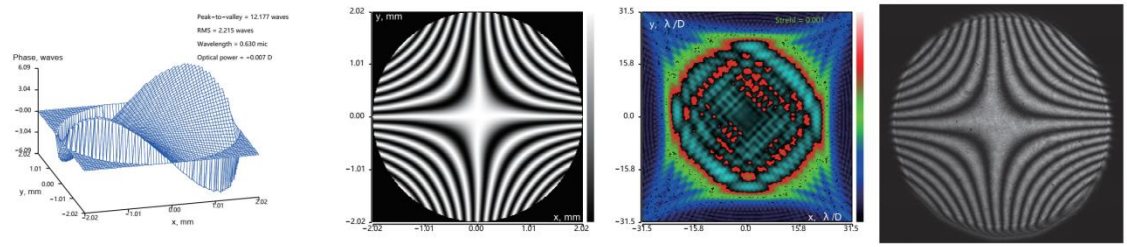


图 10: 产生振幅为 4.8 μm 的散光 (Zernike 项 Z[2,2])

（从左到右：重建波前、模拟干涉图、模拟远场、测量干涉图）

Astigmatism (Zernike term Z[2,2]) of amplitude 4.8μm generated: reconstructed wavefront, simulated interferogram, simulated far field, and registered interferogram.

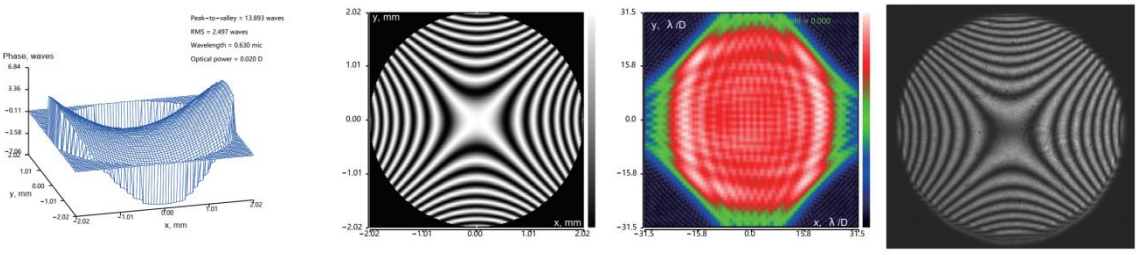


图 11. 产生振幅为−5.4 μm 的散光 (Zernike 项 Z[2,-2])

（从左到右：重建波前、模拟干涉图、模拟远场、测量干涉图）

Astigmatism (Zernike term Z[2,-2]) of amplitude −5.4μm generated: reconstructed wavefront, simulated interferogram, simulated far field, and registered interferogram.

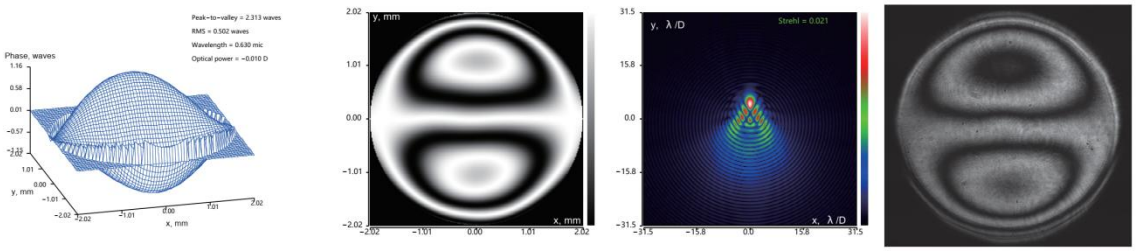


图 12. 产生振幅为 1.2 μm 的彗差 (Zernike 项 Z[3,1])

（从左到右：重建波前、模拟干涉图、模拟远场、测量干涉图）

Coma (Zernike term Z[3,1]) of amplitude 1.2μm generated: reconstructed wavefront,simulated interferogram, simulated far field, and registered interferogram.

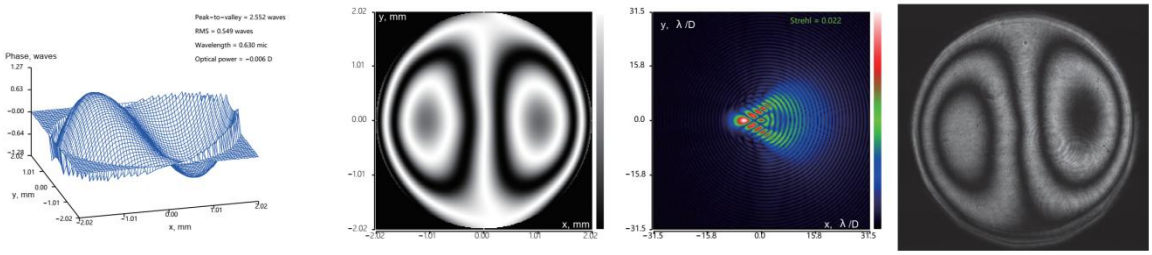


图 13. 产生振幅为 1.3 μm 的彗差（Zernike 项 Z[3,-1]）

（从左到右：重建波前、模拟干涉图、模拟远场、测量干涉图）

Coma (Zernike term Z[3,-1]) of amplitude 1.3μm generated: reconstructed wavefront,simulated interferogram, simulated far field, and registered interferogram.

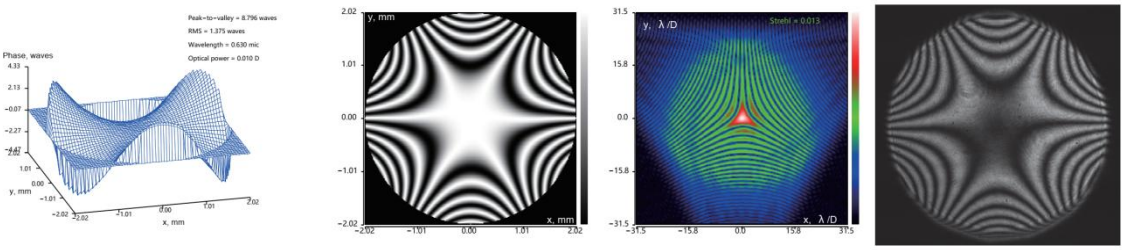


图 14. 产生振幅为 3.9 μm 的三叶形（Zernike 项 Z[3,3]）

（从左到右：重建波前、模拟干涉图、模拟远场、测量干涉图）

Trefoil (Zernike term Z[3,3]) of amplitude 3.9μm generated: reconstructed wavefront, simulated interferogram, simulated far field, and registered interferogram.

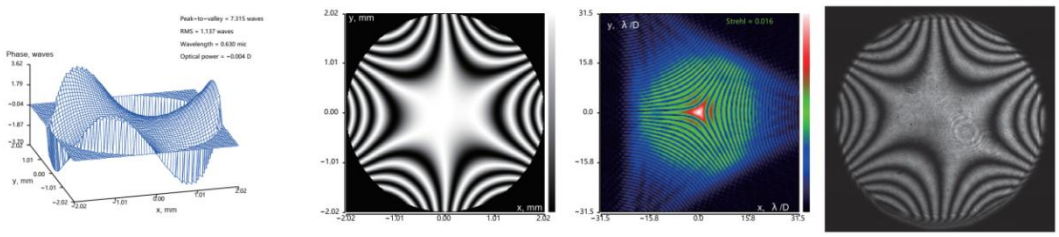


图 15. 产生振幅为 3.2 μm 的三叶形（Zernike 项 Z[3,-3]）

（从左到右：重建波前、模拟干涉图、模拟远场、测量干涉图）

Trefoil (Zernike term Z[3,-3]) of amplitude 3.9μm generated: reconstructed wavefront, simulated interferogram, simulated far field, and registered interferogram.

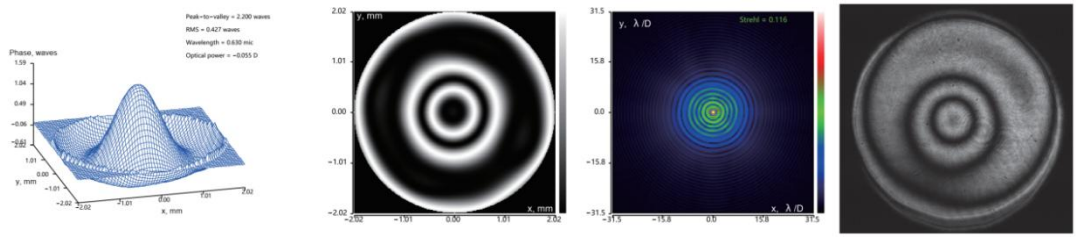


图 16. 产生振幅为 0.7 μm 的球差（Zernike 项 Z[4,0]）

（从左到右：重建波前、模拟干涉图、模拟远场、测量干涉图）

Spherical aberration (Zernike term Z[4,0]) of amplitude 0.7μm generated: reconstructed wavefront, simulated interferogram, simulated far field, and registered interferogram.

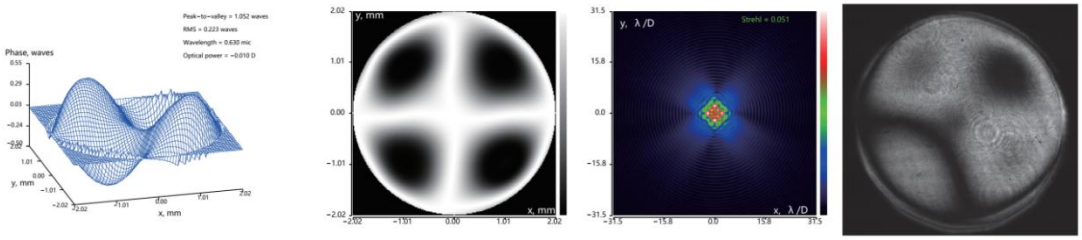


图 17. 产生振幅为 0.6 μm 的 Zernike 项 Z[4,2]

（从左到右：重建波前、模拟干涉图、模拟远场、测量干涉图）

Zernike term Z[4,2] of amplitude 0.6μm generated: reconstructed wavefront, simulated interferogram, simulated far field, and registered interferogram.

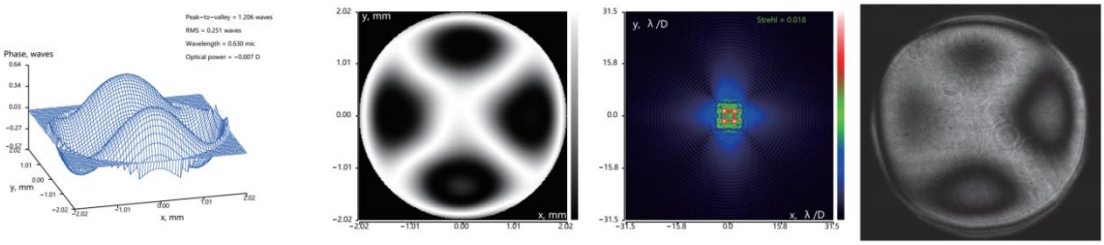


图 18. 产生振幅为 0.7 μm 的 Zernike 项 Z[4,-2]

（从左到右：重建波前、模拟干涉图、模拟远场、测量干涉图）

Zernike term Z[4,-2] of amplitude 0.7μm generated: reconstructed wavefront, simulated interferogram, simulated far field, and registered interferogram.

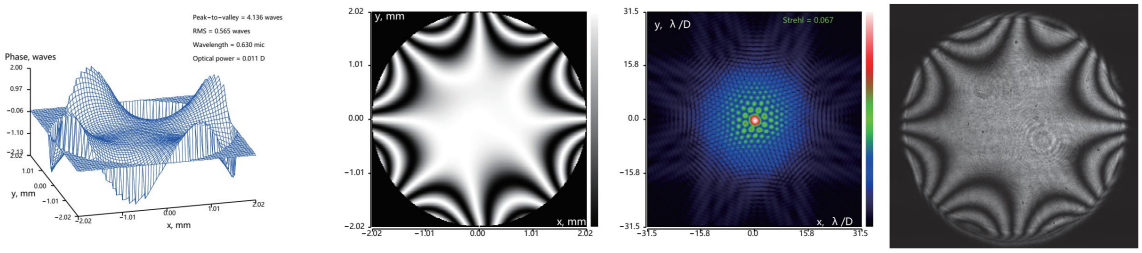


图 19. 产生振幅为 1.9 μm 的 Zernike 项 Z[4,4]

（从左到右：重建波前、模拟干涉图、模拟远场、测量干涉图）

Zernike term Z[4,4] of amplitude 1.9μm generated: reconstructed wavefront, simulated interferogram, simulated far field, and registered interferogram.

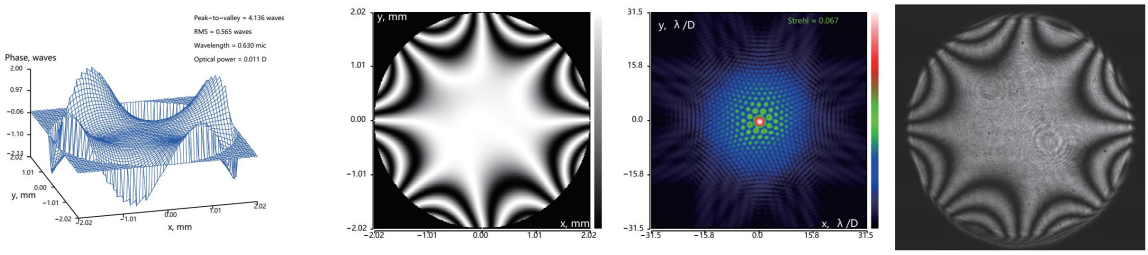


图 20. 产生振幅为 1.7 μm 的 Zernike 项 Z[4,-4]

（从左到右：重建波前、模拟干涉图、模拟远场、测量干涉图）

Zernike term Z[4,-4] of amplitude 1.7μm generated: reconstructed wavefront, simulated interferogram, simulated far field, and registered interferogram.

3. Breadboard system （面包板系统）

OKO Technologies supplies breadboard systems, which can be used as a basis for building of applied adaptive optics systems. Applications include scientific instrumentation, astronomy, ophthalmology, laser optics and optical alignment systems.

OKO 公司提供面包板 AO 系统，可作为构建应用自适应光学系统的基础。应用领域包括：科学仪器、天文学、眼科、激光光学和光学对准系统等。

Our system includes the following components:

- Deformable mirror (MMDM with up to 79 channels or PDM with up to 109 channels);
- PC interface for the deformable mirror (40-channel USB or Ethernet driver modules);
- High-voltage amplifier units for the deformable mirror;
- “FrontSurfer” WF sensor with AO loop enabled;
- All necessary cables and documentation;
- Laptop or desktop PC (optional).

OKO 的系统包括以下组件（配置可根据客户要求定制）:

- 变形镜（最多 79 个通道的 MMDM 或最多 109 个通道的 PDM）；
- 变形镜的 PC 接口（40 通道 USB 或以太网驱动模块）；
- 用于变形镜的高压放大器单元；
- 启用 AO 回路功能的“FrontSurfer”波前传感器；
- 所有必要的电缆和文件；
- 笔记本电脑或台式电脑（可选）。

OKO Technologies also offers a complete closed-loop adaptive optical system (AOS), which includes all necessary optical and mechanical components (see Figure 21). It can be used for realtime correction of optical aberrations and generation of precision wavefronts. The speed of control depends on the camera and computer; up to 500 frames per second is achieved with inexpensive IDS uEye camera with USB3 interface and a laptop computer.

OKO 还提供完整的闭环自适应光学系统（AOS），包括所有必要的光学和机械部件（见图 21）。 它可用于光学像差的实时校正和精确波前的产生。控制的速度取决于相机和电脑；使用带有 USB3 接口的廉价 IDS uEye 相机和笔记本电脑，可以达到每秒 500 帧的速度。



图 21. 完整的 37 通道 PDM 闭环自适应光学系统

Complete adaptive optical system with a 37-channel PDM.

References

[1] L. Baker. C tools for scientists and engineers. McGraw-Hill, 1989.

[2] C. Paterson, I. Munro, and C. Dainty. “A low cost adaptive optics system using a membrane mirror”. In: Optics Express 6 (2000), pp. 175 – 185.

五、光学测试平台

Optical Shop Testing Set-ups

原文：Flexible Optical B.V., The Netherlands（OKO Tech）

翻译：灵动智能光学，152 5716 7514 ,info@inspiroptics.com

Optical setup for testing of optical components with the Shack-Hartmann wavefront sensor should satisfy the following conditions:

利用 Shack-Hartmann 波前传感器测试光学元件的光学装置应满足下列条件：

The relay optics should re-image the plane of the object to the plane of the Hartmann mask (lenslet array).

该接力光学系统应将物面重新成像到哈特曼掩模平面（透镜阵列）。

The scheme should scale the beam is such a way that the image of the scaled object (wavefront) is densely filled with Hartmann sub-apertures.

该光路系统应缩放光束，使缩放对象（波前）的图像充满哈特曼子孔径。

The optics should allow for calibration. In the general case, it consists of separate measurement of the complete setup aberration with ideal object or a source of ideal wavefront,replacing the one to be tested.

该光学系统应允许校准。通常情况下，他应该可以利用理想物体或理想波前源单独测量整个装置的像差，然后再测量待测像差。

下面考虑三种典型的测量方案。

1. Testing of transmission optics （透射光学器件测试）

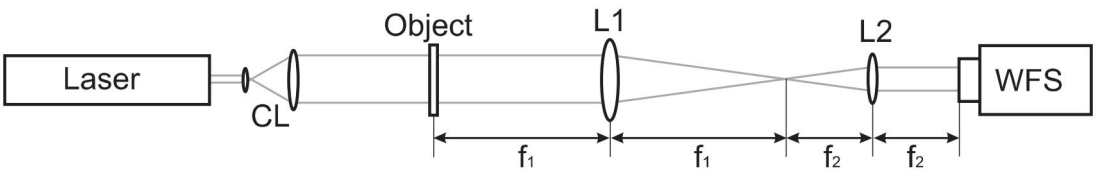


图 1. Shark-Hartmann 波前传感器测试透明光学器件的典型测量方案

（CL：准直器；L1 和 L2：焦距分别为 f1 和 f2 的透镜；WFS：波前传感器）

Typical measurement scheme for testing of transparent optics with Shack- Hartmann wavefront sensor. Here CL is a collimator; L1 and L2 are lenses with focal distances f_1 and f_2, respectively; WFS is the wavefront sensor.

A typical optical optics setup for measurement of transparent optics with Shack-Hartmann wavefront sensor is shown on Figure 1. The object under test should be placed in a collimated laser beam. A telescopic system consisting of two lenses,L1 and L2,is used to re-image the aperture of the object to the microlens array(or Hartmann mask)of the wavefront sensor. The system should scale the area to be measured to the aperture size of the wavefront sensor;the scaling factor is equal tof1/f2,where $f_1$and f_2 are focal distances of the lenses L1 and L2,respectively.

用 Shark-Hartmann 波前传感器测量透明光学器件的典型光学装置如图 1 所示。被测量物体应置于准直激光束中。由 L1 和 L2 两个透镜组成的望远镜系统用于将物体的孔径重新成像到波前传感器的微透镜阵列（或哈特曼掩模）上。系统应根据波前传感器的孔径大小缩放待测区域。缩放系数等于 f1/f2，其中 f1 和 f2 分别是透镜 L1 和 L2 的焦距。

Although ”FrontSurfer” is able to perform “absolute” wavefront measurement without any reference pattern, it is advisable to switch to the reference mode. It allows to get rid of aberrations of the relay optics, which are always present due to imperfection of the components and misalignment in the system. Reference pattern can be measured with the object removed from the setup.

尽管“FrontSurfer”软件能都在没有任何参考模式的情况下进行“绝对”波前测量，但还是建议切换到参考模式。它可以消除由于元件的缺陷和光路未完成对准而导致的光学系统像差。在测量参考图像时，被测物体应从光路中移除。

2. Testing of reflective optics （反射光学器件测试）

A typical optics setup for measurement of reflective optics is shown on Figure 2. To facilitate calibration, it is convenient to build it in a similar way to the Twyman-Green interferometer, where a beam splitter divides the incoming beam in two branches. The object is placed the in first branch behind the beam splitter, and the reference (normally a high-quality flat or spherical mirror) in the second one. The beams reflected from the object and reference are them directed to the wavefront sensor. A telescopic system similar to the one from the previous scheme (Figure 1) is used to provide conjugation between the object and WFS with proper scaling. One of the branches should always be block-the first branch for measurement of the reference pattern, and the second one for testing of the object.

反射光学测量的典型光学装置如图 2 所示。为了便于校准，可以搭建类似于 Twyman-Green 干涉仪的光路，利用分束器将入射光束分成两个分支。物体放置在分束器后面的第一个分支中，参照物（通常是高质量的平面镜或球面镜）放置在第二个分支中。从物体和参照物反射的光束入射到波前传感器中。可通过一个类似于上一个方案（图 1）的伸缩系统来实现物体和 WFS 之间的共轭，以及适当的缩放。第一个分支用于测量参考模式，第二个分支用于测量待测对象。

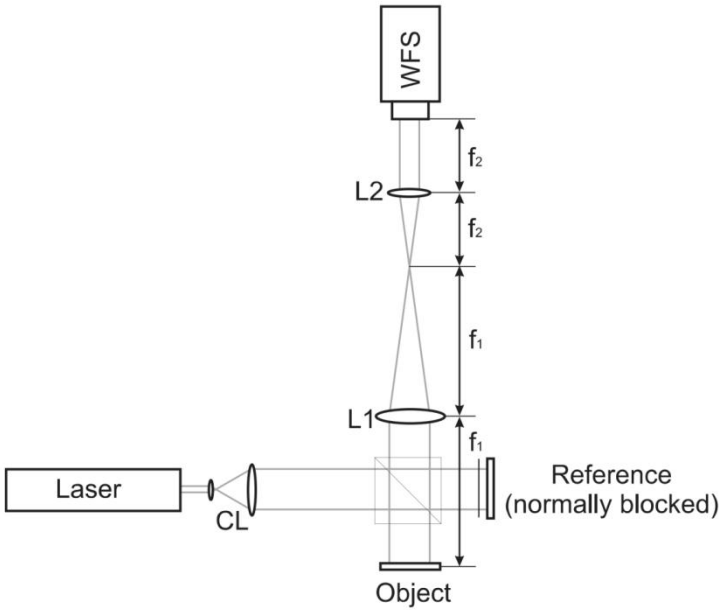


图 2. 利用 Shack-Hartmann 波前传感器测试反射光学器件的测量方案（符号参见图 1）

Typical measurement scheme for testing of reflective optics with Shack-Hartmann wavefront sensor. See Figure 1 for notations.

3. Testing of micro lenses （微透镜测试）

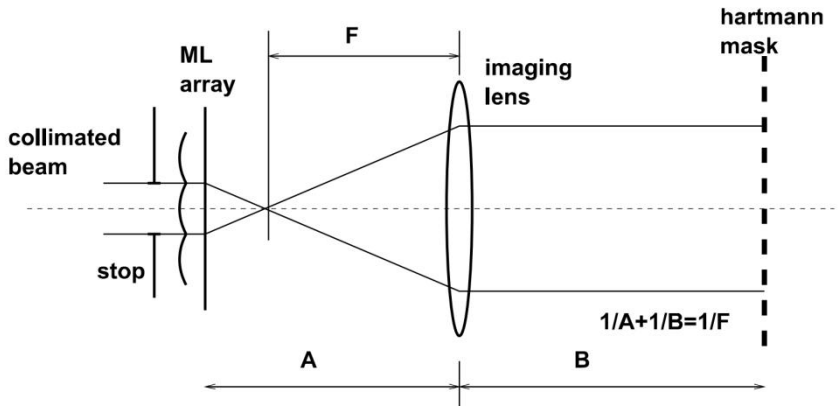


图 3. 用 Shack-Hartmann 波前传感器测试微透镜的测量方案

Measurement scheme for testing of a microlens with Shack-Hartmann wavefront sensor.

An example of a relay system designed to measure the aberrations of a microlens for fiber coupling applications is shown in Figure 3. In this case the microlens has a small diameter (1 mm) compared to the Hartmann mask aperture (4 mm). A telescope formed by the microlens itself and the imaging lens is used to couple the microlens aperture to the sensor mask.The Hartmann mask is co-incident with the microlens image.

图 3 是一个光学系统的例子，该系统用于测量光纤耦合应用中微透镜的像差。在这种情况下，与哈特曼掩模孔径（4 mm）相比，微透镜的直径较小（1 mm）。由微透镜本身和成像透镜所形成的望远镜用于将微透镜孔径耦合到传感器掩模。哈特曼掩模与微透镜图像处于同一位置。

Calibration of the setup consists of two steps:
校准包括两个步骤：

(1) Obtaining of an ideal reference.
获得理想的波前参考。

(2) Calibration of the imaging microlens.
校准成像微透镜。

In the first step we ensure that the aberration of the illuminating beam is negligible over the aperture of the microlens. In the simplest case this can be achieved by illumination of the microlens with slightly divergent wavefront produced by a remote pinhole source. If there are no optical components between the pinhole and tested microlens, we can be sure the illumination wavefront is close to ideal.

在第一步中，我们确保在微透镜的光圈上照明光束的像差可以忽略不计。在最简单的情况下，这可以通过用远程针孔源产生的略微发散的波前照明微透镜来实现。如果针孔与被测微透镜之间没有光学元件，则可以确定照明波前接近理想。

In the second step, we place another pinhole in the focus of the microlens. By doing that we eliminate all aberration of the setup, except for the aberrations introduced by the imaging lens,to

be able to measure the aberration of the relay optics only.

在第二步中，我们在微透镜的焦点上放置另一个针孔。这样可以消除成像透镜像差之外的所有像差，以便能够只测量接力光学元件的像差。

In the last step, we remove the pinhole and measure the total aberration. To obtain the aberration of the microlens, the aberration of the imaging setup measured at step 2 should be extracted from the measurement result.

最后，我们去除针孔并测量总像差。为了获得微透镜的像差，应该从测量结果中去掉在第二步测量的成像装置的像差。

In this example we have used slightly divergent wavefront instead of collimated. This does not introduce any significant problem if the radius of curvature of wavefront is much larger than the focal length of the microlens under test. If the lens has focal length of 4mm and point source is placed at 1m from the lens, spherical aberration introduced by “wrong” illumination is negligible. Nevertheless, it is always advisable to check expected aberrations using ray-tracing code.

在这个例子中，我们使用了略微发散的波前而不是准直的波前。如果波前的曲率半径远大于被测微透镜阵列的焦距，则不会出现问题。如果透镜的焦距为 4 mm，并且点光源距透镜 1 米，那么由“错误”照明引起的球差可以忽略不计。无论如何，我们还是建议使用光线跟踪代码来检查期望的像差。

4. Optical conjugation （光学共轭）

The input pupil of the WF sensor should be optically conjugated with the pupil of the optical system. Conjugated is achieved by placing the sensor input in the image of the pupil. If the sensor is positioned outsider of the pupil image, any aberrations in the pupil will cause geometrical beam distortions in the sensor input, important: wrong conjugation is the cause of numerous disappointments with WF measurement.

通过将波前传感器放置于光学系统入瞳的图像位置，实现传感器的输入光瞳与光学系统入瞳的光学共轭。如果传感器位于瞳孔图像之外，则入瞳中的任何像差都会导致传感器输入中的几何光束畸变，从而导致测量错误。因此，入瞳共轭非常重要：共轭错误会使波前测量的结果不尽人意。

Usually the conjugation is achieved with an afocal telescope, formed by two positive lenses with focal lengths F1 and F2,respectively.

通常共轭是通过无焦望远镜实现的，无焦望远镜由两个焦距分别是 F1 和 F2 的正透镜组成。

The coupling telescope reduces the transversal dimension of the light beam by a factor(F1/F2), and magnifies all ray angles with the same factor, thus preserving the geometrical of aberration Δ . For the input aberration represented by a parabola $\Delta(a)=a^2/2R$ where a is the radial coordinate and R is the radius of curvature, the F number FN is defined as R/A, where A is the semi-diameter of the input pupil. Expressing the F number in terms of aberration amplitude, we obtain $FN=A/(2\Delta)$. If the aperture is reduced M times by the coupling telescope, the F number of the beam is also reduced M times.

耦合望远镜将光束的横向尺寸减小一个因子（F1/F2），并以相同的因子放大所有光线角度，从而保持像差的几何振幅Δ。对于以抛物线$\Delta(a)=a^2/2R$ 表示的输入像差，其中 a 是径向坐标，R 是曲率半径，F 数 FN 定义为 R/A，其中 A 是输入光瞳的半径。用像差振幅表示 F 数，得到 $FN=A/(2\Delta)$。如果耦合望远镜使孔径减小 M 倍，光束的 F 数也减小 M 倍。

Scaling of the F number imposes serious practical restrictions on the range of optical powers that can be controlled by the sensor. The practically acceptable range of F numbers is always limited by the complexity and aberrations of the telescope optics While F numbers in the range between infinity and 10 are easily achievable with single lenses and achromatic doublets, the range between 10 and 3 calls for a somewhat mere complicated optics and, finally, the range between 3 and 1 can be very expensive and also very difficult to correct for intrinsic aberrations.

