

[19] 中华人民共和国国家知识产权局



[12] 发明专利申请公布说明书

[21] 申请号 200610173382.3

[51] Int. Cl.

G02B 26/06 (2006.01)

G01J 9/00 (2006.01)

[43] 公开日 2008 年 4 月 30 日

[11] 公开号 CN 101169513A

[22] 申请日 2006.12.29

[21] 申请号 200610173382.3

[71] 申请人 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所

地址 130031 吉林省长春市东南湖大路 16 号

[72] 发明人 宣 丽 曹召良 胡立发 李大禹
穆全全 彭增辉 刘永刚 鲁兴海

[74] 专利代理机构 长春菁华专利商标代理事务所
代理人 南小平

权利要求书 4 页 说明书 8 页 附图 4 页

[54] 发明名称

无偏振光能量损失的液晶自适应光学系统

[57] 摘要

本发明属于自适应光学领域，是一种无偏振光能量损失的液晶自适应光学系统。由于用 PBS 偏振分束器替代了普通偏振片，使液晶自适应光学系统的能量利用效率提高 1 倍。系统为开环自适应光路，可以使用光谱宽度不超过 50nm 的准单色平行光经快速振镜校正波面的倾斜后反射到 PBS 分束器，分成透过 P 和反射 S 偏振光；P 光作为探测光经透镜调节为平行光进入波前探测器；与探测器相联结的计算机将探知的波面倾斜数据反馈给振镜使光束不抖动、波面畸变数据输出给 S 光路的 LCOS 波前校正器；S 光被校正后成为无波面畸变的光，到达 CCD 呈现完美的像。

1、一种无偏振光能量损失的液晶自适应光学系统，其特征是由快速振镜（1）、PBS分束器（2）、第一透镜（3）、第二透镜（4）、波前探测器（5）、第三透镜（6）、第四透镜（7）、LCOS屏（8）、反射镜（9）、第五透镜（10）、第六透镜（11）、CCD相机（12）和计算机（13）构成；第一透镜（3）和第二透镜（4）安装在PBS分束器（2）和波前探测器（5）之间，第三透镜（6）和第四透镜（7）安装在PBS分束器（2）和LCOS屏（8）之间；在第四透镜（7）和第三透镜（6）之间、第四透镜7的反射光路焦点处放置一反射镜（9）；在反射镜（9）和CCD相机（12）之间，依次安装有第五透镜（10）和第六透镜（11）；快速振镜（1）、波前探测器（5）、LCOS屏（8）和CCD相机（12）与计算机（13）连接；外来的波带宽度不超过50nm的准单色平行自然光到达快速振镜（1）上、然后反射到PBS分束器（2）时分成透过光P和反射光S两束偏振光；其中透过光P在通过第一透镜（3）、第二透镜（4）后进入波前探测器（5）中；另一束反射光S，通过第三透镜（6）与第四透镜（7），然后以 $1\sim 2^\circ$ 入射角进入LCOS屏（8），从LCOS屏（8）反射出来的光再次通过第四透镜（7）与入射光束分离聚焦在反射镜（9）上，再通过第五透镜（10）、第六透镜（11）形成汇聚光到达CCD相机（12）成像。

2、根据权利要求1所述的无偏振光能量损失的液晶自适应光学系统，其特征是所使用的透镜均为消色差透镜，由第一透镜（3）与第二透镜（4）各自引入的波前畸变最大峰谷值即波前畸变PV值小于二十分之一波长。

3、根据权利要求2所述的无偏振光能量损失的液晶自适应光学系统，其特征是：

所述的快速振镜（1）为闭环自适应倾斜平面反射镜；

所述的PBS分束器（2）为偏振分光器，透过光S的消光比优于 10^{-3} ；

所述的第二透镜（4）与第一透镜（3）配合，将透过光P的光束缩束为与波前探测器（5）口径相同的平行光，进入波前探测器（5）中；

所述的波前探测器(5)使用 Hartmann 微透镜阵列探测器,探测的均方根误差 rms 值小于百分之一波长,波面 PV 值的探测误差小于二十分之一波长,探测速度由应用的要求来确定;