F 数的缩放对可由传感器控制的光功率范围施加了严重的实际限制。实际可接受的 F 数范围总是受到望远镜光学系统的复杂性和像差的限制。虽然使用单透镜和消色差双透镜很容易获得无穷大到 10 之间的 F 值，但 10 到 3 之间的范围需要更复杂的光学系统；最后，3 到 1 之间的范围可能非常昂贵，而且很难校正固有像差。

It follows from Fig. 4 that the F number of the wavefront at the telescope input should be considerably smaller than (FN/M) where FN is the F number of any of two lenses forming the coupling telescope-assuming that both components of the telescope have equal F number - and M is the telescope magnification. Finally, both the wavefront curvature and the wavefront tilts should not exceed the specifications of the sensor at the input pupil of the sensor.

从图 4 可以看出，望远镜输入处波前的 F 数应明显小于（FN/M），其中 FN 是构成耦合望远镜的两个透镜中任意一个透镜的 F 数（假设望远镜的两个组件具有相等的 F 数），M 是望远镜的放大倍数。最后，在传感器的输入光瞳处，波前曲率和波前倾斜都不应超过传感器的规格。

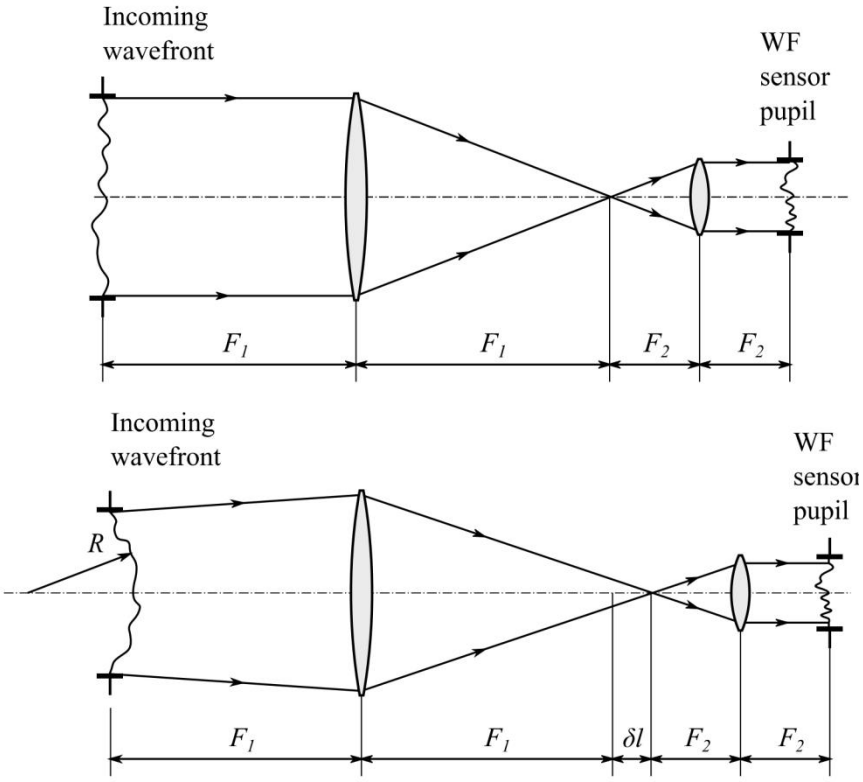


图 4. 零曲率的无焦望远镜中 WF 的缩放（上），以及非零曲率的补偿（下）。其中 $\delta l=\frac{F_1^2}{R}$。

Scaling of the WF in an afocal telescope with zero WF curvature(top),and compensation for a non-zero curvature (bottom).Here $\delta l=\frac{F_1^2}{R}$.

4.1. Compensation of the curvature 曲率补偿

To secure the maximum measurement range for higher-order aberrations, the input of wavefront sensor have zero spherical term. To compensate for the sphericity of incoming wavefront, a calibrated spherical or parabolic phase shift could be added to the wavefront at the input of the telescope. This can be achieved by using a pinhole as a source of diverging in the diffraction angle 1/FN.To satisfy this condition, d_p should satisfy to d_p-FN*2.44 λ.

为了保证高阶像差的最大测量范围，波前传感器的输入应该具有零球面项。为了补偿入射波前的球形度，可以在望远镜的输入端对波前加一个校准的球面或抛物线相移。这可以通过使用针孔作为发散球面波的源来实现。针孔直径 d_p 应产生衍射角为 1/FN 光束发散角。为了满足这个条件，d_p 应该满足 d_p-FN*2.44 λ。

Also, the WF curvature in the input pupil of the sensor can be compensated by changing the distance between the lenses of the telescope, preserving the position of the input pupil in the front focus of the first lens, and keeping the point of ray convergence in the front focus of the second lens. Under these conditions, the shift of the first lens is given by $\delta l=F_1^2/R$. It is easy to see that such a compensation does not change the pupil magnification (F_1/F_2), however it can result in additional(spherical) aberration introduced into the wavefront.

此外，传感器的输入光瞳中的 WF 曲率可以通过改变望远镜的透镜之间的距离来补偿，保持输入光瞳在第一透镜的前焦点中的位置，并且保持光线会聚点在第二透镜的前焦点中。在这些条件下，第一个透镜的位移由 $\delta l=F_1^2/R$ 给出。很容易看出，这种补偿不会改变瞳孔放大率（F1/F2），但是它会导致额外的（球面）像差引入波前。

The easiest practical way to achieve such a compensation consists the wavefront sensor, together with the second lens of the telescope, on a moving stage with movement range of at least ($\pm F_1^2/R_{min}$), where R_{min} is the shortest expected radius of curvature of the input WF. In the case, to accommodate for the possible range of the input wavefront curvatures, he physical diameter of the first lens should be increased by at least ($R_{min}+F_1$)/(R_{min}) .

实现这种补偿的最简单实用的方法是将波前传感器与望远镜的第二个透镜一起安装在望远镜上移动范围至少为($\pm F_1^2/R_{min}$)的移动台，其中 R_{min}是输入 WF 的最短预期曲率半径。在这种情况下，为了适应输入波前曲率的可能范围，第一透镜的物理直径应至少增加 (Rmin+F1)/(Rmin)。

4.2. Thermal stability consideration 有关热稳定性的考虑

Some camera models, particularly those with higher maximum frame rate are known to product appreciable amount of heat. Due to thermal expansion the size of the image sensor changes with the temperature increase. Thus, pixel pitch either nominal or measured during calibration might not be accurate anymore. To illustrate the Fig. 5 (top) shows typical aberration introduced by thermal expansion after changing the temperature of CMV4000 imaging chip from 30℃ to 50℃. As can be predicted main aberration type is defocus, it is measured about one order of magnitude higher than others. The measured error of radius of curvature relates linearly to the temperature of wavefront measurements, especially in absolute mode the is advised to keep the temperature of the camera as constant as possible.

某些相机，特别是帧率高的相机，在工作过程中会产生大量的热量。图像传感器尺寸会由于热膨胀随着温度的升高而变化。因此，正常的或校准期间测量的像素间距可能不在准确。为了说明这种效果，图 5（上）显示了将 CMV4000 成像芯片的温度从 30 ℃改变到 50 ℃后，热膨胀引起的典型像差。可以预测，主要像差类型为离焦，测量值比其他像差高出一个数量级。曲率半径的测量误差与温度呈线性关系，如图 5（下）所示。为了达到波前测量的最终精度和可重复性，特别是在绝对模式下，建议用户尽可能保持相机的温度恒定。

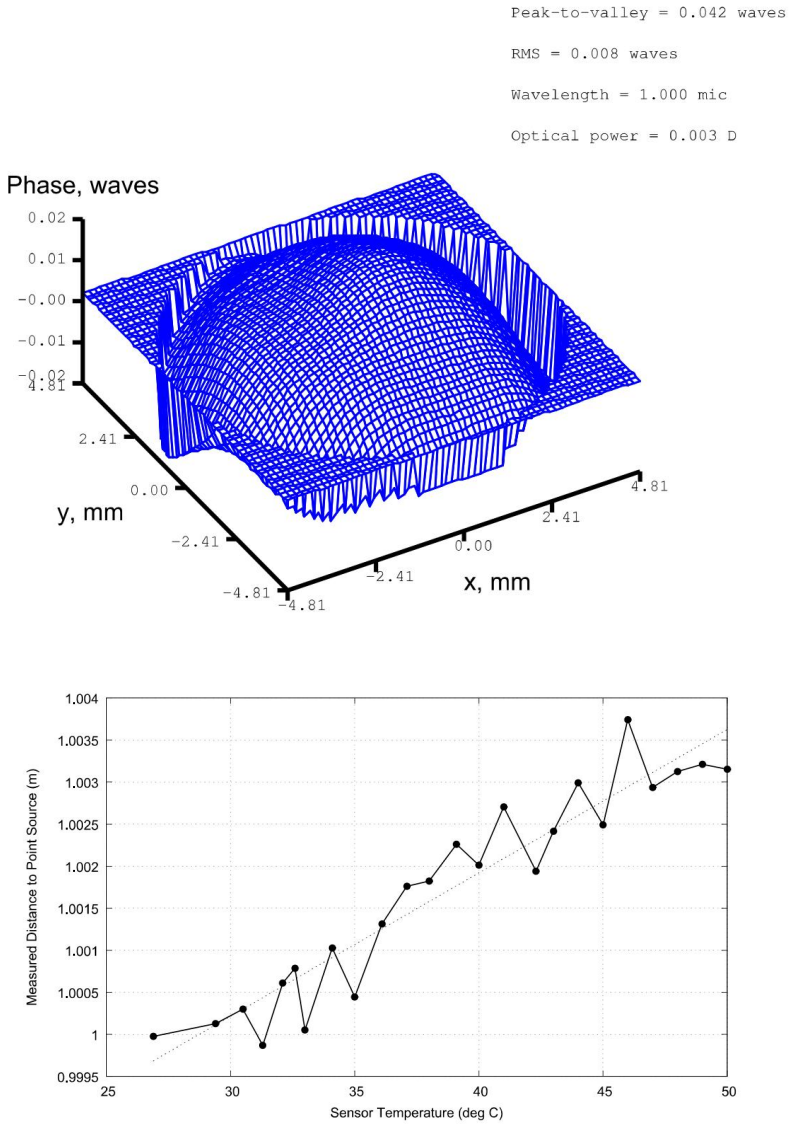


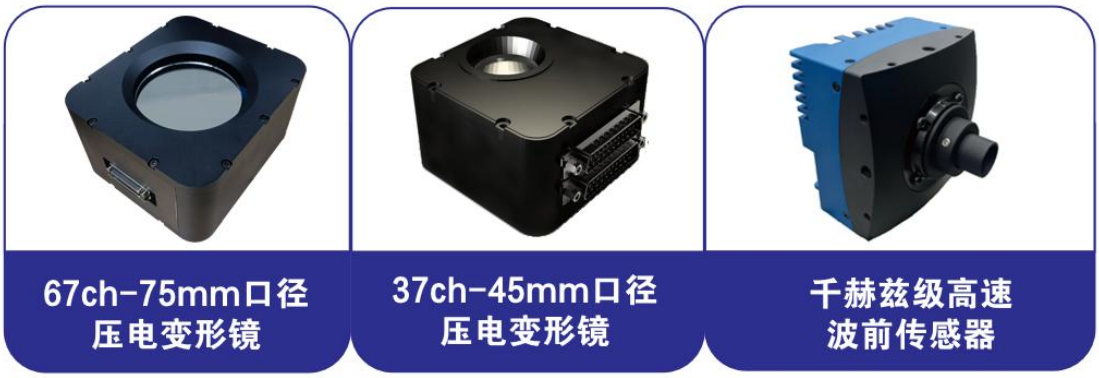
图 5. 图像传感器热膨胀对波前测量的影响。上：由于 CMOS 传感器温度从 30 ℃改变到 50 ℃而引起的假散焦；下：观察到的点源距离随着图像传感器温度的变化而变化。

Effect of image sensor thermal expansion on wavefront measurement. Top: spurious defocus caused by increase of the CMOS sensor temperature from 30℃ to 50℃. Bottom: observed change in distance to a point source with the change of the image sensor temperature.

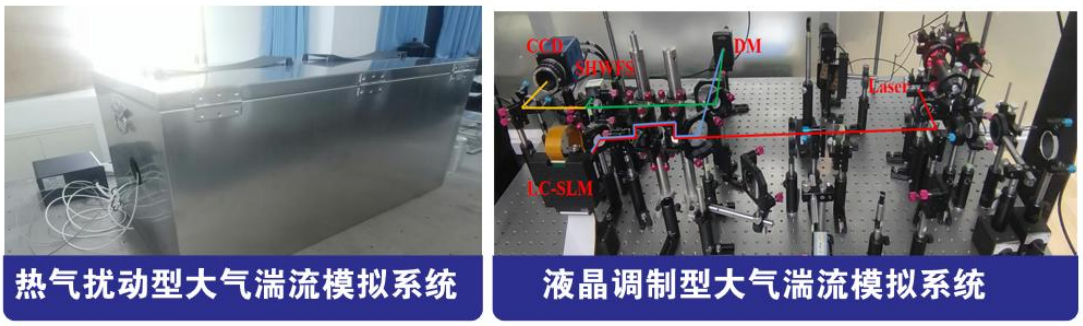
六、自研产品及应用案例

产品介绍

灵动智能光学立足于高端精密光学领域，自研产品主要包括：压电堆栈变形镜、高速 SH 波前传感器、热风扰动型大气湍流模拟系统、液晶调制型大气湍流模拟系统、嵌入式自适应光学系统。







1. 压电变形镜

灵动智能光学立足于高端精密光学领域，自研的压电变形镜利用压电执行器伸缩带动镜面产生形变，可通过改变压电执行器阵列的电压组合从而使镜面产生不同形变，可应用于高功率激光系统、天文观测、成像系统等领域。



75 mm 口径 67 通道



50 mm 口径 37 通道



35 mm 口径 37 通道

主要特点：

- 多通道；
- 快速响应；
- 高精度校正；
- 高可靠性；
- 易集成；
- 应用广泛。



灵动自研压电堆栈变形镜典型阶跃响应

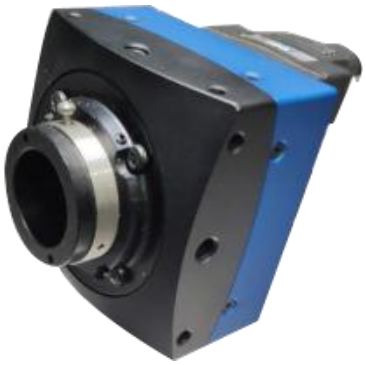
性能指标：

型号	LD-DM67-75	LD-DM37-45	LD-DM19-20
有效口径	75 mm	45 mm	20 mm
执行器数目	67	37	19
可矫正像差类型	Zernike 前 20 项	低阶像差	
镜面镀膜	保护铝		
最大形变量	20 μm （光学调制量：40 μm）		
工作带宽	不低于 550 Hz		
展平精度	优于 25 nm		

注：产品可按照客户需求接受定制

2. 高速 SH 波前传感器

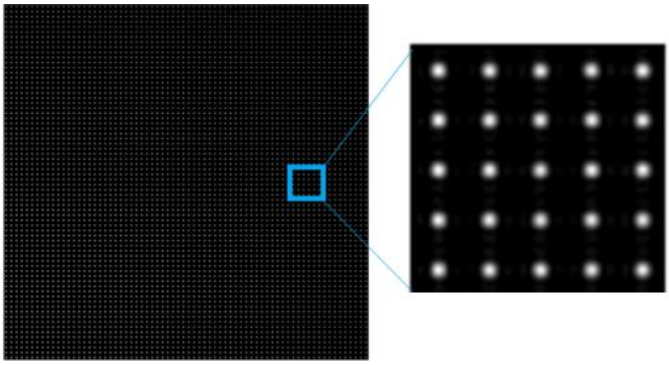
为满足不同领域对于高空间分辨率、高灵敏度、高速波前测量的要求，我们自主研发了高性能 Shack-Hartmann 波前传感器（S-H WFS）系列。标准产品性能指标如下表所示，也可根据用户的需求进行定制，选择不同的子孔径数量、子孔径间距、光谱波段范围、波前测量频率等。



高速 SH 波前传感器



波前处理：FPGA 高速板卡



微透镜个数：50 * 50

特点：

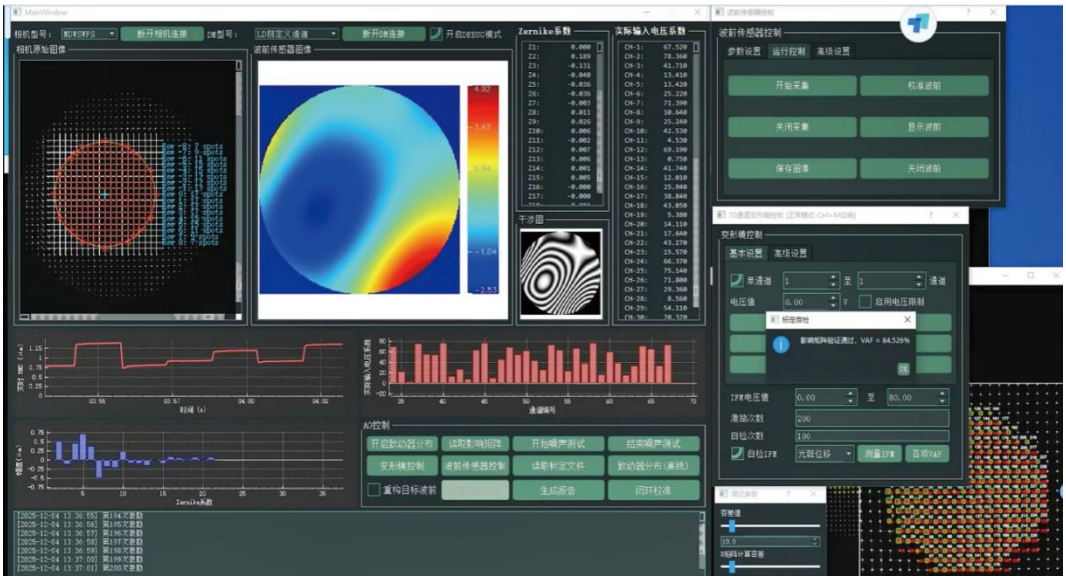
●高空间分辨率 ●高速波前测量 ●高灵敏度 ●易于集成 ●应用广泛

性能指标：

采样频率	2 kHz
相机分辨率	512 * 512
微透镜尺寸	110 μm
微透镜个数	65 * 65
相机接口	CXP
波前处理机	基于 FPGA 的高速波前处理机
显示	波前测量结果实时显示

注：产品可按照客户需求接受定制

3. 自适应光学系统闭环软件



闭环软件控制界面

核心特点：

(1) 可视化实时显示及输出：

- 波前传感器原始图像
- 波前测量结果（热力图、干涉图）
- 波前 Zernike 系数（数值显示+柱状图）
- 波前畸变 RMS 时间曲线
- 变形镜控制电压（数值显示+柱状图）
- 系统状态日志；

(2) 可集成不同品牌、型号的变形镜及波前传感器（或相机）；

(3) 可实现网络远程控制；

(4) 可集成至用户系统。

适用领域：天文观测、生物医学成像、激光领域、精密光学检测

4. 大气湍流模拟系统

4.1 热风扰动型大气湍流模拟系统

热风扰动型大气湍流模拟系统主要通过热风扰动来模拟外场实际受到的大气湍流干扰效果。研究大气湍流对光学成像、空间光通信、气象学、环境科学等领域的影响具有重要影响。





工作原理示意图

基本原理：热风对流式的大气湍流模拟。

使用方法：激光光束通过该湍流模拟系统，可观察到受大气湍流扰动的光斑起伏、闪烁等现象，模拟与在外场实际受到的大气湍流干扰。

湍流调节方式：加热温度调节、风速调节。

应用场景：激光大气传输、无线激光通信、高功率激光传输、望远镜成像等。

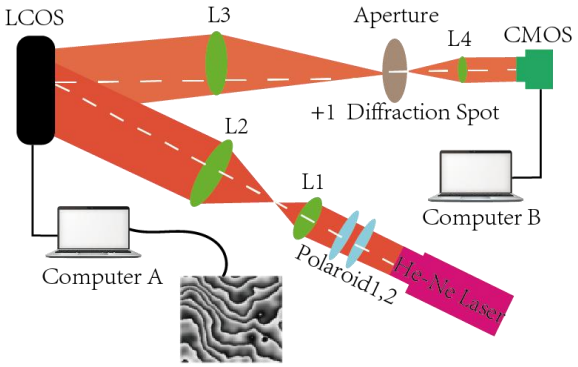
技术指标：

参数内容	数值
通光口径	直径 80 mm（可定制）
湍流模拟器长度	≥ 600 nm
风速	≤ 5 m/s（可调）
相干长度	1 - 20 cm@550 nm（可调）
工作波长	0.4 - 2 μm
通光口径中心高	250 mm
电源	220 V
尺寸	500 * 500 * 1000 mm
重量	20 kg

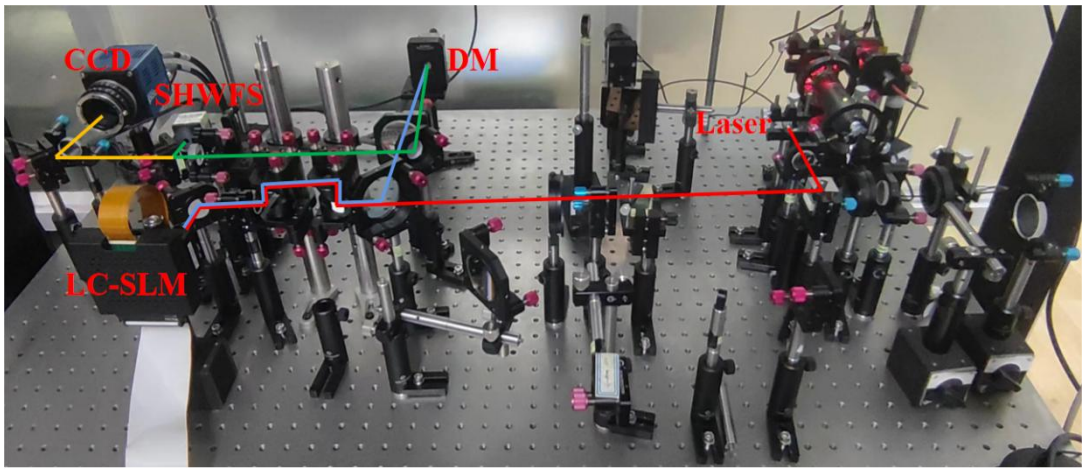
*如果需要模拟大气吸收效应等的影响，可以对通光窗口进行密封，并增加相应的设备。

4.2 液晶调制型大气湍流模拟系统

采用液晶光阀（LCOS）改变光束波前，定量模拟大气湍流、高功率激光的热晕等引起的效应，输入参数即可配置湍流特性，可对海拔高度、仰角、传输距离、时间以及地点等参数进行设置，输出结果可监测、可与理论值比较。



工作原理示意图



液晶调制型大气湍流模拟系统应用光路

主要特点：

- 空间分辨率高；
- 定量参数调节；
- 可编程控制；
- 可视化展示效果。

应用领域：

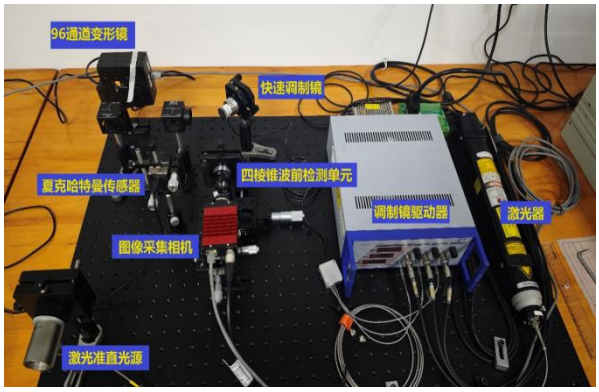
- 各种地基光学望远镜；
- 星载望远镜；
- 大气信道激光系统的功能验证及性能测试等。

性能指标：

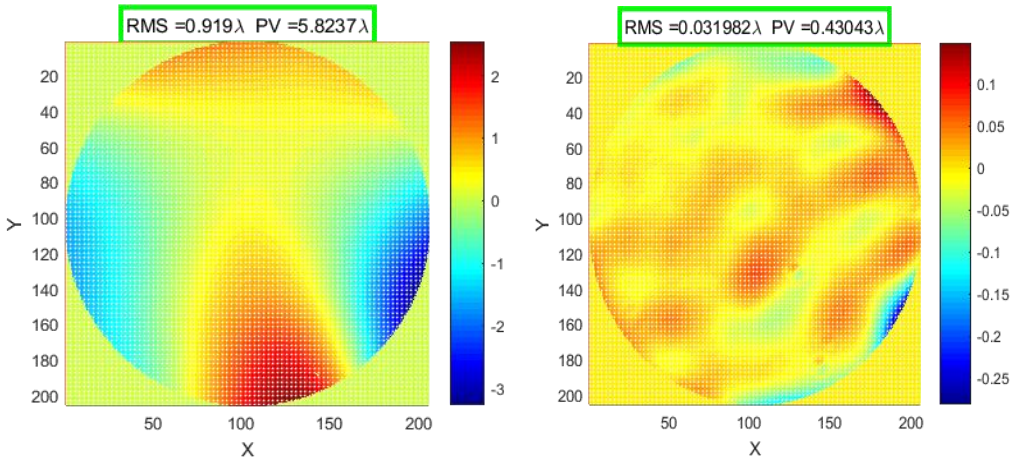
参数内容	数值
像素数	512 * 512
像素尺寸	15 * 15 um
模拟距离	20 - 90 km
填充因子	＞ 90%
大气相干长度	＞ 5 cm
面板尺寸	7.68 * 7.68 mm
Greenwood 频率	＜ 100 Hz
有效通光孔径	7.68 * 7.68 mm

5. 嵌入式自适应光学系统

以 ARM +GPU 作为嵌入式多核处理硬件架构，兼容以太网口、USB 和串口等多种接口方式，一体化实现高帧频相机图像采集、信号提取、波前相位重构、微型变形镜控制及上位机通信等功能。通过基于实时操作系统环境的并行多线程算法，可实现波前信号高速处理与千赫兹闭环校正带宽，并提供基于 Qt 图形框架跨平台开发的友好用户界面。



嵌入式自适应光学系统光路



微型自适应光学系统校正波前像差结果：（左）校正前，（右）校正后

特点：

- 外观紧凑；
- 高速闭环；
- 配置灵活的优点。

应用领域：

- 医学眼科影像；
- 空间光学遥感；
- 野外天文观测等领域。

变形镜规格	OKO PDM-96 压电变形镜
通光口径	≤ 25.4 mm
四棱锥波前传感器子孔径采样数	256*256*4
嵌入式平台	NVIDIA Jetson Nano
闭环带宽	≥ 200 Hz
面形校准残差 RMS	≤ 1/20 波长
波前检测+处理器外形尺寸	25 * 18 * 20 cm
人机交互	触摸屏
操作系统+图形开发环境	Ubuntu 18.04 LTS+Qt5.2

*可以根据用户应用需求，灵活选择不同种类与规格的波前传感器、成像探测器及变形镜等光电器件。

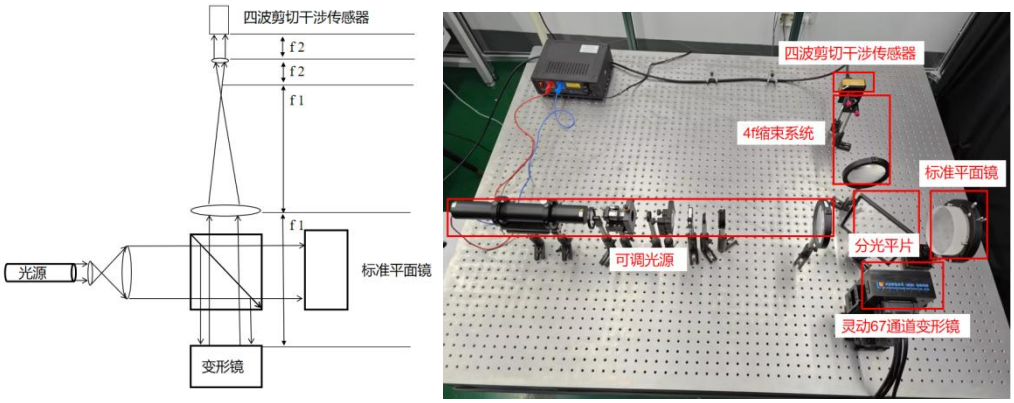
6. 应用案例

我们已与多家国内科研机构及重点高校建立了深入合作，提供了多套全国产自研的高性能自适应光学演示系统和天文观测系统。这些系统已成功应用于前沿光学教学实验及关键算法验证。

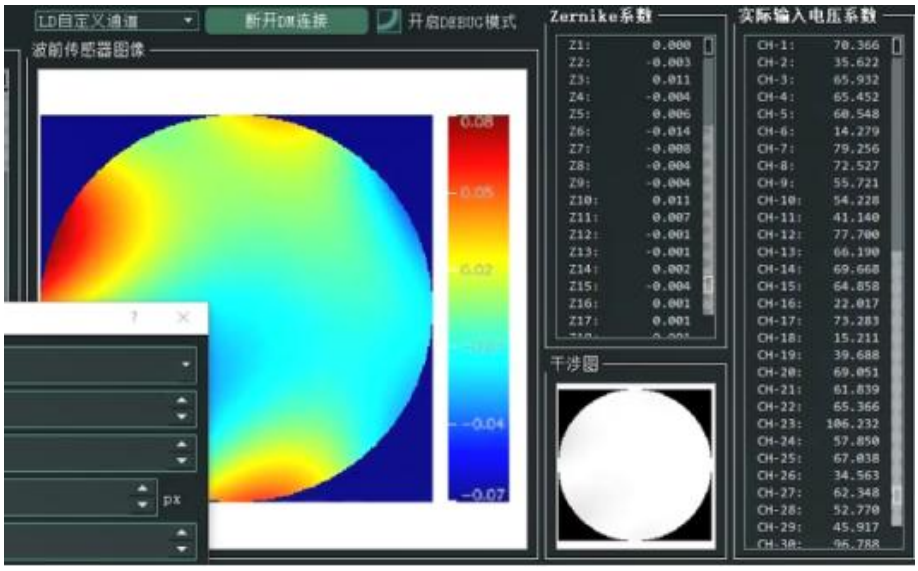
典型案例系统如下所示：

1. 灵动 67 通道变形镜高精度自适应光学系统

灵动 67 通道变形镜高精度自适应光学系统集成了灵动自研的 67 通道压电堆栈变形镜与国产四波剪切干涉传感器，可实现 2 nm 的位移调控幅度。

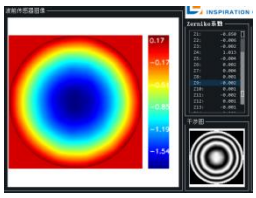
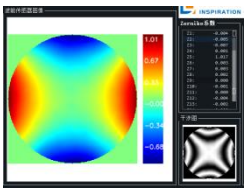
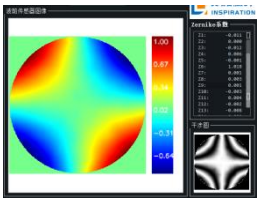
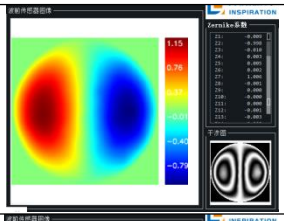
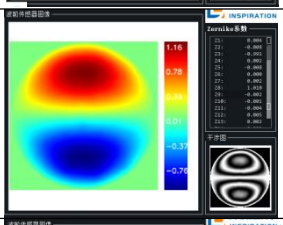
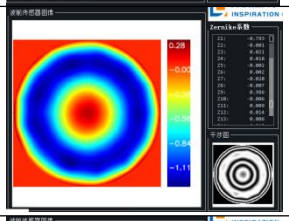
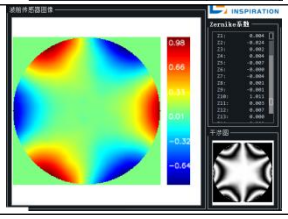
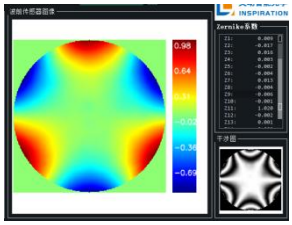


灵动 67 通道变形镜高精度自适应光学光路及系统实物图

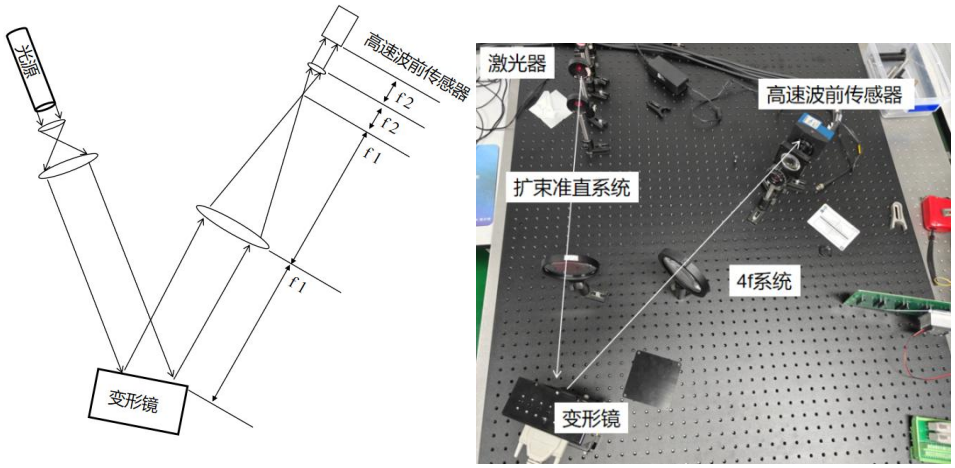


系统闭环展平结果

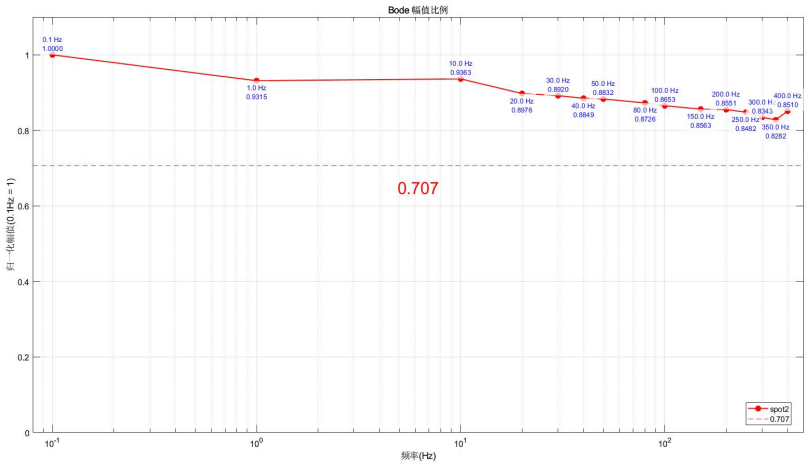
像差拟合结果

Zernike 项数（NOLL 编号）	名称	像差拟合结果	结果误差比
4	离焦		0.66%
5	0 度像散		0.87%
6	45 度像散		4.12%
7	慧差（x）		1.16%
8	慧差（y）		0.97%
9	球差		3.77%
10	三叶草（斜）		2.93%
11	三叶草（正）		2.40%

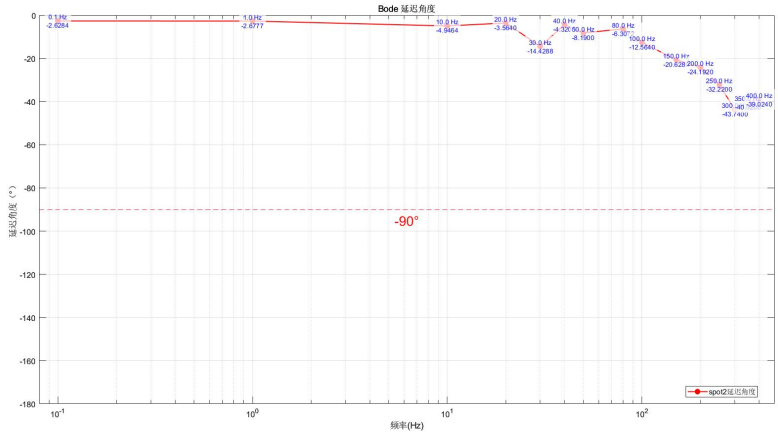
2. 灵动变形镜高速波前模拟系统



该系统由灵动自研 67 通道压电堆栈变形镜与高速波前传感器构成。实测结果表明，在 >500 Hz 的工作条件下，系统幅值衰减优于 -3 dB，相位延迟 <45°，能够满足高速湍流像差模拟需求。



幅值衰减 Bode 图



相位延迟 Bode 图

七、荷兰 OKO 公司

产品介绍

OKO 公司简介：

荷兰 OKO 公司（全名 Flexible Optical B.V.，又称 OKO Tech）创建于 1997 年，在自适应光学领域有较长的历史和积淀。

该公司产品主要包括：微机械薄膜变形镜（MMDM）、压电变形镜（PDM）、Shack-Hartmann 波前传感器、波前分析和闭环控制软件 Frontsurfer，以及全套闭环自适应光学系统等。

MMDM 是公司的特色产品，性价比较高，自公司创立之初销售至今，已经被广泛用于天文、激光、显微等领域。PDM 可用于大幅度畸变的校正、以及高功率激光的畸变校正，可承受高达 15 kW 的光功率负载，适用于高能激光领域。

在 OKO 公司网站（http://www.okotech.com/publications）还列举了国际上使用 OKO 公司变形镜发表的大量学术论文和研究成果，其产品质量和用户评价可见一斑！

OKO 主要产品：

1. MMDM（微机械薄膜变形镜）

- 圆形镜面，口径：10/15/25.4/30/40/50 mm，执行器数量：1/17/37/39/59/79/96，中心最大形变量：10 μm-30 μm，可集成二维快反平台，承载激光功率：3 W-1 kW；
- 线性镜面，尺寸：11×39 mm，执行器数量：19/38，中心最大形变量：10 μm，可集成二维快反平台。

2. PDM（压电陶瓷变形镜）

- 圆形，口径：30/50 mm，执行器数量：18/19/37/79/109，单执行器最大形变量：8 μm，可集成二维快反平台，表面最大承载激光功率：15 kW；
- 线性，尺寸：11×55 μm，执行器数量：20，单执行器最大形变量：8 μm，可集成二维快反平台。

3. 波前传感器

a) 微透镜阵列（排列：六边形/正交，间距：30-2200 μm，焦距：0.04 mm-209 mm，光学填充率：99%）；

b) 相机（帧率：20 fps-1500 fps，可根据用户需求定制选取）。

4. Frontsurfer 波前分析控制软件

c) Shack-Hartmann 波前测量、波前重构、波前分析；

d) 远场光斑仿真分析；

e) 变形镜校准、实时闭环控制（闭环处理速度：20-1500 Hz）。

5. 其他软件

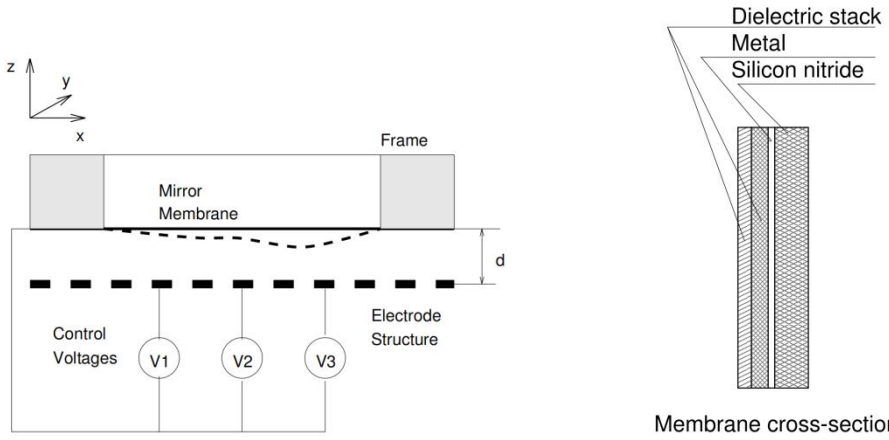
- Zernike Commander：Zernike 曲面模拟和可视化；
- Still：湍流环境下的图像稳定、目标跟踪、多帧集成、多帧去卷积处理软件；
- BeamTuner：激光光斑优化软件；
- LightPipes：光束传输仿真工具箱（可在 Matlab，MathCAD 环境下使用）；
- ZemaDLL：Zemax 环境下的动态链接库，可在 Zemax 环境下仿真 MMDM, PDM 等；
- MiZer：控制 OKO 变形镜产生 Zernike 形变。

6. 闭环自适应光学系统

- 主要包含：变形镜+驱动器+波前传感器+Frontsurfer 闭环控制软件；
- 也可包含面包板及配套光学元件，出厂校准；
- 闭环处理速度：20 Hz-1.5 kHz（取决于所选相机帧率）。

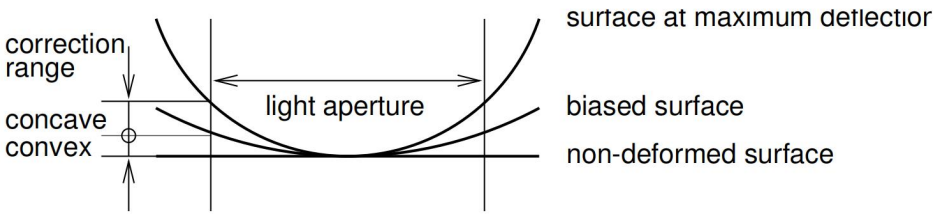
1. 微机械薄膜变形镜(MMDM)

结构：MMDM 一般采用金属薄膜作为镜面材料，通过微机械加工（MEMS）工艺制成，因此又称 MEMS 变形镜。薄膜的边缘固定在周围的框架结构上，薄膜下方有控制电极（见下图）。薄膜一般具有多层结构，主要包括电介质层(Dielectic stack)、金属层(Metal)、氮化硅层(Silicon nitride)等。厚度一般为 0.5-10 μm，直径为 5-50 mm。



工作原理：当在薄膜下方的电极上施加电压时，电极和薄膜之间产生静电吸引（Eletro-static attraction），从而导致薄膜发生形变。如果在所有的电极上施加相同的电压，则薄膜会产生球形的形变（球形凹陷）。在不同的电极上施加不同电压（即不同的电压组合），则可以使薄膜产生不同的形变。

偏置控制（双向变形）：由于电极与薄膜之间只存在吸引力而不能产生排斥力，因此薄膜只能朝着电极的方向产生形变（即凹面形变），而不能产生凸面形变。在实际使用过程中，为了使薄膜产生双向变形（能凹能凸），通常在校准光路的时候给变形镜先施加一个偏置电压（如下图所示），使变形镜产生偏置形变，这样变形镜就可以此为基础产生凹凸变形。



控制精度：薄膜变形镜不存在滞环（即 Hysteresis，又称滞洄、磁滞效应），形变重复性较好。根据控制电压和形变之间的定量关系，可以实现镜面形变的高精度控制，可用于前馈控制系统（无反馈控制）。

电功耗：由于薄膜变形镜仅靠静电吸引产生形变，驱动电流极小，因此虽然驱动电压达到上百伏，但消耗的电功率较低。实验中曾测量到 40 通道的 MMDM 在工作模式下功耗不超过 1 W。

规格型号：OKO 公司生产的薄膜变形镜主要规格如下表所示。中心最大形变量一般在 10 -30 μm。

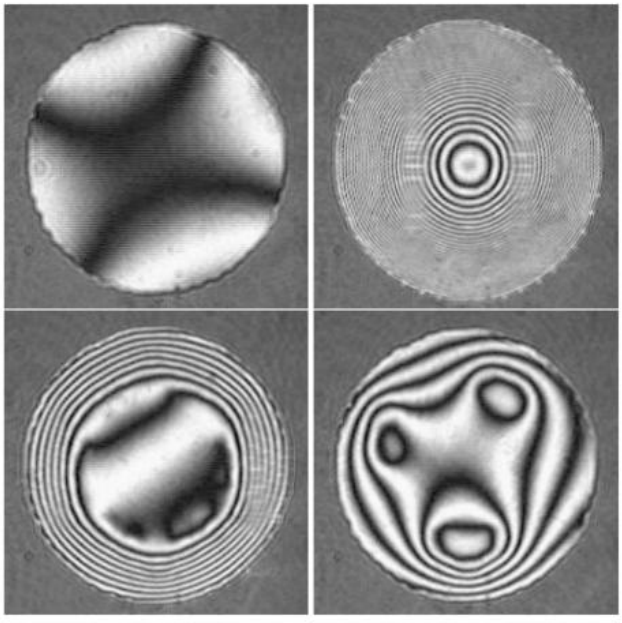
产品型号	孔径大小	通道数	特点	应用
MMDM 10-1-focus	5/10 mm	1	用于离焦(Defocus) 校正焦距： 无穷远～50 cm	快速离焦校正
MMDM 15-37	15 mm	37	OKO 经典款 DM：诞生于 1997 年，到目前使用最普遍的一款变形镜	对激光、望远镜、眼科、显示、成像光学系统的低阶动态波前畸变进行快速校正， 如： 离焦(Defocus)， 散光(Astigmatism)， 慧差(coma)等
MMDM 15-17-TT	15 mm	17 (DM) +2 (Tip-tilt stage)	一款特殊的 DM： 自带压电偏转台 （Tip-tilt stage）	
MMDM 30-39/59/79	30 mm	39, 59, 79	反射镜面的初始面形可以通过 DM 背后的 8 颗微米螺丝进行精细调节	对激光、望远镜、眼科、显示、成像光学系统的各阶动态波前畸变进行快速校正
MMDM 40-59/79	40 mm	59, 79		
MMDM 50-79	50 mm	79		
MMDM 11x39-19/38 linear	11x39 mm （长方形）	19, 38	线性反射镜， 镜面为长方形	对飞秒激光器和放大器的超快脉冲持续时间和时域形状进行精确控制

推荐产品 1：15 mm 口径、37 通道的 MMDM 照片如下图所示，其主要技术参数如下表所示（见产品手册第 7.3 节）。

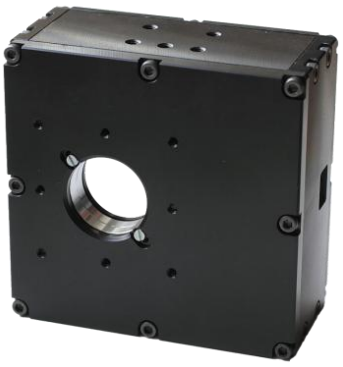



Parameter	Value
Aperture shape	approximately circular
Mirror coating	Metal or Metal + dielectric
Aperture dimensions	15mm diameter
Number of electrodes	37 (19) (see Fig. 7.6)
Control voltages V_c	0 . . . 150 to 300 V, dependent on the mirror
Initial RMS deviation from plane	less than 0.45 μm
Main initial aberration	1.5 fringes at 630nm
Maximum deflection of the mirror center	10 μm
Package dimensions	see Fig. 7.7
Weight	140 g

变形镜初始面形及施加电压后的干涉图（与平面镜产生干涉）如下图所示，可以看出，变形镜可以很好地拟合波前畸变曲面，对波前畸变进行校正。



推荐产品 2：为了满足用户对多通道、高速率、小体积变形镜的需求，OKO 公司新近推出了 96 通道、2 kHz、三合一 MDM 薄膜变形镜新产品（图片如下图所示），在国内外用户中受到众多好评。

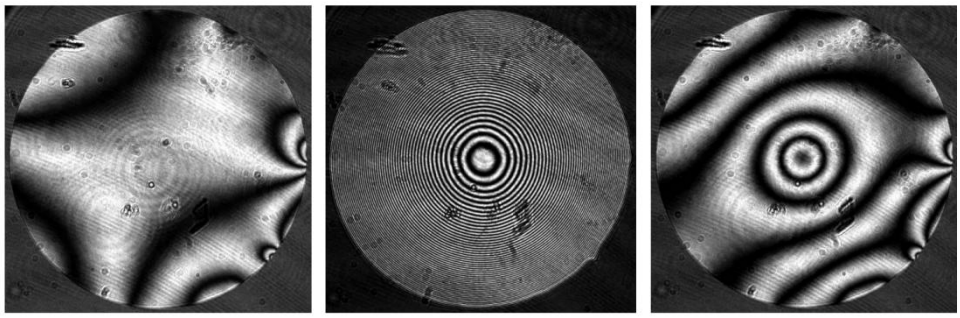


该产品具有以下特点：

- 多通道：通道数提升至 96 单元，可满足众多使用场景对高阶畸变校正的需求；
- 高速率：刷新速率提升至 2 kHz，可实现高速、动态畸变校正；
- 小体积：将变形镜、高压放大器、DAC 驱动模块 3 个器件合为一体，极大降低系统复杂度；
- 价格适中： 产品价格处于一般实验室或研究团队可接受范围，进一步降低研究门槛。

其主要技术参数如下表所示:

镜面形状	圆形	中心最大形变量	18 μm
通光孔径	25.4 mm	最大刷新速率	2 kHz
推荐光束直径	18 mm	找平后 RMS 偏差	～10 nm
执行器数量	96	涂层	AI
控制数据接口	USB2.0	尺寸	90×90×30 mm^3



出厂前对变形镜进行了测试，如图所示为施加电压后的干涉图（与平面镜产生干涉）从左到右依次为：施加零电压，所有执行器施加最大电压，仅中央执行器施加最大电压。从这些干涉图可以看出变形镜具有十分优秀的拟合各种波前畸变曲面，具备校正复杂波前畸变的能力。

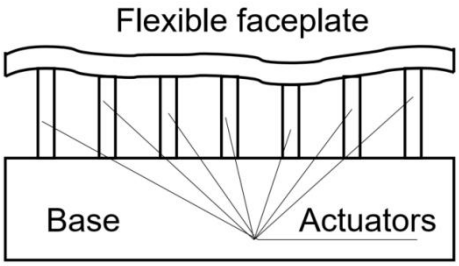
最佳光学孔径：变形镜校正波前畸变的过程实质上是其镜面形变不断逼近和抵消波前畸变曲面的过程。根据弹性力学理论，变形镜镜面的形变可以用泊松方程（Poisson equation）来描述和计算。由于部分 Zernike 曲面对于光学孔径的边界条件有特殊要求，部分执行器必须置于光学孔径的外部以取得最佳校正效果。在实际操作中，一般将 MMDM 镜面直径设计为光束直径的 1.4-1.6 倍（即光束直径为 MMDM 镜面直径的 0.6-0.7 倍）。

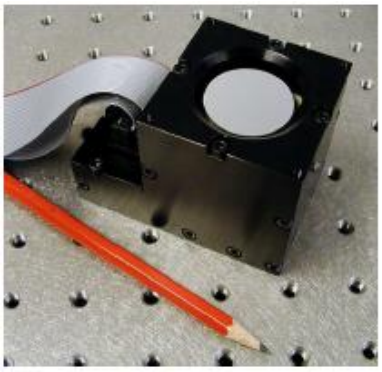
光功率负载：激光负载会引起镜面温度上升，导致镜面产生热膨胀，从而降低其表面张力。为了降低高功率光负载对镜面产生的不利影响，OKO 变形镜在设计和生产过程中采取了一系列措施以提高其负载能力，例如：

- 镜面除了镀高反射率金属外，还采用电介质层进一步增强其反射率；
- 降低薄膜与电极之间的热阻；
- 降低电极与衬底及外界环境的热阻，便于热量扩散。

2. 压电变形镜(PDM)

结构：PDM 主要利用压电执行器的伸缩带动镜面产生形变。镜片一般由玻璃、石英或者硅制成，镜面镀以高反射率金属或介质，镜片与下方的压电执行器粘合固定。通过改变压电执行器阵列的电压组合，可以使镜面产生不同的形变。





工作原理：当给压电执行器施加电压时，由于压电效应，执行器发生形变，带动镜面发生形变。

偏置控制（双向变形）：一般给所有执行器预先施加同一电压，使镜面产生活塞位移，以此作为控制的初始状态，然后在此基础上改变电压，实现正负调节。

线性度：PDM 线性度较好，但是存在滞洄（Hysteresis），对开环系统影响较大，但是对闭环 AO 系统性能影响并不大。

电功耗：压电执行器是电容负载，因此虽然驱动电压达到上百伏，但电流较小，消耗的电功率较低。

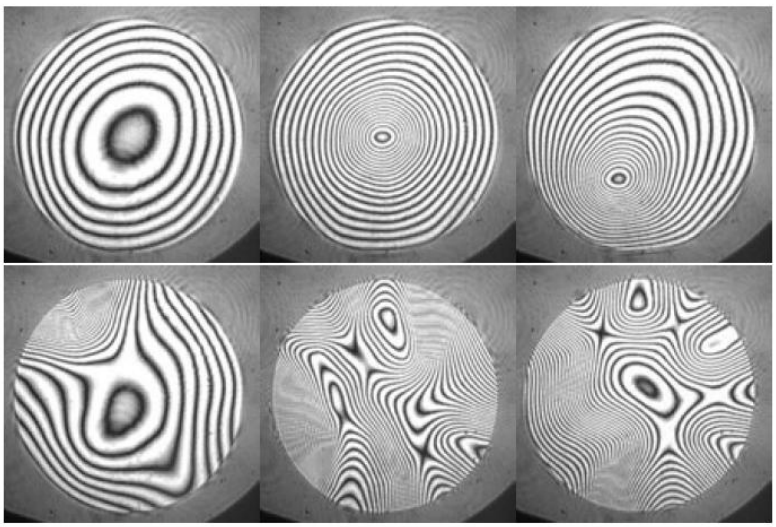
连接：PDM 由高压放大器驱动，并可通过 DAC（USB 或以太网接口）与 PC 连接。PDM 很容易与 OKO 的 FrontSurfer 软件集成为一个完整的闭环自适应光学系统。如果直接对激光束的光强进行优化，PDM 也可以与 BeamTuner 优化控制软件相结合进行亮度优化。

形变量：执行器最小间距约为 4.3 mm，单执行器最大形变量约为 8 μm。

最佳光学孔径：与 MMDM 类似，在实际操作中，一般将 PDM 镜面直径设计为光束直径的 1.4-1.6 倍（即光束直径为 PDM 镜面直径的 0.6-0.7 倍）。

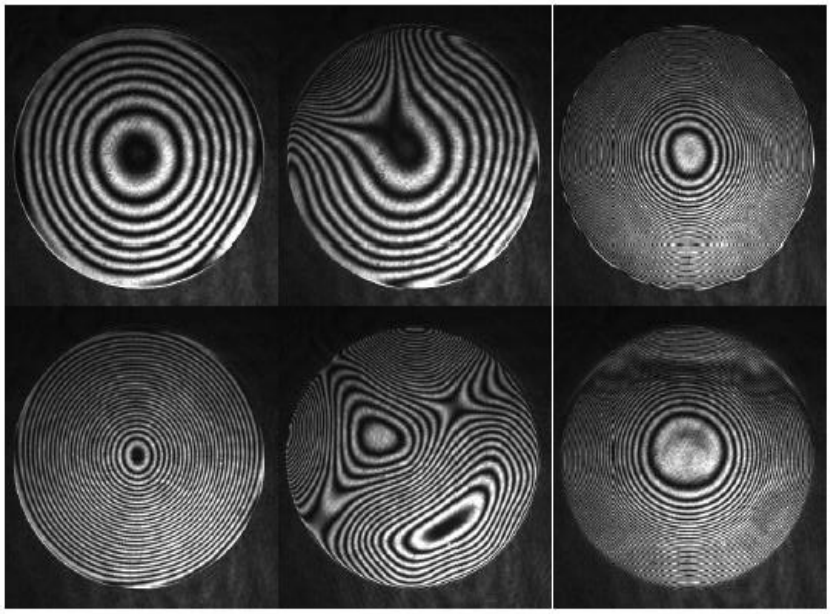
光功率负载：在镀反射率膜的情况下，PDM 最高可承载 15 kW 激光功率。

形变干涉图：对 PDM19-30 变形镜初始面形及施加电压后的干涉图（与平面镜产生干涉）如下图所示。



第一行：零电压、中央、内部执行器施加 300 V 电压；

第二行：边缘执行器施加 300 V 电压、随机电压。



第一行：零电压、边缘执行器施加 300 V 电压、外部环形执行器施加 300 V；

第二行：中央施加 300 V、所有执行器施加随机电压、中心和内部环形执行器施加 300 V。

压电陶瓷变形镜（PDM）参数对比表

	PDM30-19	PDM30-37	PDM50-19/37/69/79/109	PDM11*55-20
镜面形状 Aperture shape	圆 circular	圆 circular	圆 circular	矩形 rectangular
镜面直径 Aperture dimensions	30 mm	30 mm	50 mm	10*50 mm^2
镜面涂层 Mirror coating	金属-金属+介电质 Metal or Metal +dielectric	金属-金属+介电质 Metal or Metal +dielectric	金属-金属+介电质 Metal or Metal +dielectric	金属-金属+介电质 Metal or Metal +dielectric
执行器数目 Number of electrodes	19	37	19/37/69/79/109	20
致电器电容 Actuator capacitance	5 nF	5 nF	5 nF	6 nF
致电器电压 Actuator voltages Vc	0 to 300 V	0 to 300 V	0 to 400 V	0 to 400 V
与参考球体的初始 RMS 偏差 Initial rms deviation of corrected aberration from reference sphere	波前 RMS＜9 nm	波前 RMS＜9 nm	波前 RMS＜9 nm	波前 RMS＜9 nm
主要初始偏差 Main initial aberration	球差 Sphere	球差 Sphere	离焦 Defocus	球差 Sphere
最大行程 Maximum stroke	8 μm@400 V	8 μm@400 V	8 μm@400 V 6 μm@300 V	8 μm@400 V
制动器间距 Actuator pitch	7 mm	4.3 mm	6.83 mm@19 4.75 mm@69 4.72 mm@79 4.3 mm@109	5 mm
重量 Weight	320 g	370 g	650 g	300 g

OKO 变形镜应用领域分析

DM 类型	最大形变量/间距	湍流校正效果	眼科校正	激光校正（有镀膜情况下）	滞洄
MMDM 15-37	9000 nm/500 nm	可达到孔径为 0.75 m 望远镜成像效果	中等	＜ 100 W，效果较好	无
MMDM 30-59/79	12000 nm/600 nm	可达到孔径为 1.5 m 望远镜成像效果	中等	＜ 150 W，效果较好	无
MMDM 40/50-79	18000 nm/700 nm	可达到孔径为 1.5 m 望远镜成像效果	中等	＜ 200 W，效果较好	无
PDM 30-19	8000 nm/3500 nm	可达到孔径为 1 m 望远镜成像效果	好	＜ 1 kW，效果极佳	＜ 10%
PDM 30-37	8000 nm/2000 nm	可达到孔径为 2 m 望远镜成像效果	极佳	＜ 1 kW，效果极佳	＜ 10%
PDM 50-37	8000 nm/3000 nm	好	极佳	＜ 10 kW，效果极佳	＜ 10%
PDM 50-79/109	8000 nm/2000 nm	可达到孔径为 3 m 望远镜成像效果	极佳	＜ 1 kW，效果极佳	＜ 10%

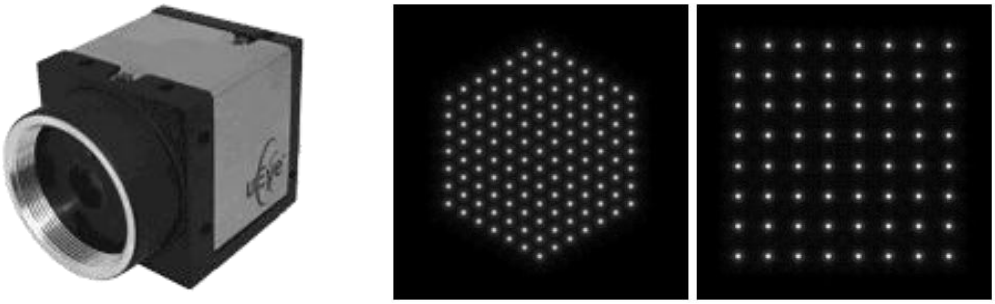
3. 波前传感器

OKO 公司采用 Shack-Hartmann 波前传感器进行波前测量，再通过 Frontsurfer 软件进行波前重构、波前分析。

波前传感器硬件主要包括：微透镜阵列（或 Hartmann 掩膜板）、相机。

波前测量的精度一般由微透镜阵列的间距（Pitch）、单位面积的微透镜数量、微透镜焦距、相机单像素尺寸、相机灵敏度、噪声等因素决定。

波前测量的速度一般由相机的帧率、灵敏度、入射光强等因素决定。



左：波前传感器（微透镜阵列+相机）；

右：微透镜阵列光斑图像（六边形、正交）。

OKO 公司提供标准配置的相机，也可由用户指定相机进行集成测试。

OKO 公司提供一系列由玻璃和熔融石英制成的微透镜阵列，具有较小的数值孔径和99%的光学填充率。微结构可提供最佳的光谱效率（从紫外线到远红外），并具有最佳的机械和热稳定性。微透镜标准配置是一个由 127 个微透镜组成的六角形阵列，焦距约为 18 毫米，间距为 300 μm，安装在 C-mount 中。此外，还有多种正交、六角形微透镜阵列可供选择。

六角形微透镜阵列技术参数

Product type	Material	Pitch, μm	Radius, mm	Focal distance, mm	Maximum size
APH-GT-P1300-F5.2 (633)	StiH-53	1300	4,3	5,2	20x20 lenses (26x26mm)
APH-GT-P1300-F3,26 (633)	StiH-53	1300	2,74	3,26	20x20 lenses (26x26mm)
APH-Q-P1000-F36,7 (633)	Fused silica	1000	16,8	36,7	60x60 lenses (61x61mm)
APH-Q-P480-F10,91 (633)	Fused silica	480	5	10,9	100x100 lenses (51x51mm)
APH-Q-P250-F2 (633)	Fused silica	250	1	2	240x240 lenses (60x60mm)
APH-P(GB)-P250-F0,57 (633)	BK-7/NOA-61	250	0,32	0,57	145x145mm
APH-P(GB)-P30-F0,042 (633)	BK-7/NOA-61	30	0,024	0,042	50x50mm

正交微透镜阵列技术参数

Product type	Material	Pitch, μm	Radius, mm	Focal distance, mm	Maximum size
APO-Q-P2200-F209 (633)	Fused silica	2200	95,52	209	30x30 lenses (70x70mm)
APO-GB-P1500-F24.3 (633)	BK-7	1500	12,5	24,3	6x6 lenses (10x10mm)
APO-GB-P1500-F39.3 (633)	BK-7	1500	20,4	39	6x6 lenses (10x10mm)
APO-Q-P1100-F105 (633)	Fused silica	1100	48.0	105	55x55 lenses (62x62mm)
APO-Q-P1100-F209 (633)	Fused silica	1100	95,52	209	55x55 lenses (62x62mm)
APO-Q-P1061-F158 (633)	Fused silica	1061	72,4	158	55x55 lenses (62x62mm)
APO-Q-P1000-F40 (633)	Fused silica	1000	18.0	40	60x60 lenses (61x61mm)
APO-Q-P1000-F4,64 (633)	Fused silica	1000	2,12	4,64	60x60 lenses (61x61mm)
APO-Q-P500-F19,7 (633)	Fused silica	500	9	19,7	100x100 lenses (50x50mm)
APO-Q-P500-F8,31 (633)	Fused silica	500	3,8	8,31	100x100 lenses (50x50mm)
APO-Q-P300-F40 (633)	Fused silica	300	18.0	40	200x200 lenses (61x61mm)
APO-Q-P300-F118 (633)	Fused silica	300	54	118	200x200 lenses (61x61mm)
APO-Q-P300-F2 (633)	Fused silica	300	0,94	2,0	200x200 lenses (61x61mm)
APO-Q-P384-F5.75 (633)	Fused silica	384	2 627	5,75	5x5 lenses (2,5x2,5mm)
APO-Q-P222-F1,86 (633)	Fused silica	222	0,85	1,86	200x200 lenses (45x45mm)
APO-Q-P222-F0,93 (633)	Fused silica	222	0,43	0,93	200x200 lenses (45x45mm)
APO-Q-P192-F5.75 (633)	Fused silica	192	2 627	5,75	9x9 lenses (2x2mm)
APO-Q-P192-F3.17 (633)	Fused silica	192	1,45	3,17	200x200 lenses (45x45mm)
APO-Q-P200-F7.0 (633)	Fused silica	200	3,2	7.0	300x300 lenses (61x61mm)
APO-Q-P200-F40 (633)	Fused silica	200	18,2	40	300x300 lenses (61x61mm)
APO-Q-P150-F10 (633)	Fused silica	150	4,57	10	400x400 lenses (61x61mm)
APO-Q-P150-F3.5 (633)	Fused silica	150	1,6	3,5	400x400 lenses (61x61mm)
APO-Q-P148-F1,24 (633)	Fused silica	148	0,6	1,24	400x400 lenses (61x61mm)
APO-Q-P100-F0,217 (532)	Fused silica	100	0,1	0,217	500x500 lenses (51x51mm)
APO-GT-P100-F0,143 (633)	StiH-53	100	0,12	0,143	500x500 lenses (51x51mm)
APO-P(GB)-P250-F0,57 (633)	BK-7/NOA-61	250	0,32	0,57	25x25mm
APO-P(GB)-P200-F1,25 (633)	BK-7/NOA-61	200	0,7	1,25	40x40mm
APO-P(GB)-P200-F6,4 (633)	BK-7/NOA-61	200	3,32	6,4	25x25mm
APO-P(GB)-P300-F1,7 (633)	BK-7/NOA-61	300	0,94	1,7	25x25mm
APO-P(GB)-P300-F107 (633)	BK-7/NOA-61	300	60	107	25x25mm

几款用于波前传感器相机参数对比

产品	UI-1242LE-NIR	UI-1540SE	UI-3060CP-M-GL Rev.2	UI-3140CP-M-GL Rev.2	UI-3200SE-M-GL	UI-3240LE-NIR-GL	UI-3360CP-NIR-GL	UI-3370CP-NIR-GL Rev.2
帧率（fps）	（a）24 （b）25	25	166	224	24	（a）56 （b）60	152	80
图像传感器尺寸	6.784mm×5.427mm	6.656mm×5.325mm	11.345mm×7.126mm	6.144mm×4.915mm	14.158mm×10.370mm	6.784mm×5.427mm	11.264mm×5.984mm	11.264mm×11.264mm
像素大小	5.3μm	5.2μm	5.86μm	4.8μm	3.45μm	5.3μm	5.5μm	5.5μm
微透镜阵列数量（微透镜尺寸300μm）	22×18	22×17	37×23	20×16	47×34	22×18	37×19	37×37
微透镜总数（微透镜尺寸300μm）	396	374	851	320	1598	396	703	1369
微透镜阵列数量（微透镜尺寸150μm）	45×36	44×35	75×47	40×32	94×69	45×36	75×39	75×75
微透镜总数（微透镜尺寸150μm）	1620	1540	3525	1280	6486	1620	2925	5625

注：
1.部分项中帧率分（a）（b），其中（a）指触发模式下最大帧率，（b）指自由震荡模式下帧率
2.阵列数量计算取整方法为：仅取整数，舍弃所有小数，而非四舍五入

4. 波前分析和控制软件

波前分析和控制系统 FrontSurfer 可与 Shack-Hartmann 传感器配合使用，进行波前分析、闭环控制等。一般可用于：

- 透射和反射光学器件的测试：镜头、镜面等；
- 实时显示低阶异常（倾斜、离焦、像散、慧差等）；
- 与 OKO 可变形反射镜相结合，实时控制和补偿波前畸变。

FrontSurfer 有两个版本：1）只进行波前分析；2）波前分析+实时控制。

测量模式：

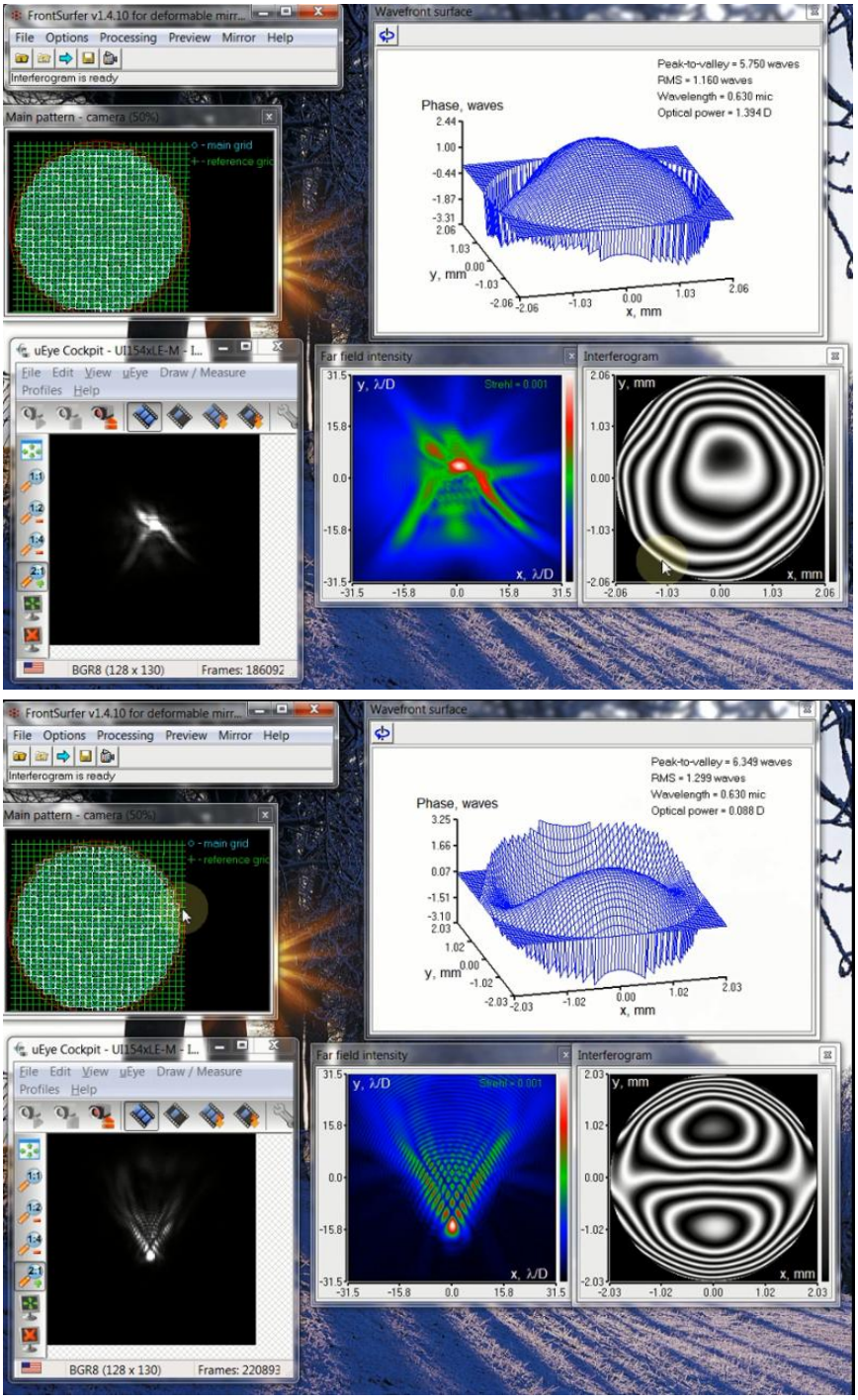
通过 Frontsurfer，可以进行绝对波前测量（绝对模式）和相对波前测量（参考模式）：

1）绝对模式：波前传感器事先经过严格校准，以平面为基准面，直接根据获得的微透镜阵列光斑图像计算得到入射光束的绝对波前。实际使用时，只需要单帧图像即可计算出入射光的波前。

2）参考模式：将一束光束定义为参考光束，记录其产生的微透镜阵列光斑坐标，并将该坐标设置为波前计算参考坐标；将后续获得的微透镜阵列光斑坐标与参考坐标比较，从而计算得到该光束与参考光束之间的相对波前变化。因此需要两张图像才能计算出相对波前变化。

软件功能和性能指标：

- 测量精度可以达到 λ/100 rms；
- 在“对准模式”下实时显示低阶像差；
- 根据波前传感器数据重建光束波前；
- 一键保存所有测量数据和波前；
- 可以将输出像差定义为 Zernike 多项式的组合。

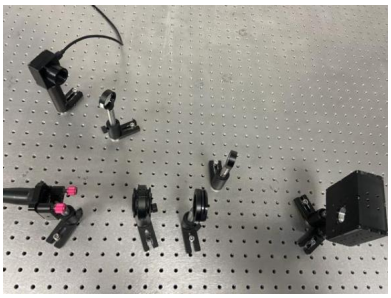


（上图所示为 Frontsurfer 软件对光束波前测量的结果，以三维空间、干涉图像显示波前曲面。在此基础上对远场光斑进行了模拟，与实际测量值吻合程度较好，说明了软件的准确性。）

5. 自适应光学系统

一套完整的闭环自适应光学系统可根据具体应用需求采用多种结构形式，但其核心组成部分保持不变，主要包括一个变形镜、一个波前传感器以及一台控制计算机。本节所介绍的闭环自适应光学系统以荷兰 OKO 公司生产的 96 通道薄膜变形镜为例。该变形镜具备多通道、高刷新率、体积小巧及成本适中等优势，具有较高的性价比，适合一般实验室或研究团队使用。

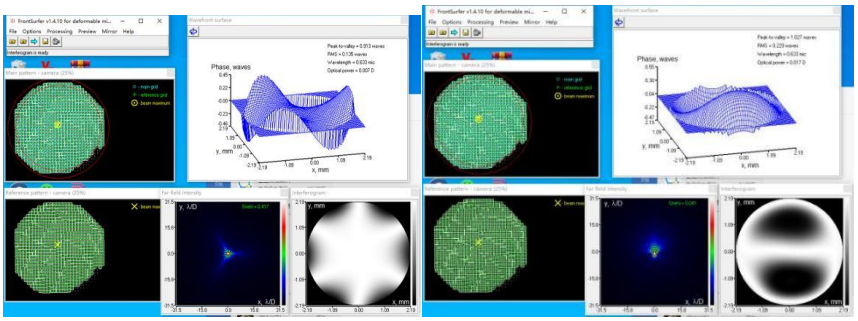
一套完整的闭环自适应光学系统的工作原理如下：由激光器发出的准直光束依次经过偏振片组和孔径光阑后，入射至变形镜。变形镜对该光束的波前进行调制与校正，反射光随后经由 4F 系统传输至波前传感器。波前传感器对接收到的光信号进行测量，并将数据传输至计算机进行分析处理。计算机根据分析结果生成相应的控制信号，反馈至变形镜，实时调整其控制电压，从而实现波前的动态校正。上述过程循环进行，构成完整的闭环控制系统。



OKO 闭环自适应光学系统实物图

该变形镜为 96 通道三合一薄膜型设计，在保持多通道架构的同时实现了高速响应，其刷新速率最高可达 2 kHz，能够满足动态波前畸变的高速校正需求。凭借 96 个独立执行器，该器件能够产生高阶曲面形变，可有效校正球差、彗差、三叶草像差等多种低阶像差，高阶像差的校正同样表现出色。

波前传感器是同为荷兰 OKO 公司生产的 Shack-Hartmann 波前传感器，分辨率达 1280×1024，具有约 700 个焦距为 10 mm 的子透镜，彼此间距为 150 μm，正常工作时推荐的 zernike 模式最大能到 300 阶，能满足绝大部分使用环境下的测量需求。



96 通道薄膜变形镜产生三叶草像差（bolique trefoil，左），彗差（vertical coma 右）

八、法国 ALPAO 公司

产品介绍

ALPAO 公司简介：

法国 Alpao 是在约瑟夫傅立叶大学（格勒诺布尔）和 Floralis 大学的基础上发展起来的，是一家专注于研究自适应光学产品的公司。2006 年和 2008 年，ALPAO 获得法国研究部颁发的创新技术奖。

旗下产品包括可变形反射镜，波前传感器和自适应光学系统套件等产品，这些产品专门为天文学，视觉，显微镜，无线光通信和激光应用领域而设计。

ALPAO 主要产品：

1.DM(变形镜）



电磁驱动大口径变形镜



电磁驱动小口径变形镜

2.DMM（可变形模态反射镜）

3.SHWFS（夏克-哈特曼波前传感器）

- 可见光波前传感器；
- 近红外光波前传感器。

4.自适应系统套件

ALPAO 自适应光学系统由变形镜、波前传感器、ACE 软件（或 RTC 控制系统）构成，所有硬件都可相互配合使用。我们可提供超过 100 种不同的硬件配置方案，灵活满足多样化的应用需求与实验条件。

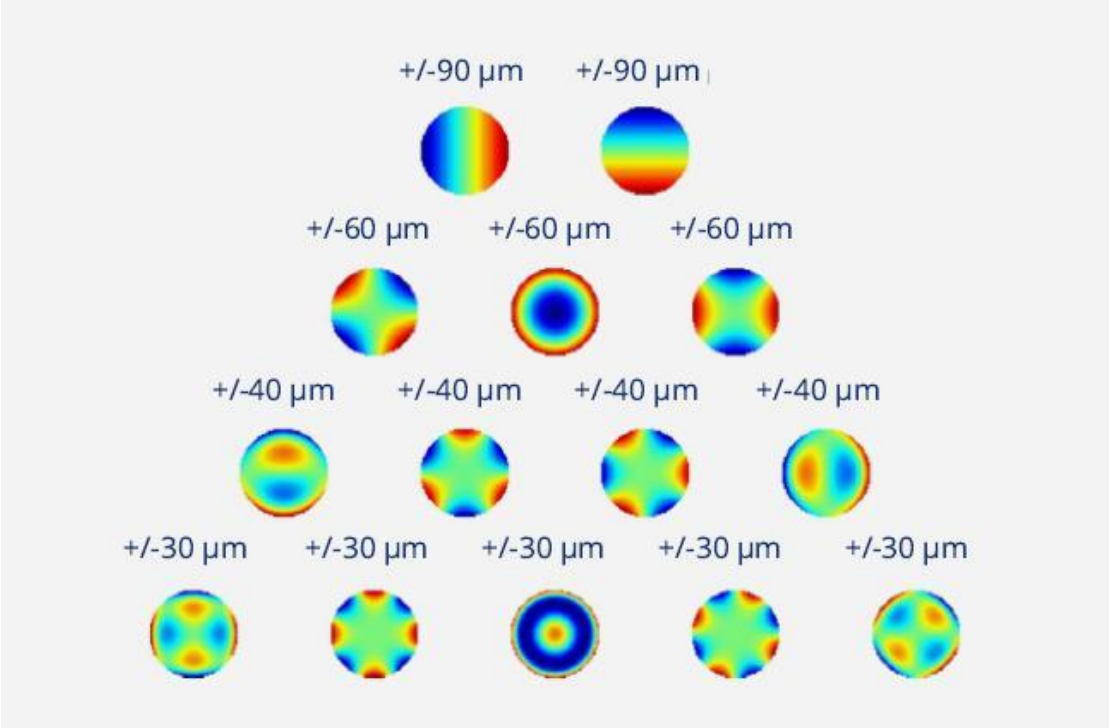
5.大气湍流补偿套件

对于要求最为苛刻的应用，ALPAO 能够为您提供强大的 ALPAO 实时运算平台（ALPAO RTC）。它是一套基于 linux 系统 CPU 的实时运算平台（RTC），工作带宽最高达 5 kHz，而纯延迟时间低至 21 μs。

1. 变形镜（DM）

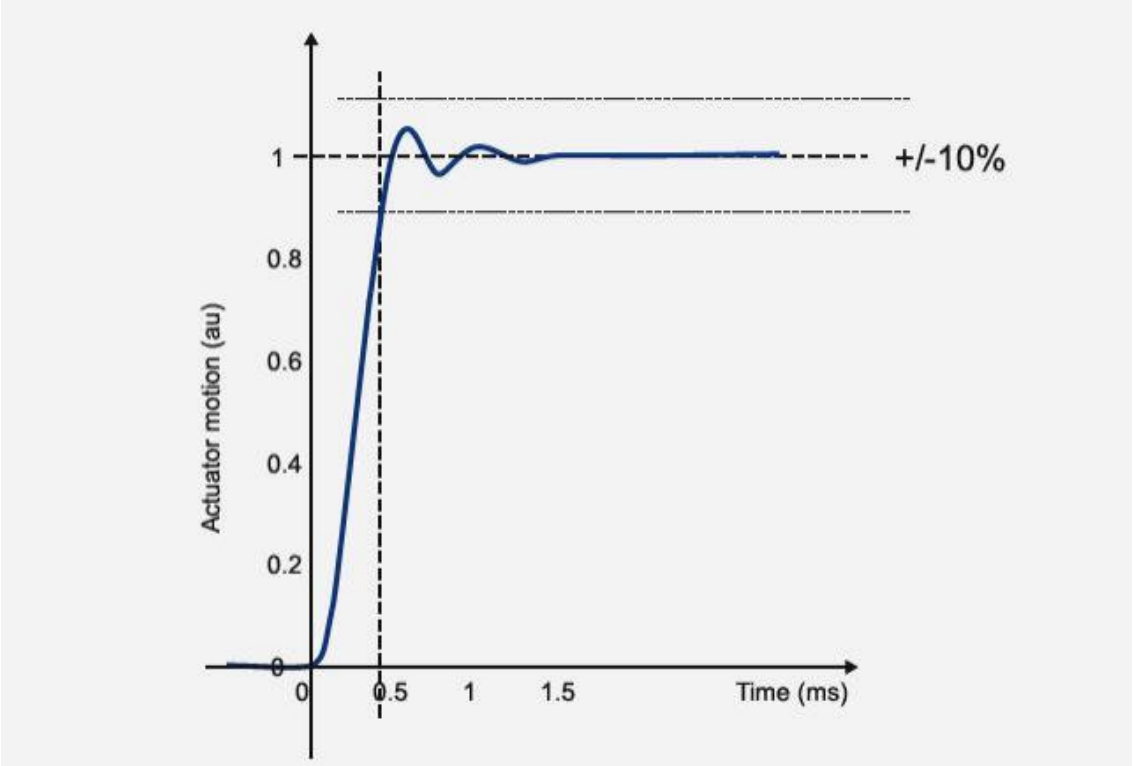
主要特点：

- 变形量大：变形镜可高精度校正严重像差和波前畸变，以及泽尼克高阶模式像差。大幅值的变形量将赋予用户前所未有的使用自适应光学系统的体验。比如，用户可不选用倾斜镜（天文光学应用），或利用 DM 产生大幅值离焦以进行快速 Z 轴扫描（显微成像应用），或用于校正眼球产生的大幅值像差（检眼镜应用）。



应用大变形量 DM97-15 可拟合的泽尼克模式幅值

- 动态性能好：DM 的稳定时间低至 400 μs（达到稳定值的±10%范围内），且超调量非常小。自适应光学系统的时间误差因此而大幅降低，所以 DM 能够取得极佳的校正效果。



DM292 的典型阶跃响应

（达到最终稳定变形量的±10%范围内仅需＜ 500 μs）

- 卓越的线性度及低迟滞：DM 几乎没有迟滞误差（＜ 2%），且具有很好的线性度（＞ 97%）和上佳的稳定性。对 ALPAO 的 DM 的控制简单直接，残余的波前误差非常小。
- 其他性能及特点：
  - 工作温度：-50 至 35 ℃*1；
  - 保护性银镀膜（另有其他镀膜可选）；
  - 可兼容真空环境；
  - 亚纳米级控制精度；
  - 无保护窗口；
  - 表面粗糙度＜ 15 Å RMS 值；
  - 保护性银膜的损伤阈值*2：880 mJ/cm^2（@12 ns，10 Hz，1064 nm）/ 50 W（CW@1064 nm）；
  - 平均故障间隔时间*2：1011 次使用周期；
  - 若干小时内开环稳定性＜ 10 nm RMS 值*2；
  - DM 系列促动器采用方形网格排布，DMX 系列促动器采用六边形网格排布*2；

- 平均功耗仅几 W；
- 配套线缆细巧、灵活。

*注：

1.可根据要求提供超温性能文档；

2.如有需要可提供技术文档。

工作原理：ALPAO 的 DM 是由电磁促动器驱动的连续反射镜面。

驱动软件： ALPAO 的 DM 包含用于 Labview®，Matlab®，C/C++和 Python 的软件驱动（SDK）。所有的硬件和软件都与微软 Windows ® XP（32 位），7，8.1，10（32/64 位）和许多 Linux®（32/64 位）操作系统兼容。

变形镜性能参数表*

型号	促动器数量	孔径直径（mm）	促动器间距（mm）	径向促动器数量	闭环中镜面最佳平整度（nm 均方根 机械量）	倾斜形变量（um 峰谷值 波前量）	离焦/像散形变量（um 峰谷值 波前量）	三乘三阵列变形量（um 峰谷值 波前量）	稳定时间（ms 稳定值±10%）	镜面薄膜第一谐振频率（Hz）	相位滞后 45 度时的频率（Hz）	外形尺寸(mm)
DM69-08	69	5.6	0.8	9	7	80	40	25	1.5	400	300	52×74×35
DM69-15		10.5	1.5			60	40	25	0.8	800	700	52×74×22
DM69-25		17.5	2.5			40	30	25	1.5	600	500	62×84×23
DM69-50		35	5.0		25	40	30	25	1.5	600	500	100×120×40
DM97-08	97	7.2	0.8	11	7	80	40	25	1.5	400	300	52×74×32
DM97-15		13.5	1.5			60	40	25	0.8	800	700	52×74×22
DM97-25		22.5	2.5			40	30	25	1.5	600	500	62×84×23
DM97-50		45	5.0		25	40	30	25	1.5	600	500	100×120×40
DM192	192	21	1.5	16	7	15	10	10	0.5	2000	1500	70×110×82
DM292	292	26.5	1.5	20		15	10	10	0.5	2000	1500	70×110×82
DM468	468	33	1.5	24		12	10	10	0.5	1600	1500	90×110×124
DM820	820	45	1.5	32		12	10	10	0.5	1600	1500	100×120×120
DM3228	3228	93	1.5	64		10	8	8	0.5	1200	1000	140×180×180
DMX37	37	100	20.6	7	25	30	25	25	2	400	400	244×290×78
DMX61	61	130		9		50	40					
DMX85	85	170		11		50	40					
DMX121	121	200		13	30	50	40					350×380×90
DMX163	163	240		15		50	40					

*注：所有 ALPAO 的 DM 的非线性误差都低至 3%，DM 系列的迟滞误差低至 2%，DMX 系列的迟滞误差为 6%。室温下性能。



100 单元以下变形镜的电子控制箱



100 单元以上变形镜的电子控制箱

低压电子控制箱

	100 单元以下变形镜的电子控制箱	100 单元以上变形镜的电子控制箱
传输协议 / 数据分辨率	16/14 位	
电脑连接接口	USB / 以太网口	PCIe 板卡（包含在供货范围内）
功耗	＜ 150 W	＜ 500 W
电源	110 至 250 V AC, 50 至 60 Hz	
重量	4 kg	10 kg
外形尺寸	31.5×23.5×13.5 cm	37.1×45×17.5 cm – 4U 机架式
工作温度	0 至 35 ℃	
线缆长度（电源线，电脑至电子控制箱数据线，电子控制箱至 DM 数据线）	2 m（另有 5 m 和 10 m 可选，购买时需补足差价）	
模拟量响应时间	＜ 10 μs	

可选项目

- 大变形量，高速或高光学质量选项能提供额外的特定性能：

	最佳平整度（nm 均方根值）	变形量	稳定时间	第一谐振频率	相位滞后 45 度的频率
大变形量	7	×1.5	×2	/2	/2
高速	7	/2	/2	×2	×2
高光学质量	3	-	-	-	-

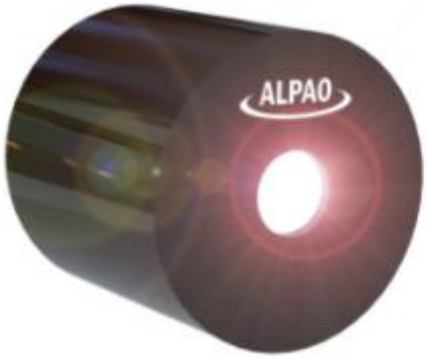
- 高稳定度选项能在 DM 开环工作时提供更好的性能表现；
- 其他镀膜选项：金，铝或提供更高激光损伤阈值的介质膜。

配件：

- 精密旋转台：用于精确调整 DM 的倾斜、俯仰及帮助 DM 在光路中的对齐；
- 电机精密旋转台；
- 触发输入和触发输出：将用户系统中的硬件准确同步；
- 仿真静态镜：该装置使用与标准 DM 相同的封装。用户可在光路调整阶段使用它，或者在将 DM 移至另一光学平台上，使用它代替光路中的 DM；
- LED 盒子：有 64 颗 LED，每颗代表 DM 的一个促动器。这一设备可帮助进阶用户研发自己的控制软件并在连接一台真正的 DM 之前对软件进行测试，以避免误操作造成 DM 损坏。

2. 可变形模态反射镜（DMM)

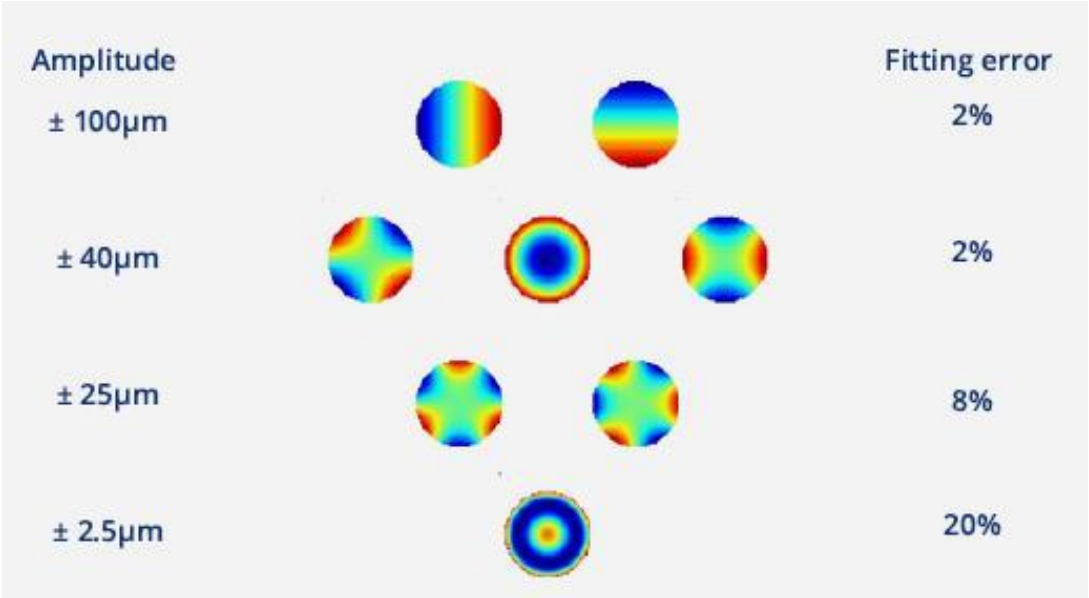
可变形模态反射镜对于最为常见的光学像差具有出色的校正能力。它的每个控制通道分别对应一种光学像差（比如离焦或像散），控制直接、简单。



主要特点：

- 使用简单：每个通道对应一个泽尼克模式嵌入式电子控制；
- 优化泽尼克像差校正：变形量大（最高 100 μm），拟合误差小（最低 2%）；
- 性价比高：专为 OEM 应用设计。

泽尼克像差校正：DMM 可以大变形量和高精度校正泽尼克低阶像差。可用它校正系统装配误差，或利用它产生的离焦进行快速 Z 轴扫描，或校正大幅值像差。



DMM 拟合泽尼克像差的典型形变量和拟合误差

可变形模态反射镜性能

型号		DMM
控制通道数量		8
孔径直径（mm)		13.5
光学质量	闭环中最佳平整度（RMS, nm）	λ/10
倾斜补偿	波前变形量（PV，μm）	≥ 100
	拟合误差（%）*	≤ 3
离焦/像散补偿	波前变形量（PV，μm）	≥ 20
	拟合误差（%）*	≤ 3
球差补偿	波前变形量（PV，μm）	≥ 1
	拟合误差（%）*	≤ 30
速度	薄膜第一谐振频率（Hz）	≥ 120
	稳定时间（ms，达到稳定值的+/-10%）	≤ 10
其他误差	非线性误差（%）	≤ 5
	迟滞误差（%）	≤ 5
机械 尺寸	圆柱体直径（mm）	50
	圆柱体长度（mm）	50

*注：指的是实际变形量与所需变形量之间的差值与所需变形量之比（RMS 值）

特点和优势：

- 镀保护性银膜；
- 无保护玻璃；
- 表面粗糙度＜ 15 Å RMS 值；
- 激光损伤阈值：880 mJ/cm^2 （@ 12 ns, 10 Hz, 1064 nm）/50 W（CW @ 1064 nm）；
- 可根据用户需要（更大的变形量、其他孔径尺寸、其他镀膜等），量身定制 DMM 产品。

易于控制：每个控制通道分别对应一种泽尼克像差。现在，自动像散调节或自动球差调节将变得如同自动调焦一样容易！ALPAO 的 DMM 的直接控制模式，使得用户能在校正后获得非常低的波前残差。

接口：DMM 内置一个低电压、低功耗的电子控制系统，具有标准以太网接口（或使用转接器实现 USB 接口）。我们提供一个基于网页服务的简单 API。它可兼容任何编程语言和操作系统，且无需驱动软件。因此，可以通过任意网页浏览器轻松实现对 DMM 的控制和监测。得益于 ALPAO DMM 的圆柱形封装设计，您很容易就可将它集成到您的系统中。

3. 波前传感器（SHWFS)

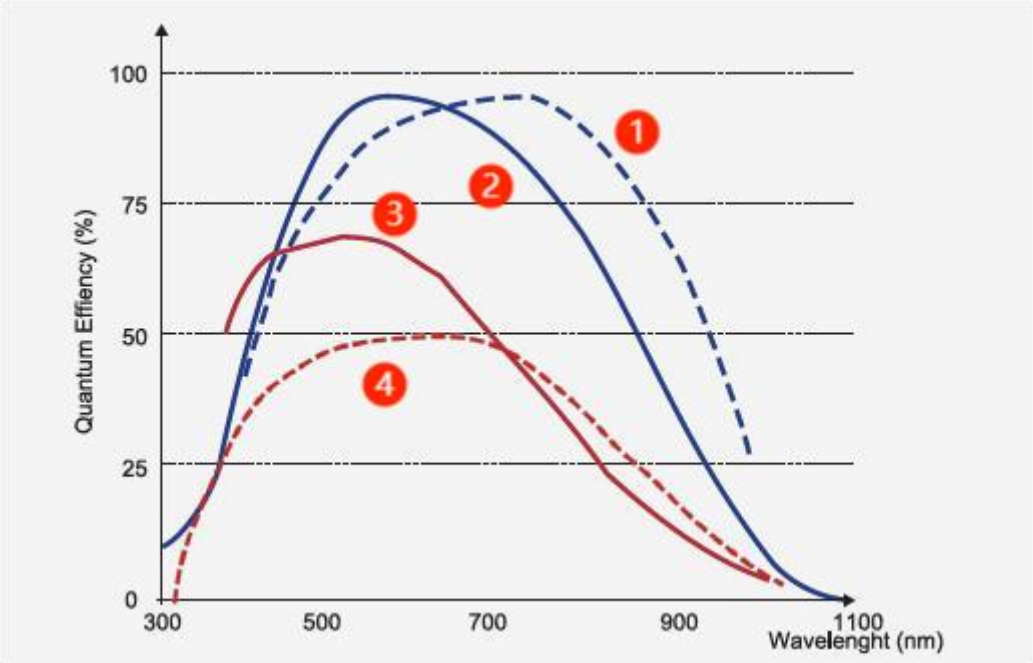
ALPAO 夏克-哈特曼波前传感器（SHWFS）是唯一专为自适应光学（AO）所设计的波前传感器系列产品。这一系列产品拥有出色性能，能与任何自适应光学系统相适应。灵敏度，采集频率和光谱响应范围可根据您的需求进行选择。所有的 ALPAO SHWFS 都能与 ALPAO 变形镜（DM）及 ALPAO 软件和实时运算平台完美兼容。



ALPAO 可见光波前传感器

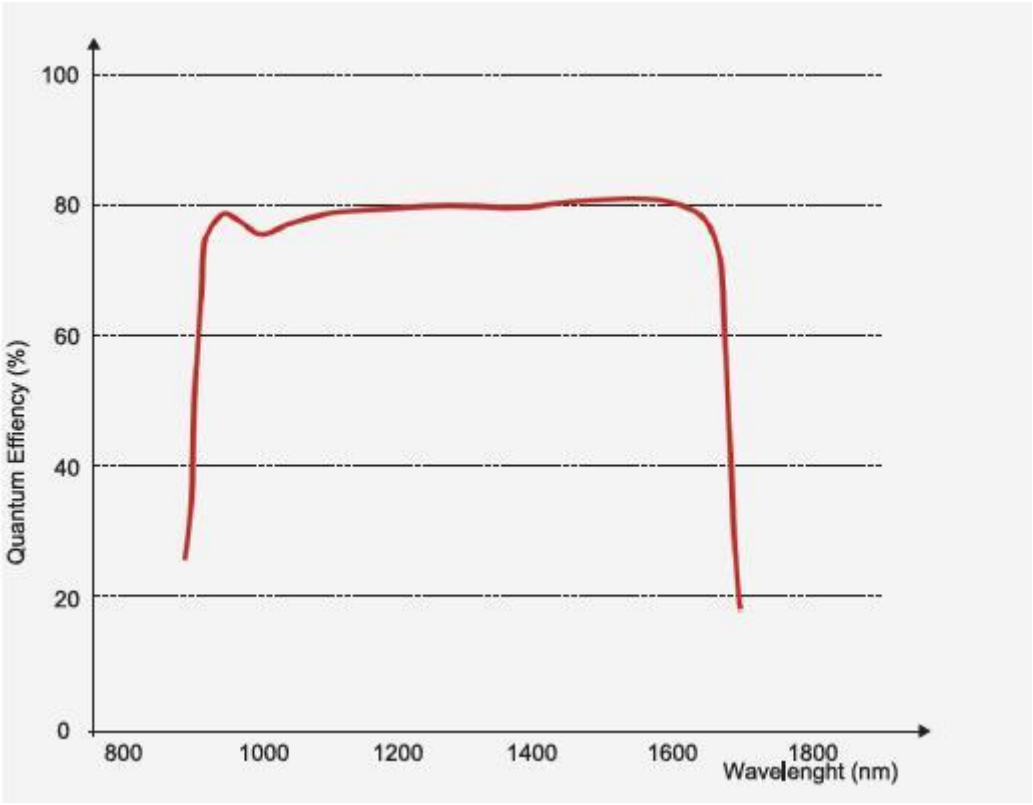
主要特点：

- 定位明确：专为自适应光学设计；
- 高速、低延迟：采集频率最高可达 28.14 kHz 延迟时间低至 10.7 μs；
- 高灵敏度：SNR=1 时的光子数低至 3 光子/帧/子孔径。



如图，①SH-EMCCD fast，②SH-EMCCD，

③SH-CMOS，④SH-CMOS fast 的典型量子效率



SH-InGaAs-fast（工作于 20℃）的典型量子效率

产品基本参数表

型号		SH-CMOS	SH-CMOS fast	SH-EMCCD	SH-EMCCD fast	SH-InGaAs fast
尺寸	子孔径数量	50×50	64×64	16×16	24×24	64×64
	子孔径尺寸（μm）	96.6	112	192	192	120
	有效孔径（mm）	4.83	7.17	3.07	4.61	7.68
速度	标准采集频率（Hz）	119	1730	1004	2067	690
	RIO 模式下最大采集频率*1（Hz）	477	28140	1838	2067	9598
灵敏度	探测器最大量子效率	67%	50%	95%	95%*2	80%*3
	信噪比为一时的光子数	100	1000	3	4	400
	读出噪声（电子数 RMS)	2.1	37	0.1	0.3	40
光学性能	倾斜/离焦测量范围（μm PV)	62/15	96/24	13/3	32/8	123/30
	重复度（nm RMS)	2	2	2	2	2
	光谱响应范围	VIS	VIS	VIS	VIS	NIR

*注： 1. SH-EMCCD fast 和 SH-InGaAs fast 这两款 WFS 都配有水冷系统；

2. 在-45℃测量；

3. 在 20℃测量。

速度参数表

相机采集频率（单位 Hz）指的是各个 WFS 对应相机的帧频。

读出延迟时间（单位 μs）指的是从曝光结束到数据传输开始之间的时间(该参数由相机生产商提供)。

WFS 子孔径 ROI	兼容的 DM*	SH-CMOS	SH-CMOS fast	SH-EMCCD	SH-EMCCD fast	SH-InGaAs fast
8×8	DM69	477 Hz 5000 μs	28140 Hz 10.7 μs	1838 Hz 69 μs	2067 Hz 43 μs	9590 Hz 23.3 μs
10×10	DM97	417 Hz 5000 μs	22080 Hz 11.2 μs	1004 Hz 68 μs	2067 Hz 43 μs	6510 Hz 23.1 μs
15×15	DM192	317 Hz 5000 μs	14660 Hz 12.48 μs	1004 Hz 64.8 μs	2067 Hz 43 μs	4760 Hz 22.9 μs
16×16	DM241	302 Hz 5000 μs	13010 Hz 12.79 μs	1004 Hz 64.2 μs	2067 Hz 43 μs	4760 Hz 22.8 μs
19×19	DM292	266 Hz 5000 μs	10020 Hz 13.78 μs	/	2067 Hz 43 μs	3650 Hz 22.7 μs
23×23	DM468	229 Hz 5000 μs	8000 Hz 15.30 μs	/	2067 Hz 43 μs	2900 Hz 22.4 μs
31×31	DM820	179 Hz 5000 μs	5220 Hz 18.9 μs	/	/	1970 Hz 22 μs
50×50	/	118 Hz 5000 μs	2620 Hz 31.1 μs	/	/	960 Hz 21 μs
63×63	DM3228	/	1730 Hz 42.2 μs	/	/	715 Hz 20.2 μs

*注:根据 Fried geometry 原则确定。

测量范围参数表

下列倾斜测量范围和离焦测量范围（单位 μm，PV 值）为不使用光点追踪算法时的值。

WFS 子孔径 ROI	兼容的 DM*4	SH-CMOS	SH-CMOS fast	SH-EMCCD	SH-EMCCD fast	SH-InGaAs fast
8×8	DM69	7/1	9/2	5/1	8/2	11/2
10×10	DM97	10/2	12/3	6/1	11/2	15/3
15×15	DM192	16/4	19/4	10/2	18/4	25/6
16×16	DM241	17/4	21/5	13/3	19/4	27/6
19×19	DM292	21/5	25/6	/	23/5	32/8
23×23	DM468	26/6	31/7	/	29/7	40/10
31×31	DM820	37/9	43/10	/	/	56/14
50×50	/	62/15	72/18	/	/	92/23
63×63	DM3228	/	91/22	/	/	118/29

*注：4.根据 Fried geometry 原则确定。

WFS 外封装



SH-CMOS

44×29×29 mm



SH-CMOS fast

63×63×47 mm



SH-EMCCD

156×156×204 mm

其余型号外封参数： SH-EMCCD fast 242×175×76 mm、

SH-InGaAs fast 55×55×80 mm

SH-CMOS 配备 5 米长 USB 数据线，其余 SHWFS 均配备 5 米长 Camera Link 数据线。

软件和驱动：ALPAO SHWFS 的供货范围包括后端相机的软件驱动（SDK）。它使用户可获取点阵图，以便接入到用户的软件或实时运算平台中。ALPAO SHWFS 旨在与 ALPAO

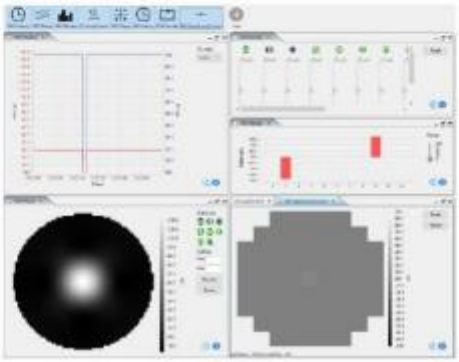
核心引擎软件（ACE）或 ALPAO 实时运算平台（ACE fast）配合使用。这些产品不包含在 SHWFS 的供货范围内，需要另外购买。

4. 自适应系统套件

ALPAO 自适应光学系统由变形镜、波前传感器、ACE 软件（或 RTC 控制系统）构成，所有硬件都可相互配合使用。我们可提供超过 100 种不同的硬件配置方案。



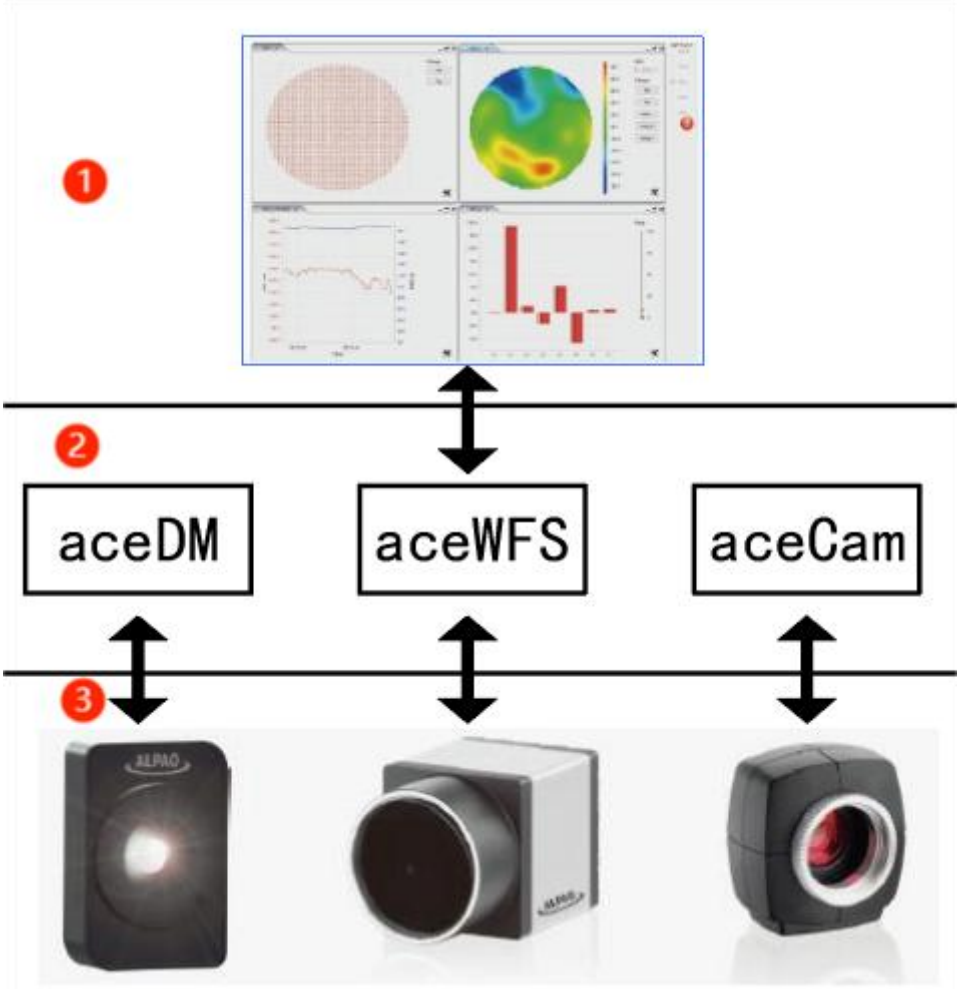




套件主要特点：

- 适用于各种应用：天文望远，眼科学、显微成像，激光光束像差补偿，微电子加工业……
- 定制您的专属套件：多款变形镜、波前传感器和软件可选 100 多种配置方案；
- 高性价比：包含搭建 4F 系统的透镜提供系统层面测试结果。

软件 ACE 结构： 软件 ACE 是一个面向对象的 MATLAB®工具箱，结构如图所示。



①友好的软件图形界面：快速上手并轻松修改用户所需参数；

②Matlab®层面：灵活便捷地针对用户需求进行定制；

③硬件层面：以独特的软件方案控制所有硬件，实现参数可调。

软件特点：

- 控制所有接入自适应光学系统的光电器件；
- 对光电器件进行参数设置；
- 根据您的硬件配置，最高可以达到 450Hz 闭环带宽；
- 实时处理数值和图像数据并以多种格式导出；
- 选择模式法/区域法波前重构方式；
- 通过内置的帮助文档和示例，轻松掌握使用方法；
- 根据教程快速完成光路调整；
- 进行无波前自适应光学实验；
- 运行迭代算法，校正非共路像差；

- 运行自己的自适应光学算法；
- 轻点鼠标即闭环；
- 友好的用户界面，随心所欲地对软件窗口进行排布；
- 根据需要选择界面颜色（黑/白）。

ACE 的最低配置要求为：4 Gb RAM，100 Mb 硬盘空间，Matlab R2017a 或以上版本（Matlab 不在供货范围内）。

ALPAO 自适应光学套件可从 100 多种配置方案中进行选择。用户可根据系统复杂度、像差的改变速度、系统工作波长、可用光子数，选择最为合适的方案。ALPAO 的变形镜 DM97-15 配合波前传感器 SH-CMOS 和 ACE 软件即可构成一套性能出色、性价比很高的自适应光学套件。它具有校正高达～60 项泽尼克像差的能力。由于 ACE 具有开放、灵活的特点，用户可在实验中轻而易举地使用，驾驭像差校正的任务。



ALPAO 热销套件：DM97-15，SH-CMOS 和 ACE 软件

购买 ALPAO 自适应光学套件即可免费获赠一套 4F 系统（含光学透镜和光机械件）*！它用于变形镜（DM）和波前传感器（WFS）之间，将从 DM 出射的光束耦合到 WFS 中，并确保两者形成光学共轭的关系。用户只需加上激光光源、遵照 ACE 内教程快速完成光路调整即可。

*注：套件中包含 DMX 系列变形镜的情况除外。



上图为用于 DM 和 WFS 之间的 4F 系统

用于显微成像的即插即用系统：AOS-μ（ALPAO 用于显微成像的即插即用自适应光学系统）让光学像差（产生自样品，折射率不匹配和显微系统本身）的校正变得简单、直接。

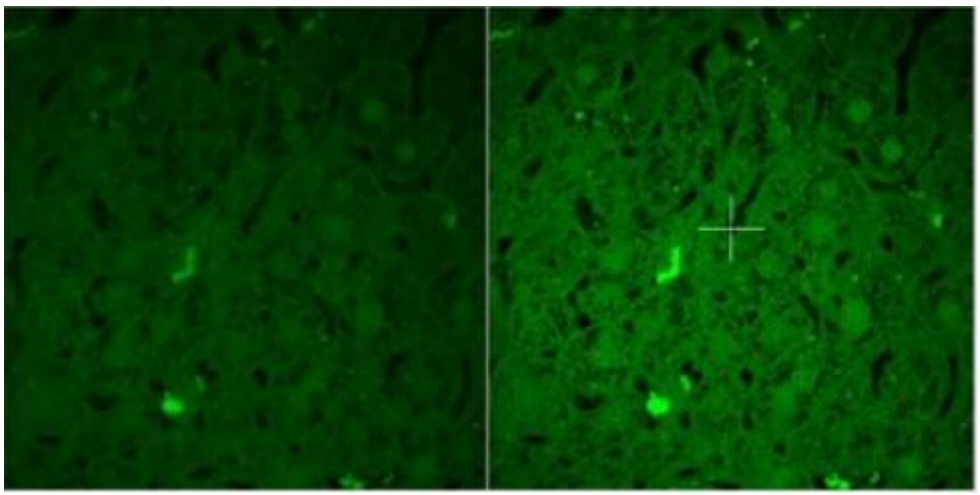
1）典型的系统配置包含：

- ALPAO 变形镜 DM97-15；
- 用户友好、性能优化的软件；
- 内置的成像相机；
- 波前传感器；
- 可选择搭建光学旁路。

2）AOS-μ可应用于大多显微成像系统，包括：

- 多光子显微镜；
- 共焦显微镜；
- PALM 和 STORM；
- 其他宽场荧光显微镜。

显微成像中的应用案例



对于生物组织一定深度处的共焦图像，以老鼠的透明肝脏样品为例

左:未使用自适应光学系统；右：使用自适应光学系统

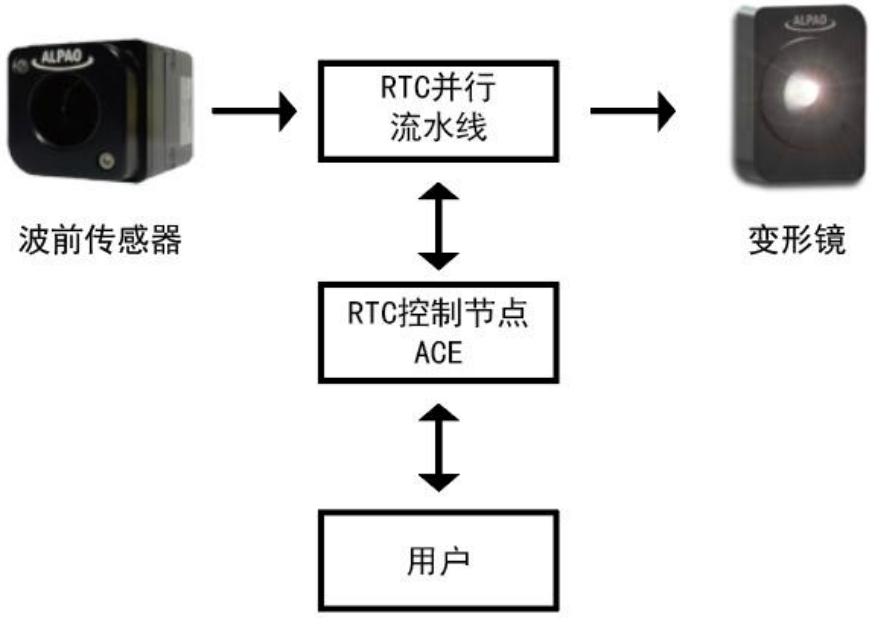
5. 大气湍流补偿套件（RTC）

对于要求最为苛刻的应用，ALPAO 能够为用户提供强大的 ALPAO 实时运算平台（ALPAO RTC）。它是一套基于 linux 系统 CPU 的实时运算平台（RTC），工作带宽最高达 5 kHz，而纯延迟时间低至 21 μs。



ALPAO RTC 的独特软件结构:RTC 流水线专为高速 AO 闭环而设计。我们提供配备硬件的闭源系统，来助您取得其卓越性能。

RTC 控制节点基于 ACE 工具箱的基础之上。在世界范围内，ACE 现已工作于 100 多套自适应光学系统了。控制节点层面的代码基于标准的 Matlab®环境，这赋予了它极高的灵活度。



上图以 SISO 结构举例，

RTC:最高工作带宽达 5 kHz，纯延迟时间短于 66 μs；

ACE 软件界面友好，配置灵活：

工作于 Windows/Linux 系统，需配合 Matlab 使用

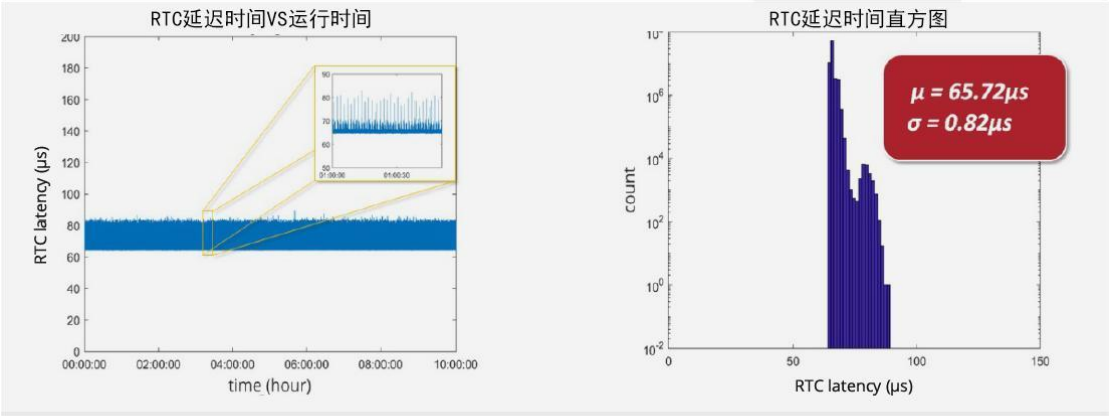
控制节点提供以下功能：

- RTC 流水线的单步操作：可对每个处理环节中的输入/输出数据进行互动式操纵；
- 所有数据的非侵入式监测：如原始图像，质心/斜率数据，重构波前图，泽尼克多项式系数，变形镜指令矩阵……
- 对每个工作过程进行参数设置：积分时间，CCD 增益、读出模式，门槛水平，部分指令矩阵，积分器增益……
- 用代码生成所有校准数据：如参考质心/参考斜率，影响矩阵，用于相机补偿的暗场、平场图……

RTC 的供货范围内包含硬件设备，所有设备预先固定在机箱（1000×600×1160 mm^3,～150 kg，功耗最大 4 kW，连接标准插座）中，他们包括：

- 用于控制节点的监控服务器（19″×1 U×400 mm）；
- 用于并行流水线的 Linux 系统多 CPU 服务器（19″×2 U×～900 mm）。

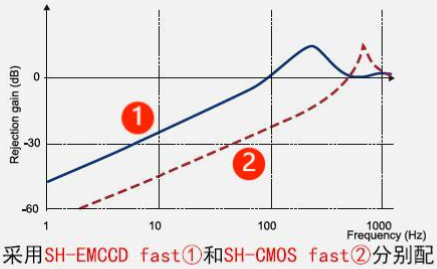
时间性能：丢帧、抖动对整体的闭环性能和稳定度都会构成很大影响。在下述示例中，以 2 kHz 运行的系统工作超过 10 小时也未丢失一帧。从下方直方图可以看到，纯延迟也十分稳定。





截止带宽高达230Hz的ALPAO高速套件
（DM97-15, SH-CMOS fast和ALPAO RT）

可为您提供系统性能仿真服务！



采用SH-EMCCD fast①和SH-CMOS fast②分别配合ALPAO RTC和DM292的系统的波特图

套件性能：根据您的应用选择合适的 ALPAO 套件——

- 根据需要校正的像差来确定促动器数量；
- 根据像差的动态情况和可用光子数来确定波前传感器的型号。

WFS 子孔径 ROI	兼容的 DM	SH-CMOS fast	SH-EMCCD	SH-EMCCD fast	SH-InGaAs fast
		帧频 RTC 延迟 AO 闭环总延迟	帧频 RTC 延迟 AO 闭环总延迟	帧频 RTC 延迟 AO 闭环总延迟	帧频 RTC 延迟 AO 闭环总延迟
8×8	DM69	5000 Hz 21 μs 77 μs	1838 Hz 21 μs 585 μs	2067 Hz 21 μs 522 μs	5000 Hz 21 μs 139 μs
10×10	DM97	5000 Hz 21 μs 86 μs	1004 Hz 21 μs 1034 μs	2067 Hz 21 μs 522 μs	5000 Hz 21 μs 188 μs
15×15	DM192	5000 Hz 24 μs 127 μs	1004 Hz 24 μs 1044 μs	2067 Hz 24 μs 532 μs	4760 Hz 24 μs 254 μs
16×16	DM241	5000 Hz 24 μs 133 μs	1004 Hz 24 μs 1051 μs	2067 Hz 24 μs 538 μs	4760 Hz 24 μs 260 μs
19×19	DM292	5000 Hz 27 μs 167 μs	/	2067 Hz 27 μs 548 μs	3650 Hz 27 μs 333 μs
23×23	DM468	5000 Hz 66 μs 253 μs	/	2067 Hz 66 μs 606 μs	2900 Hz 66 μs 461 μs
31×31	DM820	5000 Hz 66 μs 336 μs	/	/	1970 Hz 53 μs 641 μs

RTC 可选项

1）ALPAO RTC 可进行定制，以适应客户的应用：

- 不同结构：单输入单输出，单输入多输出和多输入多输出；
- 配备大容量存储器；
- 指令矩阵快速刷新：速度可以高于 1 Hz；
- 8 通道控制板卡：+/-10 V 控制 14 位数据，例如可用于倾斜镜的控制。

2）其他定制项目还包括：

- 硬件集成；
- 采用特定算法；
- 金字塔波前传感器……

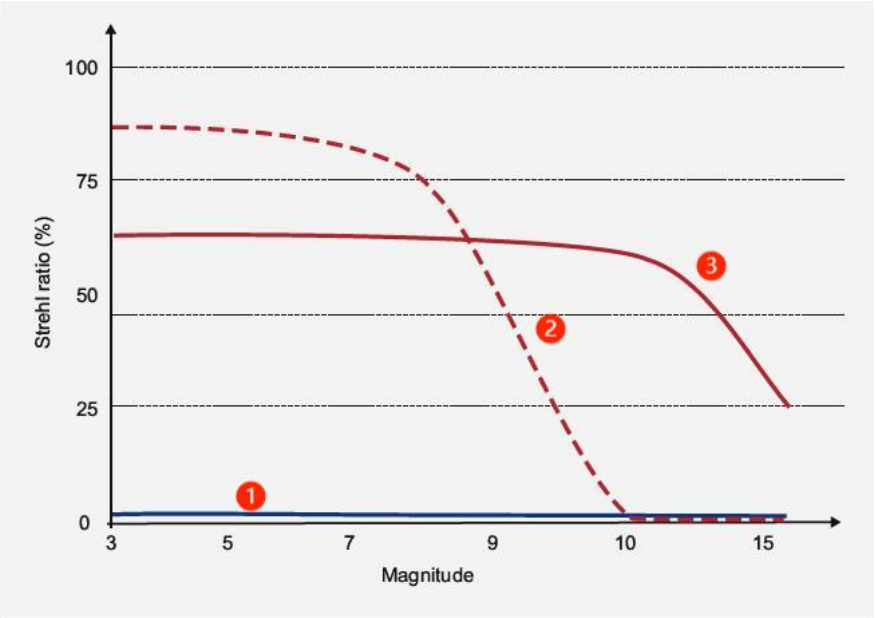
用于大气湍流补偿的一流系统：ALPAO 能够为大气湍流补偿提供一套性能一流的自适应光学系统。可提供配合自然导星或激光导星工作的两种配置。

典型的系统配置为：

- ALPAO 变形镜；
- ALPAO 快速波前传感器；
- ALPAO RTC；
- 校准单元；
- 倾斜镜；
- 倾斜传感器；
- 用于激光导星的聚焦平台控制系统；
- 激光导星的倾斜机构；
- 科学相机或其他科学仪器；
- 数据存储模块。

典型应用有：

- 天文光学；
- 空间碎片和卫星成像；
- 自由空间光通信；
- 对大气传输激光的预补偿……



如上图，三种状况下系统的斯特利尔比：不使用 AO（①），使用 LGS 的 AO（③），使用 NGS 的 AO（②），系统 $D/r_0 = 8$，自适应光学系统中使用变形镜 DM292，自适应光学实时运算平台 ACE fast 和波前传感器 SH-EMCCD fast。

九、意大利 DO 公司

产品介绍

DO 公司简介：

随着现代光学技术越来越发达，光学实验开始对光学系统有了更高的要求。现如今更多的实验要求光学系统能够在不同的环境干扰下实现稳定成像，以及对成像过程中不可避免的离焦、像散等像差进行矫正，同时对光束整形方面也有一定要求。传统的光学系统是无法实现这些复杂的功能的，而意大利 Dynamic Optics 公司依据研究人员常年沉浸在自适应光学领域的经验，面对这个市场巨大的挑战做足了准备。

目前，该公司旗下产品（可变形透镜、变形镜、波前传感器等）广泛用于显微镜天文学、高功率激光器、视觉科学和防卫体系等多领域。

DO 主要产品：

1.自适应变形透镜

2.变形反射镜

变形反射镜在经过镀高反射率和高损伤阈值膜之后，能适用于高功率激光和连续激光的各种运用中。

3.波前传感器

意大利 Dynamic Optics 提供的 Shack-Hartmann 波前传感器在采集速率和易用性之间做到了最佳平衡。便于上手的同时能最高达到 1 kHz（8×8 质心）。

4.PHOTONLOOP 软件（波前分析与控制软件）

用于自适应透镜和变形反射镜的闭环控制。

5.PZT-mini 控制器（驱动程序）

6.可调焦透镜

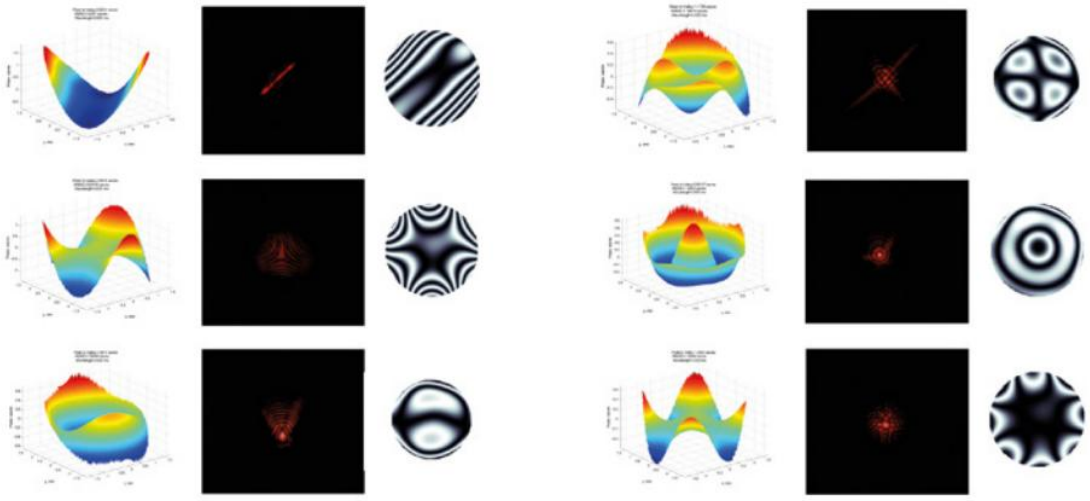
这款 AO 系统属于一个可调焦模块，可以安装在固定焦距的透镜前面，这样就能快速改变其焦距。相比传统光学系统更换透镜，这无疑要方便和有效的多。其内置驱动器能精准控制压电元件，实现不同焦距的精准调制。

7.意大利 Dynamic Optics 产品的应用

1. 自适应变形透镜

意大利 Dynamic Optics 提供的自适应变形透镜能降低整个 AO 系统的复杂度和体积，这也是其特色产品，具有跨时代的意义。在生物显微成像和视网膜成像等对装调灵活度和体积都要求较高的领域，变形透镜能展现出巨大的优势。

自适应变形透镜能在小于 5 ms 的响应时间内对 4 阶 zernike 像差做出良好的矫正，并且不会由于重力缘故引起像差，可根据需要进行镀膜。不论是复杂度、尺寸还是成本，该装置都是 AO 系统里面优秀的选择。



用型号为 AL1810 实现的对泽尼克多项式的测量

主要特点：用自适应变形透镜代替可变形反射镜来校正像差。

自适应透镜参数值

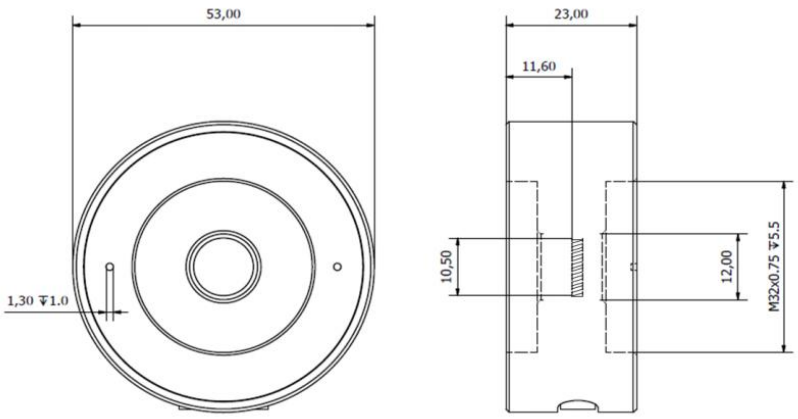
通光孔径	10 mm（也提供 5/16/25 mm）
镜面涂层	AR MgF2 涂层
直径	53 mm
高度	23 mm
通光孔径内的厚度	3 mm
透射率	92%（无 AR 涂层）/97%（有 AR 涂层）
驱动器数量	18 或 32
电子控制器	PZT Mini (+/-125 V)

像差校正能力

像差	峰谷（波长为 632 nm)	均方根值（波长为 632 nm）
倾斜	23.0	6.0
像散	12.0	2.5
离焦	9.0	2.7
三叶形	7.5	1.4
彗差	4.0	0.7
四叶形	4.6	0.7
二阶像散	1.3	0.2

推荐产品：AOL 1810，主要产品参数如下。

通光孔径	10.50 mm(也可提供 5/16/25 mm)
直径	53.00 mm
高度	23.00 mm
通光孔径内的厚度	3 mm

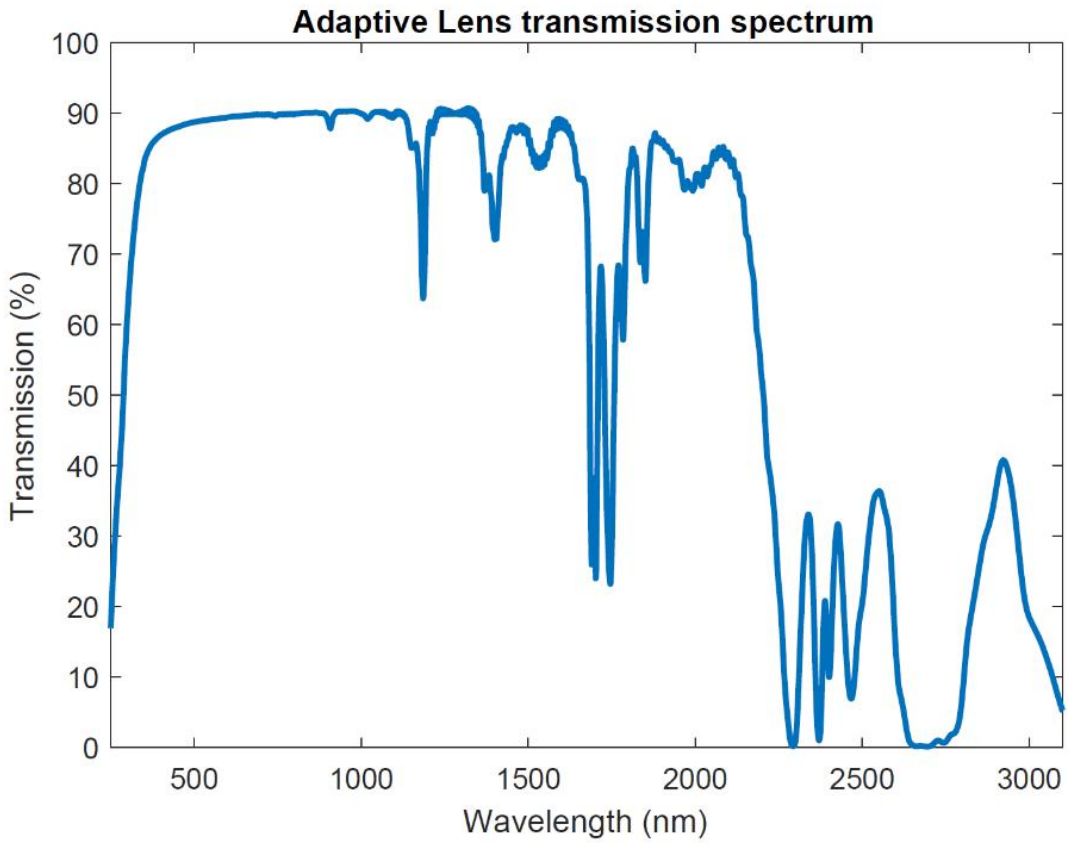


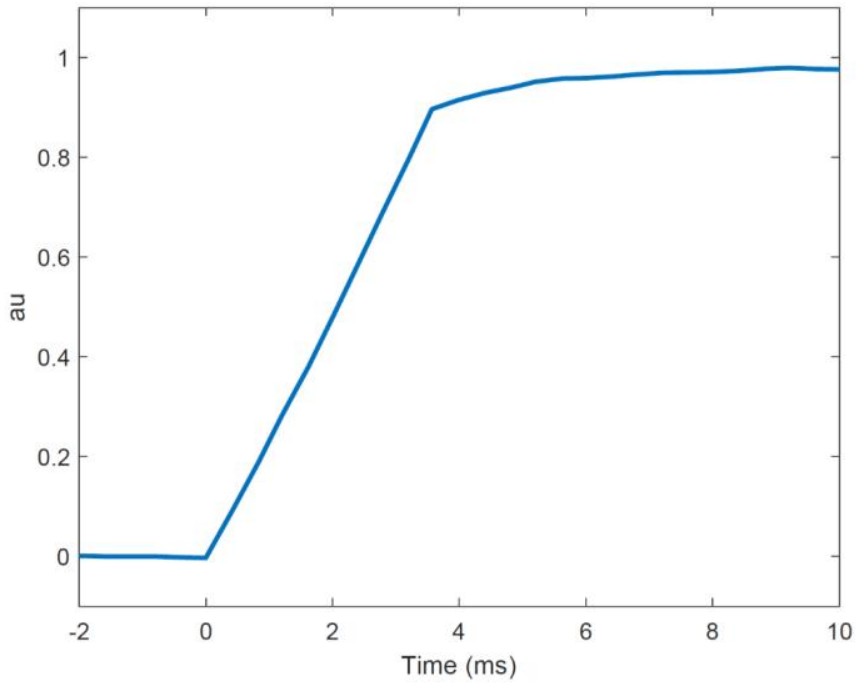
产品尺寸图如上

AOL 1810 闭环中 Zernike 模式的测量
（10 mm 孔径透镜，波长为 633 nm）

像差（特征值）	峰谷（波长为 633 nm）	均方根（波长为 633 nm）
水平倾斜	20	5.5
竖直倾斜	20	5.5
数值像散	11	2.5
离焦	8	2.7
斜向像散	11	3.0
竖直三叶形	7	1.4
竖直彗差	3.5	0.7
水平彗差	3.5	0.7
斜向三叶形	7	1.3
竖直四叶形	4	0.7
竖直二阶像散	1	0.2
水平二阶像散	1	0.2
斜向四叶形	4	0.7

下图为 AOL1810 透射光谱（未涂层表面）





上图为 AOL1810 特征响应时间（单个执行器）：＜ 3 ms

2. 变形反射镜

变形反射镜在经过镀高反射率和高损伤阈值膜之后，损伤阈值高达 20 J/cm²@ns 和 5 J/cm²，延迟色散低，适用于高功率激光和连续激光的各种运用中。

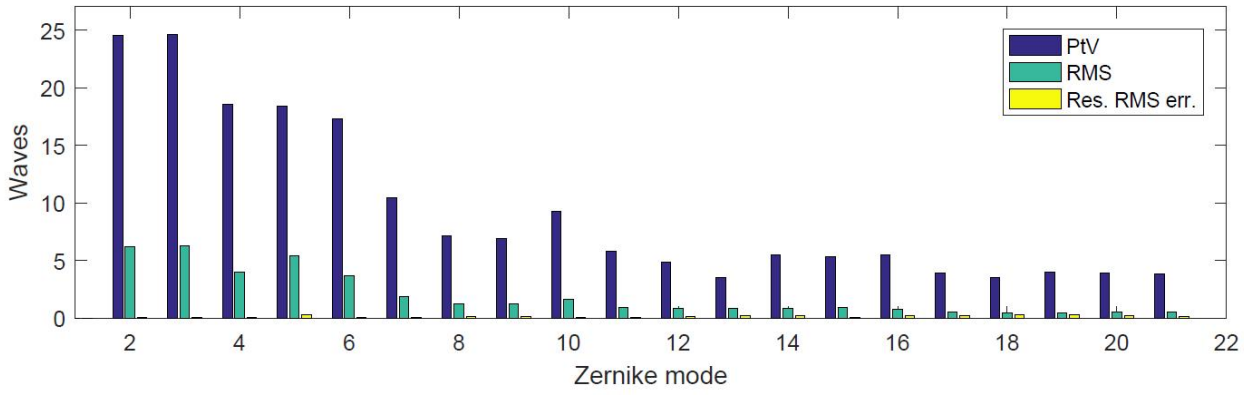


变形反射镜规格参数

通光孔径	10 mm-200 mm
涂层	金属或介电材料（R 大于 99.99%，高损伤阈值）
响应时间	依据镜面形状大小
通道数	32-96
电子驱动器尺寸	117 mm×80 mm×32 mm
电源电压	12 V

闭环中 Zernike 模式的测量

（18 mm 变形反射镜，1 个单位的波长=0.633 nm)



3. 夏克哈特曼波前传感器

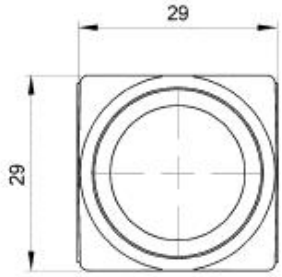
意大利 Dynamic Optic 提供的 Shack-Hartmann 波前传感器在采集速率和易用性之间做到了最佳平衡。便于上手的同时能最高达到 1 kHz（8×8 质心）。

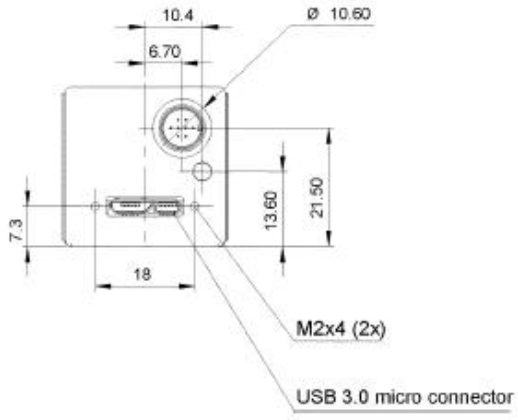


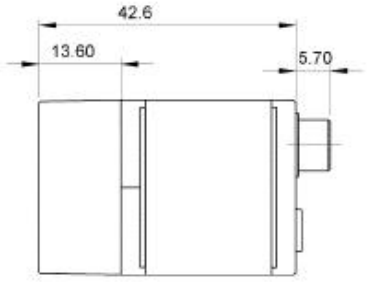
波前传感器参数值

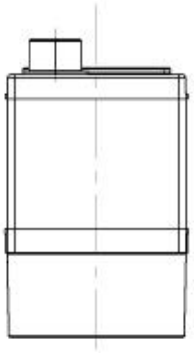
微透镜阵列	150 um 间距， 5.2 mm 焦距(可定制）
帧率	500 fps（1000 Hz）
传感器尺寸	9 mm×7.13 mm
孔径	9 mm
驱动电压	5 V
通信接口	USB3.0
控制	闭环、开环均可
编程	可通过 TCP-IP 进行编程
操作系统	Windows8/10×64
与其他变形镜的兼容性	Alpao, Adaptica, OKO, BMC, Thorlabs and Dynamic Optics

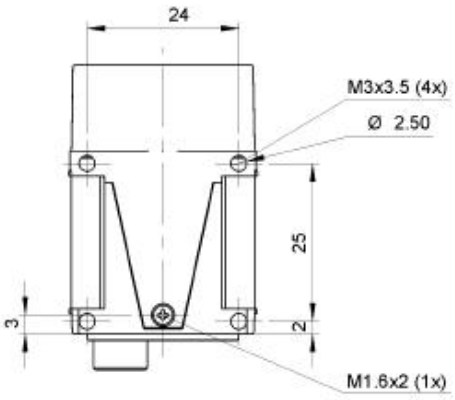
波前传感器尺寸图


29
29

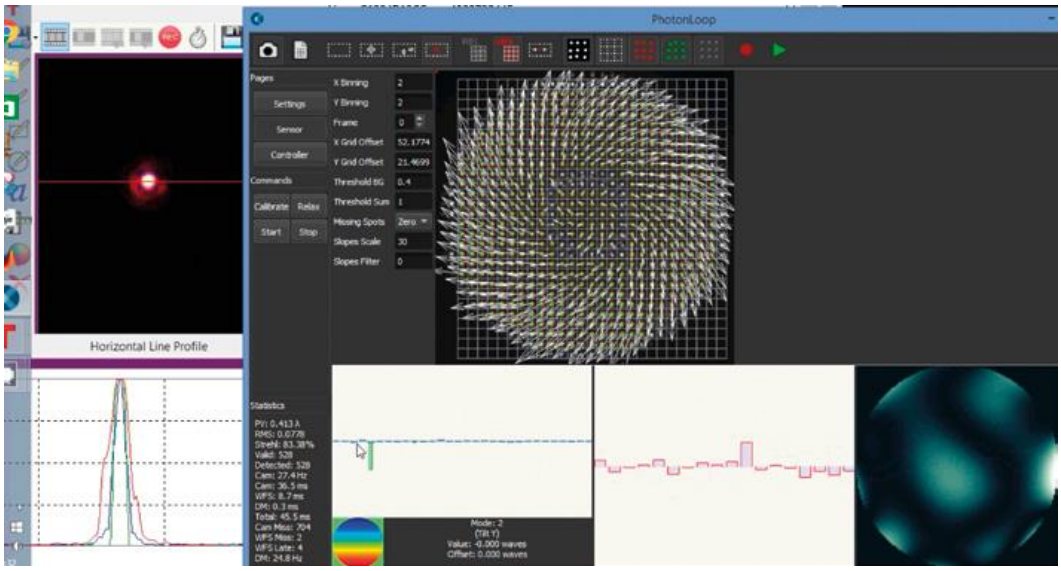

10.4
Ø 10.60
6.70
7.3
13.60
21.50
18
M2x4 (2x)
USB 3.0 micro connector


42.6
13.60
5.70

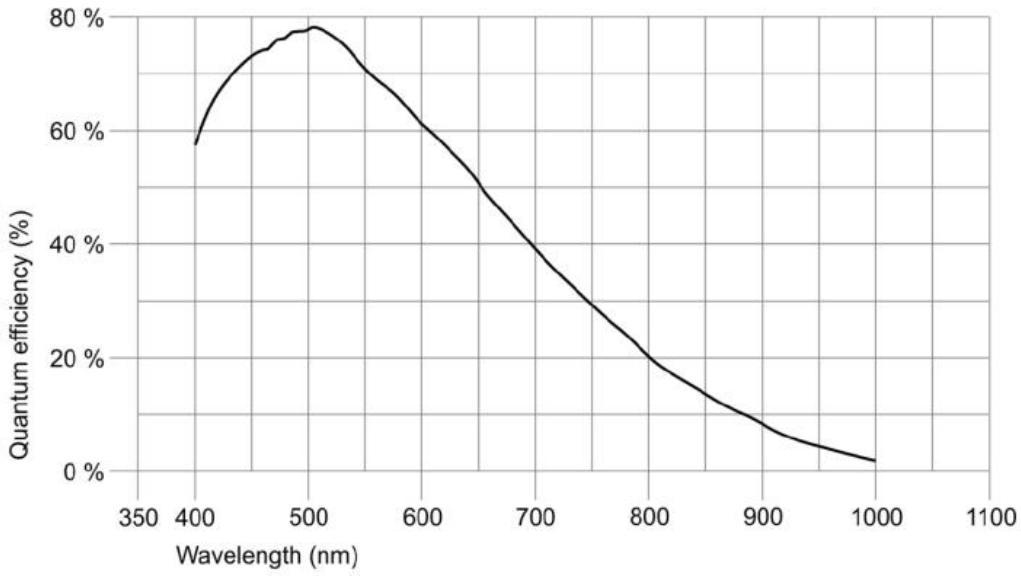



24
M3x3.5 (4x)
Ø 2.50
25
3
2
M1.6x2 (1x)

4. PHOTONLOOP（波前分析与控制软件）



上图为软件界面



上图为波前传感器量子效率

探测器数据

像素尺寸	586E-06	m
增益转换因子	81	e-/LSB
暗噪声	736	e-
满阱容量	305E+04	e-
ADC 分辨率	12	bit

5. PZT mini 控制器（驱动程序）

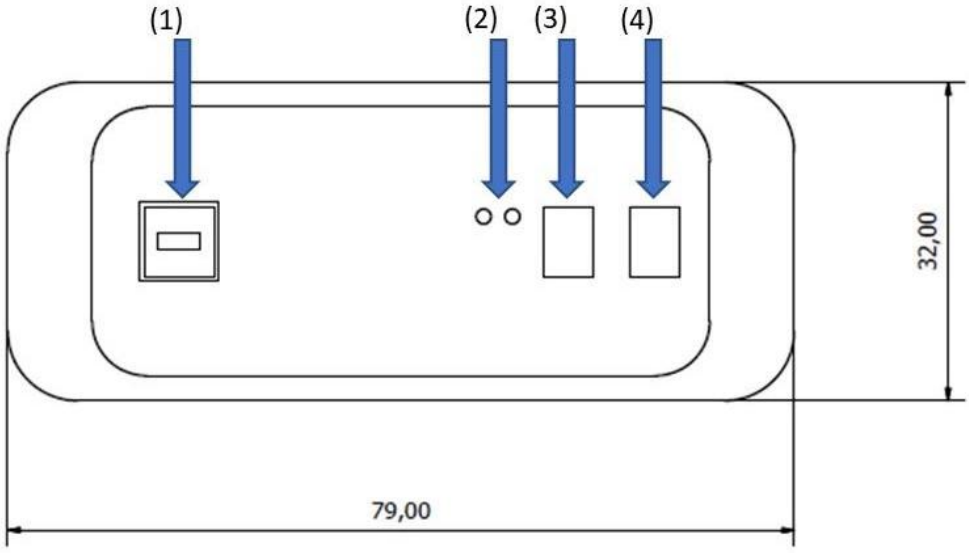
用于动态光学多执行器自适应透镜和变形反射镜的高压驱动器。



PZTmini 控制器参数

输出通道	18/32
输出电压	+/-125（0-250 V)
电源电压	12 V
通信端口	USB2.0
尺寸	117 mm×79 mm×32 mm
软件驱动程序	兼容 PHOTONLOOP 软件和 Matlab

PZT mini 尺寸图



（1）USB 接口 （2）LED 指示灯 （3）开关按钮 （4）12 V 电源插头

6. 可调焦透镜

该 AO 系统是一款可安装在定焦镜头前以快速改变焦距的调焦模块。相较于使用传统电动机械式移动镜头解决方案，该 AO 系统可以更快地重新对焦镜头。内置驱动器是专门为精确控制压电元件而开发的，可实现不同焦距的精准调制。具有基本控制功能的演示用户界面。该镜头可以通过专用的 .dll 库进行控制，该库可从 Opto Engineering® 网站下载。该库包含自动对焦算法和校准工具，可帮助用户将 AO 系统集成到他们的产品或应用程序中。



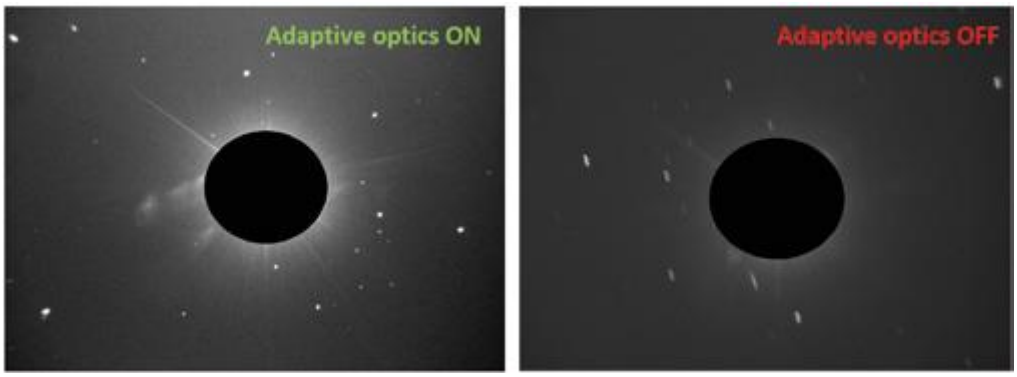
型号		AOL0223A	AOL0223B
光学参数	离焦	(Min)0 (max)+3.5	(Min)-3.5 (max)0
	通光孔径	23 mm	
	扫描频率	100 Hz	
	透过率	＞ 90%	
电学参数	直流电压	24 V	
	能量消耗	5 W	
交互	控制器	RJ45, 12-pin Hirose	
	界面	以太网，RS232，模拟控制，数字控制等	
尺寸	安装	M30.5×0.5	
	长*宽*高	116×63×26.7 mm	
配件		CBGPIO001, CBETH003, AO 机械适配器	

7. 意大利 Dynamic Optic 产品的应用

- 望远镜

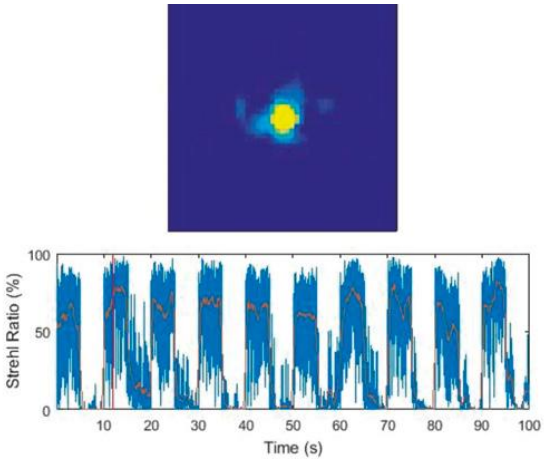
在望远成像领域，大气湍流带来的像差对成像影响极大，而传统的自适应光学一般采用可变形镜来矫正，这带来的很大问题就是，可变形镜是反射镜，会极大增加系统的复杂度。

而意大利 Dynamic Optic 的特色产品：自适应变形透镜就完美的解决了这个问题，它能有效降低系统的复杂度。各种中小型的望远镜中需要整个 AO 系统尽可能紧凑，体积尽可能小，自适应变形透镜在这里就发挥出了极大的优势。



上图为使用自适应光学与未使用自适应光学获得的图像

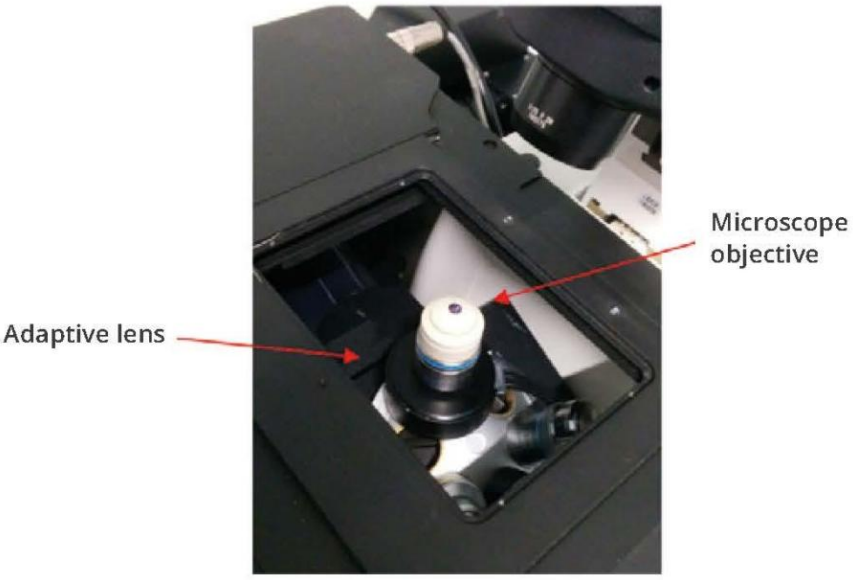




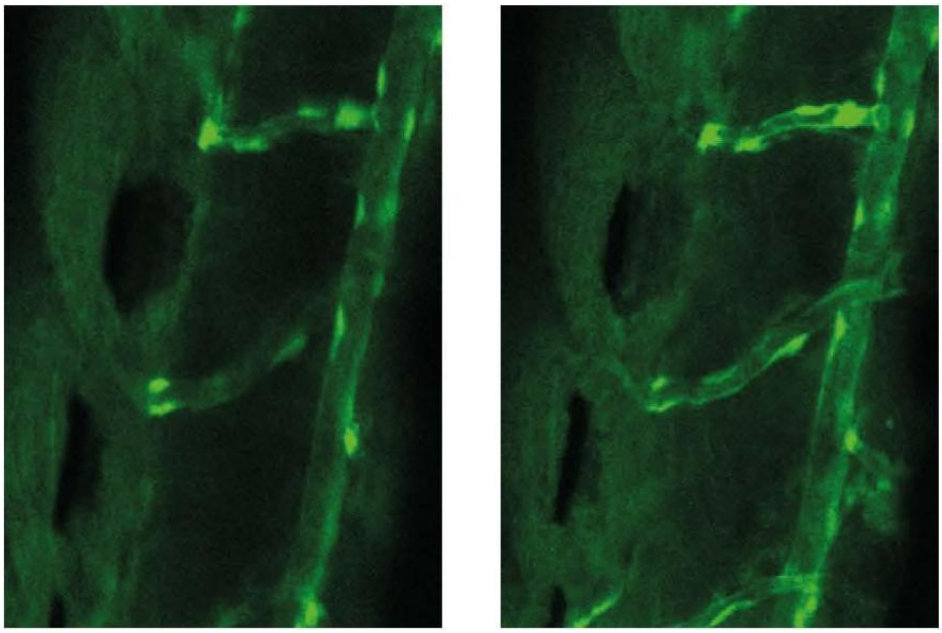
- 显微成像

在显微成像中，有时候由于取样导致的像差，会让显微成像模糊不清，而自适应光学的矫正能有效改善这点。

一般显微镜都是比较精密的，光学系统复杂紧凑，此时自适应变形透镜较一般变形镜具有更高的上限，能方便的与现有显微系统集成。



上图为显微镜内自适应透镜的集成示例

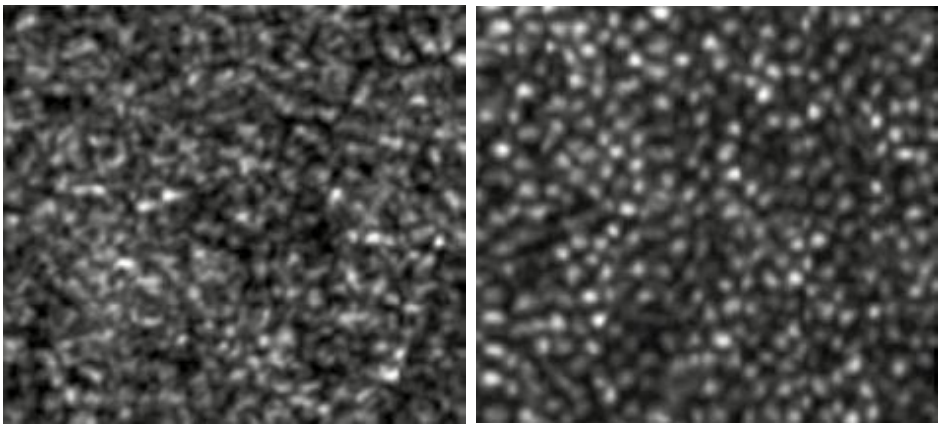


左：优化前；右：优化后

用共焦显微镜拍摄的斑马鱼输精管的活体图像

- 视网膜成像

自适应镜头是实现高分辨率视网膜成像的紧凑型 AO 系统的理想工具。



人类视网膜光感受器的体内图像

左：优化前；右：优化后

- 高功率激光

高功率激光往往都伴随着高功率产生的热量，这些热量会引入各种意料之外的像差。采用变形反射镜可以有效减少这些像差，不仅如此，变形反射镜还能提供激光脉冲整形功能。

能够承受高功率激光的前提是，变形反射镜有镀高反射率和高损伤阈值的膜，镀膜后最高能承受 20 J/cm² 的能量脉冲和 4 kW 的高功率激光。

- 自对焦系统

在一些大通光孔径并要求自动调焦的光学系统中，意大利 Dynamic Optics 的可调焦透镜能发挥极大作用。调焦透镜能直接方便快捷的安装在相机镜头上，并提供高达三个屈光度以进行调焦。



DO 的自适应镜头可以安装在相机物镜上，并提供多达 3 个屈光度的调焦

十、常见问题回答

（Frequently Asked Questions）

1. 关于公司自研业务

(1) 贵公司有哪些自研产品，各有什么优势？

灵动智能光学（杭州）有限公司，专注于提供领先的自适应光学核心器件与解决方案。我们以核心器件自主研发为基础，以系统级集成能力为驱动，成功构建了覆盖器件、模块到完整系统的技术闭环。

本公司标志性成果是自适应光学整套演示系统，该系统是一款面向器件开发、实验验证与工程演示的综合平台，完整呈现自适应光学（Adaptive Optics, AO）系统的工作原理与闭环控制过程。其三大核心组件（变形镜、波前传感器、波前控制器）全部实现了自主研发与国产化，采用全光路开放式设计，具备高带宽、大行程、实时可视化操作特点，适用于新型算法与器件的验证与高校课程教学及科研实验演示，也广泛适用于激光加工、天文观测激光通信及前沿科学研究等领域，为高端光学应用提供稳定、灵活的核心技术支撑。

- 高速大口径变形镜

  采用高行程压电堆栈致动器与大口径镜面设计，可同时满足大口径、快速响应和大形变量的波前校正需求。

- 高速波前传感器

  具备千赫兹级响应速度与高分辨率能力，可实时捕获并解析波前信息，为自适应光学系统提供高效、可靠的校正基础。

- 自研可视化波前控制器软件

  集成多项光学控制功能，提供实时、直观的波前数据展示与分析，大幅提升系统操作效率与控制精度。

- 自适应光学闭环控制系统

  集成自研变形镜、波前传感器与波前控制器，构建完整的闭环系统，实现波前误差的实时校正，获得理想的输出面型。

以上产品与技术均可根据您的具体应用场景进行深度定制，为激光加工、天文观测、生物成像及高端科研提供坚实可靠的核心技术支撑。

(2) 贵公司变形镜的最大行程是多少?

变形镜的最大行程与具体型号相关。我们在技术参数中列出了机械最大行程和等效光学波前行程（通常，等效光学波前行程约为机械行程的两倍）。目前，公司大行程变形镜的最大行程可达 20 μm（光学调制量为 40 μm）。若需要更大形变量，请联系我们进行定制生产。

(3) 贵公司提供的变形镜的类型有哪些?

目前，公司已自主研发并推出一系列压电堆栈变形镜产品，相关产品已成功应用并交付至多家科研院所和高校。与此同时，我们正与 OKO 合作开展微机械薄膜变形镜的联合研发工作，相关产品预计将在未来推出。

(4) 贵公司的变形镜产品对入射光强有没有什么要求?

公司目前的变形镜产品主要采用金属膜系，如保护铝膜和保护银膜。对于金属膜，功率范围一般在几十瓦至百瓦级。如存在更高功率激光应用需求，可与我们联系，我们可根据具体工况定制特殊介质膜变形镜产品，以满足高功率使用要求。

(5) 系统是否提供完整的软件和控制接口?能否支持自定义控制算法?

灵动自适应光学闭环控制软件提供 完整的软件开发包（SDK）和模块化控制接口，支持用户接入不同品牌的变形镜和波前传感器（或相机）。同时，系统允许用户自定义控制算法，以满足特定应用需求。

(6) 变形镜的反射率和波长范围是多少？

公司现有的变形镜产品主要采用金属膜系，例如保护铝膜。以保护铝膜为例，其适用波长范围覆盖 400 nm – 12 μm，在该波段内平均反射率可达 85%以上。此外，针对特定应用场景，我们也可提供其他金属或介质膜选型，以满足不同波长和高反射率的需求。

(7) 你们的变形镜在非激光应用中的表现如何？

公司的变形镜不仅在各类激光系统中表现稳定可靠，同时在非激光光学系统中也有广泛应用。典型案例包括积分球光源、望远镜、显微光学等领域，满足各类光学实验和工程应用需求。

(8) 能否提供详细的技术文档或测试报告？

公司在变形镜研发阶段投入了大量时间进行性能测试和验证，因此相关技术资料、测试报告都非常齐全。客户在购买或合作前，可获得完善的技术文档，以便深入了解产品性能和适用性，同时支持定制化方案设计。

(9) 是否提供技术培训和操作指导？

是的，我们公司提供全面的技术培训和操作指导，以确保客户能够充分掌握和应用我们的变形镜及控制系统。具体内容包括：

产品培训：

在设备交付后，我们将为客户提供现场培训或线上培训，涵盖设备安装、操作、维护和常见问题处理等方面。我们的培训内容将帮助客户的工程师和操作人员熟悉系统的每一个细节，确保产品能够在最短的时间内投入使用。

技术支持：

在产品使用过程中，客户可以随时联系我们的技术支持团队，获得实时在线支持，以及针对特定应用或问题的专业解答。此外，我们还提供详细的用户手册，帮助客户了解如何最大化利用系统的功能。

定期回访和进阶培训：

对于长期合作的客户，我们提供定期回访服务，以便了解使用过程中可能遇到的新问题，并根据客户需求安排 进阶技术培训。这些培训内容主要针对新功能的应用、系统升级和优化操作，确保客户在技术更新和系统扩展时始终保持领先。

定制化指导：

如果客户有特定的应用需求或操作环境，我们还可以提供定制化的操作指导和技术咨询，帮助客户设计和调试最适合其需求的系统配置。

2. 关于公司代理业务

(10) 贵公司所代理的 AO 产品各有什么特点？价格怎样？

本公司目前主要代理荷兰 OKO 公司、意大利 Dynamic Optics 公司、法国 ALPAO 公司以及国内自主品牌的自适应光学产品。每家公司的产品各有所长，价格不一。

荷兰 OKO 公司由 Gleb Vdovin 博士于 1997 年创立，历史比较长，产品丰富且经久耐用，主要包括：微机械薄膜变形镜（MMDM）、压电变形镜（PDM）、波前传感器、波前分析和闭环控制软件 FrontSurfer、全套闭环自适应光学系统、自适应光学仿真软件、图像稳定软件等。OKO 公司产品性价比较高，例如，经典款 15 mm、37 单元的 MMDM（又称“OKO Mirror”）及配套驱动价格不超过 10 万元人民币，自公司创立以来就畅销至今，已经被广泛用于天文、激光、显微等领域。PDM 可用于大幅度畸变的校正、以及高功率激光的畸变校正，可承受高达 15 kW 的光功率负载，适用于高能激光领域。

意大利 Dynamic Optics 公司的产品主要包括：变形透镜（Deformable Lens）、双压电变形镜（Bimorph DM）、压电变形镜（Piezo DM）、波前传感器、波前分析和控制软件 Photonloop、全套闭环自适应光学系统等。其特色产品变形透镜采用透射波前校正的方法，可有效降低 AO 系统的复杂度和系统体积，被较多用于生物显微成像、视网膜成像等对体积、装调灵活性要求较高的领域，性价比较高。基本款 18 执行器变形透镜及配套驱动的价位也在十万元人民币左右。变形镜可承载大功率激光，适用于高能激光光束质量校正。

法国 ALPAO 公司位于阿尔卑斯山脚下，“ALPAO”取“ALPHINE”和“AO”之意。公司产品主要包括：高速薄膜变形镜、高速波前传感器、实时波前分析和控制系统 ACE fast、闭环自适应光学系统。产品主要特色在于：多执行器、高速、大行程、高平整度。例如，变形镜具有几百、甚至上千个执行器；变形镜的阶跃响应上升时间可低至 0.4 ms、波前传感器刷新频率可达 kHz 量级、控制系统刷新频率可达 5 kHz 等。非常适用于对光束波前畸变进行高速、高精度动态校正，例如无线激光通信、天文观测、光刻设备检测等。公司产品已被用于多个大望远镜、无线激光通信、光刻检测项目。

国内品牌自适应光学产品拥有多项自主核心技术，产品性价比较高。产品主要包括：小型化单压电变形镜、液体可变形透镜、水冷式变形镜等。可变形透镜采用环形压电驱动技术驱动镜面变形，挤压通光口径内的液体介质，实现对低阶像差的高精度校正。水冷式变形镜采用独创的水冷腔设计实现冷却液与电路之间的隔离，通过压电环形驱动技术驱动镜面变形，实现对低阶像差的高精度校正，主要针对高能激光束校正等领域。

(11) 公司只做 AO 产品代理吗？有什么特色？

公司最大的特色在于“技术”和“国际化”。

我们的研发团队具有较强的技术实力和国际化视野，是荷兰 OKO 公司授权的国内技术支持和售后服务中心。因此，我们不仅代理销售国内外的自适应光学产品，而且还提供自适

应光学系统设计、产品选型、产品维修（目前仅限荷兰 OKO 公司）、技术咨询服务。

目前我们已经和国内多所高校和研究所开展了自适应光学系统二次开发、系统定制、合作科研项目，使得自适应光学器件（或系统）更好地融入原有的显微、激光、通信光学系统。我们也希望未来能够与更多的科研团队进行深入合作！共同推动我国 AO 事业发展！

(12) 公司所提供的技术支持主要包括哪些内容？有没有以往项目案例？

本公司曾为客户提供以下服务：

- AO 系统选型设计：根据客户要求，对国内外 AO 产品进行优化选型，选取最适合客户要求的 AO 产品；
- 定制化 AO 控制软件研发：将 A 公司的变形镜与 B 公司的波前传感器组成闭环自适应光学系统，实现闭环像差校正；用户可对控制参数进行设置，并可获取系统状态参数（如波前传感器点阵图像、畸变量等）；
- 软件算法集成：将本公司开发的软件与客户软件进行集成。

(13) 贵公司代理的自适应光学产品的接口、兼容性、二次开发自由度怎么样？

本公司代理的变形镜、波前传感器等自适应光学产品大都自带软件开发包（SDK），用户可以在 Windows/Linux 环境下，用 C/C++、Python 语言进行二次开发，开展自研硬件、软件、算法的测试。但是，每家公司的自适应光学软件一般只支持该公司的硬件产品（或者需要额外开发），因此如需采用不同公司的软硬件进行搭配，请仔细询问本公司技术销售人员。

此外，本公司还提供软件二次开发服务，可根据用户需求进行硬件选取，并根据硬件配置编写 Windows/Linux 环境下的分析控制软件，实现定制化功能开发，进行硬件、算法、系统的性能测试。

3. 自适应光学一般问题

(14) 变形镜执行器排列方式有哪几种？

变形镜的执行器排列方式一般有六角形排列、正交排列、中心放射状排列等几种方式。这些排列方式与波前传感器微透镜阵列的排列方式（主要包括六角形排列、正交排列等）一致，可以起到较好的闭环波前校正效果。

例如，荷兰 OKO 公司的变形镜排列方式大致如下：

- 六角形排列：37 通道 MMDM、19/37/79/109 通道 PDM；
- 正交排列：19/38 通道 MMDM，69 通道 PDM、20 通道线性 PDM；
- 中心放射排列：39/59/79 通道的 MMDM。

(15) 各类型变形镜的响应速度有何区别？

变形镜的响应速度与其驱动机理、执行器数量、镜面材质、大小、驱动电路带宽等参数都有关系，各公司所生产的变形镜响应速度不一样，阶跃响应上升时间一般在 ms 量级，也有高速产品响应时间小于 1 ms，详情请见变形镜产品性能对比表和产品手册。

(16) 如何计算变形镜校正了多少波长的畸变？

变形镜的校正能力主要取决于其表面形变能力，不同厂家、不同型号变形镜的校正能力也不一样，具体可以参考每款产品具体的技术指标。对于反射式变形镜来说，因为光路来回 1 次，因此其所能校正的波长数等于其 2 倍形变量除以波长；对于透射式变形镜来说，其所能校正的波长数等于其形变量除以波长。

(17) 波前畸变怎么来表示？

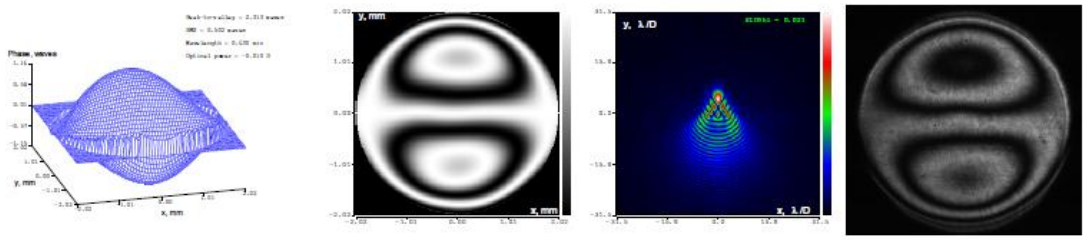
波前是个三维曲面，可以用符号Φ(x,y)来表示，其中 x，y 分别表示平面坐标，Φ表示平面坐标(x,y)点的坐标或者形变量。可以逐点定义曲面上各点的形变量，也可以将曲面表示为若干基曲面的线性组合（即用模式法表征波前）。

例如，利用 Zernike 模式的单位正交性，就可以将任意波前分解多个 Zernike 模式的线性组合，通过 Zernike 模式的系数来表示波前。这样可以大大减少表征波前畸变的参数的个数，同时便于分析波前畸变的主要成分，如倾斜、像散、球差、慧差等。

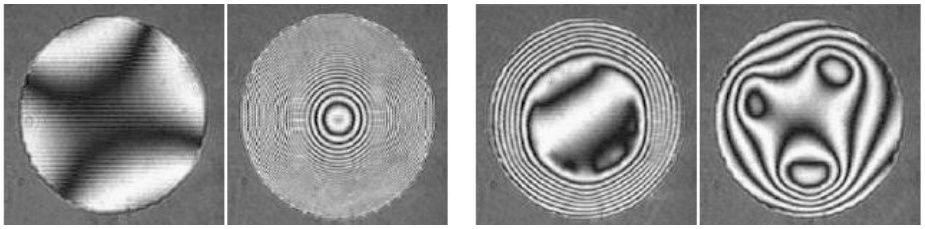
(18) 为什么软件和产品手册上用干涉图来表示波前？

波前是三维曲面，为了形象地显示波前，一般会把波前表示为三维空间中的曲面，或者表示成干涉图像。

例如，在荷兰 OKO 公司研发的 ForntSurfer 软件中，就用了三维图和模拟干涉图像（与平行光干涉）显示波前传感器测量得到的波前曲面（见下图）。在荷兰 OKO 公司产品手册中，也有很多实际测量得到的变形镜与平行光的干涉图像。根据干涉图像，可以更形象、更直观地展示光束的波前畸变程度、以及变形镜对波前的校正能力。



（从左向右：波前三维图、模拟干涉图、模拟远场光斑图、实测干涉图像）



（从左向右：MMDM 施加 0V 电压，所有执行器施加最大电压，
中心执行器施加最大电压，随机电压）

(19) 变形镜与 DMD 有什么区别？

DMD 是 Digital Micromirror Device 的简称，是一种光学 MEMS 器件，由一系列高反射率的微小镜片组成。

1) DMD 表面是离散的，每个微镜片就类似于图像传感器的一个像素，因此常用分辨率描述 DMD 对于光束方向的调控能力。变形镜表面一般是连续的（大口径离散镜面的变形镜除外），常用其所能产生的镜面形变复杂程度（如 Zernike 模式的阶数）来描述其对光束波前的调控能力；
2) 变形镜所适应的光谱波段范围较广，对波段的限制更小；
3) 变形镜可对高阶泽尼克畸变进行校正，一般用于对波前校正要求较高的领域，例如天文、生物显微成像、激光、光刻等，而 DMD 一般用于投影、照明等领域。

(20) 变形镜执行器之间的间距是多少？

不同变形镜的执行器之间的间距不同，具体间距需要看变形镜的尺寸、型号。

例如，荷兰 OKO 公司的变形镜执行器之间的间距一般是：6.83 mm@19、4.30 mm@37、4.75 mm@69、4.72 mm@79、4.30 mm@109。法国 ALPAO 公司的变形镜执行器间距有：0.8/1.5/2.5/5.0 mm。

(21) 变形镜的执行器有不同数量，是否意味着也有分辨率的说法呢？

变形镜的执行器越多，其镜面形变程度就越复杂。一般来说，变形镜的形变能力一般用其产生 Zernike 形变的阶数来衡量，例如，可校正 5 阶 Zernike 畸变等。

DMD 或者 SLM 也可对光束进行调控，但是它们的表面是离散的，类似于图像传感器的“像素”，因此，DMD 或者 SLM 对光束的调节能力常用其分辨率来评价。

(22) 变形镜能将高斯光调成平行光吗，还是只能进行调焦？

变形镜的主要作用就是用于光束波前的调节。通过改变变形镜各执行器的控制电压，可以使变形镜镜面产生多种复杂的形变。只要形变得当，是可以将高斯光调制成平行光的。此外，变形镜还可以产生不同阶数的 Zernike 形变，如离焦、散焦、球差、慧差等。

(23) 变形镜能否用于高功率激光？能量阈值是多少？

变形镜经过特殊镀膜能承受高功率激光，每款产品的能量阈值不同。

荷兰 OKO 的 MMDM 在普通镀膜情况下能承受 3 W 激光，特殊镀膜能承受 500 W, 功率密度 2 kW/cm^2。OKO 的 PDM 在特殊镀膜下可承受 30 kW 高功率的激光。

意大利 Dynamic Optics 的变形透镜至少可承受 10 mJ 的飞秒激光。Dynamic Optics 的变形镜适用于大功率激光，可根据客户要求进行镀膜定制。

法国 ALPAO 公司的变形镜激光损伤阈值（LIDT，镜面镀银）为：880 mJ/cm^2(@12 ns,10 Hz,1064 nm,脉冲激光) 或者 50 W (@1064 nm，连续激光)。

(24) Dynamic Optics 的微透镜阵列能做到多小？口径最大能做到多少？

Dynamic Optics 的微透镜阵列的间距为 150 μm，无论其间距还是口径（面积）都可以根据用户的要求定制。波前传感器的尺寸为 9 mm×7.13 mm。

4. 关于荷兰 OKO 公司的 AO 产品

- **变形镜**

(25) 什么是 MMDM？

MMDM 全称是 Micro-machined Membrane Deformable Mirror，即“微机械薄膜变形镜”。荷兰 OKO 公司是世界上较早生产薄膜变形镜的公司，其制造的 MMDM 有 1、17、37、39、59 和 79 个控制通道。

荷兰 OKO 公司 MMDM 的薄膜由一层氮化硅或者氮化物-聚合物-氮化物三明治构成（厚度为 0.5 μm－10 μm）。该薄膜表面再镀一层薄薄的铝或金，能够对入射光产生高反射率。薄膜被固定在硅框架上，并悬浮在许多平面电极上。

利用静电吸引原理，当给一个或多个电极施加电压时，薄膜就会发生局部形变。给不同电极施加不同电压时，薄膜就可以随之产生不同的形变，对入射光的波前进行调控。

(26) MMDM 尺寸有多大？

OKO 制造的 MMDM 分为圆形镜面和长方形镜面(Linear MMDM)两种。

圆形 MMDM 通道数一般是 1、17、37、39、59 和 79，直径为 10、15、30、40 和 50 mm。

线性 MMDM 的尺寸是 11×39 mm。

(27) 什么是 PDM？

PDM 全称是 Piezo-electric Deformable Mirror, 中文译名“压电变形镜”。荷兰 OKO 公司制造的 PDM 有 18、19、37、79 和 109 个控制通道。

荷兰 OKO 公司生产的 PDM 由多个压电执行器支撑一个连续的玻璃镜面构成。

利用压电效应，当给执行器施加电压时，执行器就会发生形变，带动玻璃镜面发生形变。如果给不同执行器施加不同电压，镜面就会随之产生不同的形变，对入射光的波前进行调控。

(28) PDM 的尺寸是多少？

OKO 公司制造的 PDM 分为圆形镜面和长方形镜面(Linear PDM)两种。

圆形 PDM 通道数有 18、19、37、79 和 109，直径为 30 和 50 mm。

线性 PDM 的尺寸是 10×55 mm，具有 20 个执行器。

(29) OKO 变形镜的初始面形怎么样？

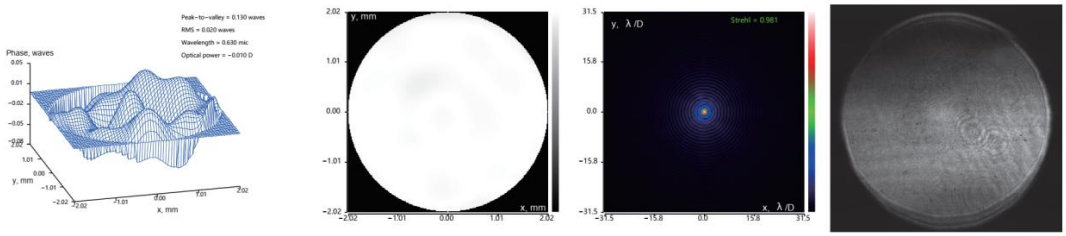
OKO 变形镜的“scratch/dig”值一般是 20/10。如有特殊要求，可以提供 scratch/dig=10/5 的变形镜。

(注：scratch 表示划痕的最大宽度，单位：微米；dig 表示圆形缺陷或斑点的最大直径，单位 0.01 mm。 scratch/dig=10/5 表示划痕最大宽度 10 微米；圆斑的最大直径是 0.05 mm。

商用镜头一般要求 scratch/dig=60/40；低功率激光一般要求 40/20；中等功率激光、或者高质量物镜中心区域要求 20/10；对于高能激光，一般要求 scratch/dig=10/5。）

MMDM 的初始面形较平坦。直径 15 mm、37 通道的 MMDM 在 10 毫米孔径内的散光（Astigmatism）条纹少于 1 条。大口径的 MMDM 有 8 个调整螺钉，可以通过螺丝调整镜子的初始面形，产生较高的光学平整度。PDM 的初始面形也比较平坦。

在闭环情况下，OKO 变形镜的平整度可以达到 9 nm (rms)。下图所示为口径为 50 mm 的 PDM（39 执行器）经过主动镜面找平的结果，从左到右依次为：重建波前、模拟干涉图、模拟远场、测量干涉图。



(30) MMDM 和 PDM 校正像差的性能如何？

薄膜变形镜（MMDM）和压电变形镜（PDM）都具有连续镜面，因此能很好地校正平滑的连续像差，而且不会额外引入边界像差。

标准 37 通道 15 mm 的 MMDM 可以提供 20 μm 的离焦校正量，可校正幅度高达 3 μm 的 Zernike3 阶和 5 阶像差。79 通道的 MMDM 可以纠正所有 5 阶的 Zernike 像差。

19 和 37 通道的 PDM 可以校正大幅度的低阶像差。

(31) MMDM 和 PDM 镜面材质有何区别？为何会有承受激光能力的区别？

MMDM 的镜面是一层薄膜，其表面镀高反射率的金属或者介质反射膜。PDM 的镜面是石英玻璃，玻璃表面镀高反射率的金属或者介质反射膜。

MMDM 在高功率激光照射下，其表面会受热，引起薄膜表面温度上升，表面应力降低，同时薄膜受热膨胀产生一定的形变。以下实验结果显示了 MMDM 用于高功率激光的情况：

- 在 MMDM 表面镀反射率 99.8%的膜，镜面可承受 10 mm、500 W 的连续激光；
- 激光功率：70 W，功率密度：20 W/mm^2；
- 镜面直径：10 mm、19 通道 MMDM，12 层介质膜，可承受 6 mm 直径、600 W CV YAG 激光；
- 激光功率 500 W，功率密度：2 kW/cm^2。

PDM 可承受激光功率较高，最高可承受 30 kW 的连续激光。

（详见荷兰 OKO 公司产品手册 2.8，2.9 节。）

(32) 是否可以使用 MMDM 或者 PDM 进行倾斜校正（扫描模式）？

一般来说，MMDM 和 PDM 均能校正一定程度的倾斜（tip/tilt），但其主要目的并非校正倾斜（倾斜为 2 阶 Zernike 畸变，属很低阶的像差），而在于校正高阶像差畸变。用 MMDM 或者 PDM 校正倾斜，有些大材小用，而且会浪费其对高阶像差的校正能力。

通常的做法是在光路里面再加装一个倾斜镜（tip/tilt mirror、fast steering mirror，又称偏摆镜、快反镜），专门用来校正倾斜畸变，但这样的做法会增加光路的复杂程度，尤其是当需要 4f 系统进行共轭的时候就很麻烦。

荷兰 OKO 公司专门生产了一种 2 通道的偏转台，可以将 MMDM 和 PDM 变形镜（例如 15 通道 MMDM）直接装在偏转台上。利用偏转台校正倾斜，同时利用变形镜校正高阶像差，从而达到对高低阶像差良好的校正效果。

偏转台可承载变形镜口径为 10-25 mm，偏转角度为+/-1 mrad，最高工作频率为 300 Hz。

(33) OKO 变形镜的光功率负载能力怎么样？

标准的 15 mm 铝涂层 MMDM 可以承受在可见光范围内高达 3 W 的光功率负载。根据用户要求，可以在 MMDM 表面涂上高反射率的金属-电介质涂层，使其能承受高达 500 W 甚至 1 kW 的光功率负载。

PDM 镜面也可以涂上高反射率的涂层，使其能承受高达 15 kW 的光功率负载。

(34) 什么是“偏置操作”？

因静电力吸引，MMDM 的薄膜只能向电极方向发生形变，产生凹面光学形状。为了实现双向操作，应给电极事先施加一定电压，使得镜面薄膜朝向电极发生形变，并以此为初始状态。后续再调整控制电压，薄膜就可以向正反方向发生双向形变。

(35) MMDM 响应的线性度如何？

MMDM 表面的位移与施加电压的平方成正比。镜子的响应可以使用开平方根的操作进行线性化。对于 8 位偏置数字控制，可使用以下表达式将控制信号 CS（范围-1……1）转换为直接应用于控制镜像执行器的数字板的控制字节 CB：

$$CB = (int)sqrt(0.5 * (CS + 1)) * 255$$

该公式提供了控制信号 CS 与镜像位移之间的线性对应关系，并在 CS=0 时将镜像设置为理论偏置位置。MMDM 的迟滞性可以忽略不计。

(36) PDM 响应的线性度如何？

OKO 的压电变形镜具有较好的线性响应，但是有 7-10%的滞洄（Hysteresis，又称磁滞、迟滞）和 1%的蠕变（Creep）。在使用过程中，可以通过控制程序将滞洄减少 5 倍。

注：滞洄会在系统中引入不确定性，因此对自适应光学系统的性能造成一定影响，尤其

对开环系统影响更大。因此有很多关于如何消除滞洄的研究或者方法，比如：在控制算法中引入反滞洄模型、改电压驱动为电流驱动、加装电阻应变片传感器并进行局部闭环反馈控制等。但是，对于闭环自适应光学系统而言，因为传感器不断地测量形变数据、控制系统不断更新执行器的控制信号，所以可以在很大程度上减轻滞洄对闭环性能的影响。

(37) 什么是“FrontSurfer”？

“FrontSurfer”是荷兰 OKO 公司研发的一种基于 Shack-Hartmann 波前传感器和变形镜的波前分析和闭环反馈控制软件。

其应用主要包括：波前测量分析、基于波前测量结果的变形镜反馈控制、透射和反射光学器件的光学测试、光学系统的对准等。

(38) “FrontSurfer”波前传感器包括什么？

包括“FrontSurfer”软件和一个测量探头（Hartmann 或者 Shack-Hartmann 波前传感器）。Hartmann 波前传感器由一个精确的 Hartmann 掩模和一个 CMOS(或 CCD)相机组成。在 Shack-Hartmann 传感器中，掩模被一个微透镜阵列所取代。

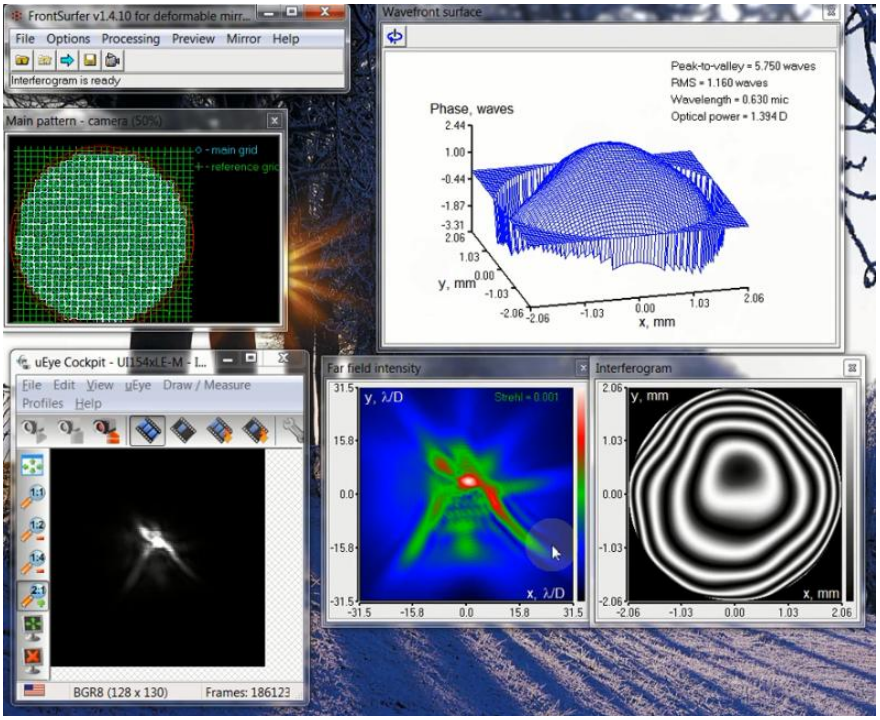
(39) “FrontSurfer”支持反馈控制吗？

“FrontSurfer”有两个版本：开环版本、闭环版本。

开环版本仅进行波前测量和分析。闭环版本在波前测量分析的基础上还支持变形镜实时反馈控制。

(40) FrontSurfer 软件是否具有自适应光学模拟仿真功能？

FrontSurfer 软件可对入射光束的波前进行测量、分析，并模拟光束与平行光干涉的图像、以及光束的远场光斑图像。下图所示为使用 FrontSurfer 软件进行波前测量的结果，软件还对光束的平行光干涉和远场光斑进行了仿真，与实际测量结果吻合度较高。



(41) 除了 FrontSurfer，荷兰 OKO 公司还有哪些仿真分析软件？

荷兰 OKO 公司还提供以下软件可用于自适应光学研究：

- Zernike Commander：Zernike 曲面模拟和可视化；
- Still I：湍流环境下的图像稳定、目标跟踪、多帧集成、多帧去卷积处理软件。
- BeamTuner：激光光斑优化软件；
- LightPipes：光束传输仿真工具箱（可在 Matlab，MathCAD 环境下使用）；
- ZemaDLL：Zemax 环境下的动态链接库，可在 Zemax 环境下仿真 MMDM, PDM 等；
- MiZer：控制 OKO 变形镜产生 Zernike 形变。

(42) “FrontSurfer”重建波前的绝对模式和参考模式是什么意思？分别需要多少次测量？

“FrontSurfer”软件根据 Shack-Hartmann 波前传感器重建波前分为两种模式：绝对模式、参考模式。

绝对模式：以 Hartmann 掩模或微透镜阵列的几何参数作为参考，波前传感器事先经过严格校准，以平面为基准面，直接根据获得的微透镜阵列光斑图像计算得到入射光束的绝对波前。实际使用时，只需要单帧图像（单次测量）即可计算出入射光的波前。（注：此模式只能与具有完整六边形或方形子孔径结构的精密 Hartmann 掩模或微透镜阵列一起使用。）

参考模式：将一束光束定义为参考光束，记录其产生的微透镜阵列光斑坐标，并将该坐标设置为波前计算参考坐标；将后续获得的微透镜阵列光斑坐标与参考坐标比较，从而计算

得到该光束与参考光束之间的相对波前变化。因此需要两张图像（两次测量）才能计算出相对波前变化。在这种模式下，Hartmann 掩模或者微透镜阵列既可以是不完整的，也可以是不规则的，甚至可以使用一个随机定位子光孔径的阵列。

(43) 波前传感器的灵敏度如何？

“FrontSurfer”波前传感器的典型配置的噪声受限灵敏度约为*λ/100* PV(适用于*λ = 0.63* μm)。灵敏度可以通过平均多帧提高到大约*λ/500* rms。

(44) 波前传感器的精度是多少？

“FrontSurfer”波前传感器的典型配置在参考模式下精度约为*λ/60* PV *(λ = 0.63* μm)，在绝对测量模式下约为*λ/10* PV。在参考模式下，精度主要受到传感器噪声的限制，可以通过对多帧进行平均和使用更大焦距的微透镜阵列来提高。在绝对测量模式下，精度受到微透镜阵列（或 Hartmann 掩模）制造误差的限制。

说明：以上精度数据是在低阶像差的情况下获得的，此时波前传感器的空间采样误差可以忽略。如果存在高阶像差，则要求微透镜阵列（或 Hartmann 掩模）具有足够的空间采样率（即微透镜有足够的密集度），降低采样误差。

(45) 哪种掩模或微透镜阵列可以与“FrontSurfer”一起使用？

在参考模式中，可以使用在图像传感器区域上具有数百子孔径的任何掩模或微透镜阵列。对于绝对测量模式，需要一个具有完整六角形或方形结构的精确阵列。

(46) 哪种相机可以与“FrontSurfer”一起使用？

“FrontSurfer”可以与任何相机或帧捕捉器对接，但需要一个视频插件。目前版本的“FrontSurfer”包含了许多主流相机的插件，因此可以和许多主流相机一起使用。

“FrontSurfer”用户手册中描述了插件中所需要包含的功能，用户也可以按照这些说明开发自己的插件。

- **自适应光学系统**

(47) 一套典型的“FrontSurfer”闭环自适应光学系统包括哪些部件？

一套典型的“FrontSurfer”自适应光学系统包括：变形镜及其驱动单元、波前传感器、“FrontSurfer”波前测量与闭环控制软件。

(48) 哪种变形镜可以和 “FrontSurfer”软件一起用？

“FrontSurfer”软件可以与 OKO 变形镜驱动器进行通信，例如 40 通道 USB 或以太网驱动模块。有了驱动模块，用户可以控制来自 OKO 公司的任何变形镜，包括多达 79 通道

的 MMDM 和 109 个通道的 PDM、以及其他定制的变形镜。

自定义控制器可以使用外部库插件连接到“FrontSurfer”。“FrontSurfer”手册包含了关于开发用于自定义镜子的插件的说明。

(49) “FrontSurfer”闭环校正速度是多少？

系统的闭环校正频率主要取决于相机最大帧率、波前测量分析的速度、控制器的速度、变形镜的工作频率和光束的强度（影响相机的曝光时间）。根据实际工作结果，OKO 的闭环自适应光学系统已经可以实现每秒 1500 帧的闭环校正频率。

(50) OKO 技术公司的一个完整的自适应光学系统中包含了哪些？

根据需要，OKO 公司可以提供一套完整的闭环自适应光学系统(AOS)。除了变形镜、波前传感器、控制软件等自适应光学组件外，还包括所有必要的光学和机械组件（如面包板、光机械部件、镜片等）。这套系统的数值孔径是 1：10，可用于光学像差的实时校正和特定波前曲面的生成。

(51) 如何提高 AO 操作的稳定性？

1）确保变形镜、倾斜镜（或偏摆镜、快反镜）、波前探测器、像差源之间准确共轭。

2）确保波前探测器中的图像清晰可见，具有良好的信噪比，没有过饱和。

3）确保在软件中正确设置了所有参数，且校准结果良好，检查影响函数的 SVD 值和模式。

(52) OKO 公司还有哪些产品？

OKO 公司除了生产变形镜、波前传感器、波前分析和控制软件以外，还有一系列软件如下，且性价比极高：

- Zernike Commander：Zernike 曲面模拟和可视化软件；
- Still：湍流环境下的图像稳定、目标跟踪、多帧集成、多帧去卷积处理软件；
- BeamTuner：激光光斑优化软件；
- LightPipes：光束传输仿真工具箱（可在 Matlab，MathCAD 环境下使用）；
- ZemaDLL：Zemax 环境下的动态链接库，可在该环境下仿真 MMDM, PDM 等；
- MiZer：控制 OKO 变形镜产生 Zernike 形变。

十一、文献资料

本节列举了本公司代理的 OKO/Dynamic Optics 自适应光学产品在多个科学研究领域的应用以及自适应光学应用的国际最新进展。

1. 使用 OKO 自适应光学器件的论文

(1) 生物医学成像

- Antonello, Jacopo, et al. "Optimization-based wavefront sensorless adaptive optics for multiphoton microscopy." JOSA A 31.6 (2014): 1337-1347.
- Van Werkhoven, T. I. M., et al. "Snapshot coherence-gated direct wavefront sensing for multi-photon microscopy." Optics express 22.8 (2014): 9715-9733.
- Popovic, Zoran, et al. "Dual conjugate adaptive optics prototype for wide field high resolution retinal imaging." Adaptive Optics Progress. InTechOpen, 2012.
- Niu, Saisai, et al. "High-resolution retinal imaging with micro adaptive optics system." Applied optics 50.22 (2011): 4365-4375.
- Bortoletto, Favio, et al. "Multiphoton fluorescence microscopy with GRIN objective aberration correction by low order adaptive optics." PloS one 6.7 (2011): e22321.
- Thaung, Jörgen, et al. "Dual-conjugate adaptive optics for wide-field high-resolution retinal imaging." Optics express 17.6 (2009): 4454-4467.
- Wright, A. J., et al. "Adaptive optics for enhanced signal in CARS microscopy." Optics express 15.26 (2007): 18209-18219.
- Merino, David, et al. "Adaptive optics enhanced simultaneous en-face optical coherence tomography and scanning laser ophthalmoscopy." Optics express 14.8 (2006): 3345-3353.
- Wright, Amanda J., et al. "Dynamic closed-loop system for focus tracking using a spatial light modulator and a deformable membrane mirror." Optics express 14.1 (2006): 222-228.
- Rueckel, Markus, Julia A. Mack-Bucher, and Winfried Denk. "Adaptive wavefront correction in two-photon microscopy using coherence-gated wavefront sensing." Proceedings of the National Academy of Sciences 103.46 (2006): 17137-17142.
- Albert, O., et al. "Smart microscope: an adaptive optics learning system for aberration correction in multiphoton confocal microscopy." Optics letters 25.1 (2000): 52-54.

(2) 光学测量

- Cheung, D. C. L., T. H. Barnes, and T. G. Haskell. "Feedback interferometry with membrane mirror for adaptive optics." Optics communications 218.1-3 (2003): 33-41.
- Czarske, Jürgen W., et al. "Smart laser interferometer with electrically tunable lenses for flow velocity measurements through disturbing interfaces." Photonics. Vol. 2. No. 1. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2015.
- Büttner, Lars, Christoph Leithold, and Jürgen Czarske. "Advancement of an Interferometric Flow Velocity Measurement Technique by Adaptive Optics." International Journal of Optomechatronics 8.1 (2014): 1-13.
- Büttner, Lars, Christoph Leithold, and Jürgen Czarske. "Interferometric velocity measurements through a fluctuating gas-liquid interface employing adaptive optics." Optics express 21.25 (2013): 30653-30663.

(3) 高能激光与激光束整形

- Vdovin, Gleb, and Vadim Kiyko. "Intracavity control of a 200-W continuous-wave Nd: YAG laser by a micromachined deformable mirror." Optics Letters 26.11 (2001): 798-800.
- Zeek, Erik, et al. "Adaptive pulse compression for transform-limited 15-fs high-energy pulse generation." Optics letters 25.8 (2000): 587-589.
- Hofmann, Oskar, et al. "Model-based analysis of highly dynamic laser beam shaping using deformable mirrors." Procedia CIRP 74 (2018): 602-606.
- Maxson, Jared, et al. "Adaptive electron beam shaping using a photoemission gun and spatial light modulator." Physical Review Special Topics-Accelerators and Beams 18.2 (2015): 023401.
- Garduño-Mejía, Jesus, Alan H. Greenaway, and Derryck T. Reid. "Programmable spectral phase control of femtosecond pulses by use of adaptive optics and real-time pulse measurement." JOSA B 21.4 (2004): 833-843.
- Garduño-Mejía, J., A. H. Greenaway, and D. T. Reid. "Designer femtosecond pulses using adaptive optics." Optics Express 11.17 (2003): 2030-2040.
- Armstrong, Michael R., et al. "Versatile 7-fs optical parametric pulse generation and compression by use of adaptive optics." Optics Letters 26.15 (2001): 1152-1154.
- Bartels, Randy, et al. "Shaped-pulse optimization of coherent emission of high-harmonic soft X-rays." Nature 406.6792 (2000): 164-166.
- Zeek, Erik, et al. "Pulse compression by use of deformable mirrors." Optics letters 24.7 (1999): 493-495.
- Druon, Frédéric, et al. "Wave-front correction of femtosecond terawatt lasers by deformable mirrors." Optics letters 23.13 (1998): 1043-1045.

(4) 天文学观测

- Loktev, Mikhail, et al. "Adaptive optics combined with computer post-processing for horizontal turbulent imaging." Real-Time Image and Video Processing 2012. Vol. 8437. International Society for Optics and Photonics, 2012.
- Loktev, Mikhail, et al. "Speckle imaging through turbulent atmosphere based on adaptable pupil segmentation." Optics letters 36.14 (2011): 2656-2658.
- Vdovin, Gleb, et al. "Imaging through turbulence with temporally and spatially multiplexed systems." Optics in Atmospheric Propagation and Adaptive Systems XIV. Vol. 8178. International Society for Optics and Photonics, 2011.
- Loktev, M., et al. "Experiments on speckle imaging using projection methods." Unconventional Imaging, Wavefront Sensing, and Adaptive Coded Aperture Imaging and Non-Imaging Sensor Systems. Vol. 8165. International Society for Optics and Photonics, 2011.
- Keller, Christoph U., Claude Plymate, and S. Mark Ammons. "Low-cost solar adaptive optics in the infrared." Innovative Telescopes and Instrumentation for Solar Astrophysics. Vol. 4853. International Society for Optics and Photonics, 2003.

2. 最新动态

- Zhou G. Unveiling coronal fine structures with adaptive optics: Solar physics[J]. Nature Astronomy, 2025, 9(8): 1105-1106.
- Fan R, Wang Z, Li P, et al. Metasurfaces in adaptive optics: a new opportunity in optical wavefront sensing[J]. Laser & Photonics Reviews, 2025, 19(24): e01566.
- Zhou Y, Li L, Zhang J, et al. Meta‐Device for Field‐of‐View Tunability via Adaptive Optical Spatial Differentiation[J]. Advanced Science, 2025, 12(9): 2412794.
- Hou W, He Y, Shen Y, et al. Deep Learning‐Based Computational Adaptive Optics for Photoacoustic Microscopy[J]. Laser & Photonics Reviews, 2026, 20(4): e01943.
- Tobón-Maya H, Willstatter L, Zapata-Valencia S I, et al. Hadamard based single-pixel microscopy using sensor-less adaptive optics supported by multi-actuator adaptive lens[J]. Nature Communications, 2025, 16(1): 10933.
- Cabillic M, Forriere H, Bettarel L, et al. In-depth single molecule localization microscopy using adaptive optics and single objective light-sheet microscopy[J]. Nature Communications, 2025, 16(1): 8362.
- Rao C, Zhong L, Guo Y, et al. Astronomical adaptive optics: a review[J]. PhotoniX, 2024, 5(1): 16.
- Liu Y, Crowell J A, Kurokawa K, et al. Ultrafast adaptive optics for imaging the living human eye[J]. Nature Communications, 2024, 15(1): 10409.
- Streich, Lina, et al. "High-resolution structural and functional deep brain imaging using adaptive optics three-photon microscopy." Nature methods 18 (2021): 1253‐1258.
- Hao, Xiang, et al. "Three-dimensional adaptive optical nanoscopy for thick specimen imaging at sub-50-nm resolution." Nature methods 18.6 (2021): 688-693.
- Lin, Ruizhe, et al. "Subcellular three-dimensional imaging deep through multicellular thick samples by structured illumination microscopy and adaptive optics." Nature communications 12.1 (2021): 1-14.
- Rodríguez, Cristina, et al. "An adaptive optics module for deep tissue multiphoton imaging in vivo." Nature Methods 18.10 (2021): 1259-1264.
- Lu, Rongwen, et al. "In-vivo sub-diffraction adaptive optics imaging of photoreceptors in the human eye with annular pupil illumination and sub-Airy detection." Optica 8.3 (2021): 333-343.
- Wu, Jiamin, et al. "Iterative tomography with digital adaptive optics permits hour-long intravital observation of 3D subcellular dynamics at millisecond scale." Cell (2021).
- Zhou Zhou,et al.” Adaptive optical microscopy via virtual imaging assisted wavefront sensing for high resolution tissue imaging”, PhotoniX (2022) 3:13 1-20