所述的第四透镜(7)与第三透镜(6)配合实现合适的缩束比,使反射光 S 的光束形成直径与 LCOS 屏(8)口径相等的平行光进入 LCOS 屏(8);第四透镜(7)焦距为 20-30mm,保证有足够的空间放置反射镜(9);

所述的 LCOS 屏(8)为纯位相波前校正器,根据波前探测器(5)获得的信号,通过计算机解出波面数值解,并转换为波面校正器 LCOS 屏(8)上的电压分布值,由计算机驱动 LCOS 屏(8);LCOS 屏(8)的位相调制深度为光源中心波长的 1.1~1.2 倍,刷新速率符合应用要求的速度,像素数符合应用要求的分辨率;其基板法线与入射光 S 夹 1~2° 的角度,使入射光倾斜入射到 LCOS 屏(8)上,并以相同角度反射通过第四透镜(7),使通过第四透镜(7)的入射光束和反射光束分离,反射光束聚焦在反射镜(9)上;

所述的反射镜(9)在第四透镜(7)反射光路的焦点处,引入成像光路;

所述的第五透镜(10)和第六透镜(11)焦距相同,使成像光束到达 CCD 相机(12);

所述的 CCD 相机(12)给出波面校正后的清晰图像,其信噪比要符合具体应用要求。

4、根据权利要求 3 所述的无偏振光能量损失的液晶自适应光学系统,其特征是:

1) 所述的快速振镜(1)的反射镜直径为 20mm,反射率大于 97%,所用材料为不易膨胀的微晶硅玻璃,最大转动范围 2mrad,分辨率 0.1 μ rad,全程重复定位精度为 $\pm 2 \mu$ rad,工作频率:2mrad 转动范围时为 150~200Hz,0.2mrad 转动范围时为 800Hz;

2) 第一透镜(3)、第二透镜(4)、第三透镜(6)、第四透镜(7)、第五透镜(10)和第六透镜(11)的口径依次为 20mm、10mm、30mm、20mm、

20mm 和 20mm，焦距依次为 300mm、60mm、210mm、200mm、200mm 和 200mm；

3) PBS 分束器 (3)，尺寸：长×宽×高为 25mm×25mm×25mm；

4) 波前探测器 (5) 为哈特曼波前探测器；

5) LCOS 屏 (8) 为 256 灰度级驱动的波前校正器；

6) 快速振镜 (1)、波前探测器 (5) 与 LCOS 屏 (8) 所共用的计算机，其硬件的基本配置为：CPU1.8G，内存 256M，硬盘 40G；

7) 反射镜 (9)，表面平整度 PV 值小于二十分之一波长，反射率大于 95%。

5、根据权利要求 4 所述的无偏振光能量损失的液晶自适应光学系统，其特征是在第五透镜 (10) 和第六透镜 (11) 之间安装有单色滤光片 (17)。

6、根据权利要求 4 所述的无偏振光能量损失的液晶自适应光学系统，其特征是入射 S 光与 LCOS 屏 (8) 的基板法线夹角为 1.5°。

7、根据权利要求 1 所述的无偏振光能量损失的液晶自适应光学系统，其特征是在计算机 (13) 内建立拟合波前用的响应矩阵 D；所述的响应矩阵 D 通过下述方法得到：

根据任意波面 $\Phi(x, y)$ 都可以用 Zernike 多项式的线性组表示的原理， $\Phi(x, y)$ 写成为：

$$\Phi(x, y) = \sum_{k=1}^{k=M} a_k z_k(x, y)$$

此处 k 对应 Zernike 项数， a_k 为每一项前面的系数，通常选 $M=36$ ，因为第一项为常数在波面拟合中不起作用，故选择 k 是 2 至 36 的自然数，即采用 35 项 Zernike 多项式；令每一项前面的系数为 1，以波长为单位，分别解出 35 项 Zernike 项的面形位相数值解；利用事先在 LCOS 屏 (8) 上测好的位相—灰度级关系，将 35 项 $Z_k(x, y)$ 的面形位相数值转换成 LCOS 屏 (8) 上的灰度级分布值；将 35 项 Zernike 项的面形灰度级分布通过计算机 (13) 逐项施加在 LCOS 屏 (8) 上，在哈特曼面阵探测器 (5) 上测量出每个子

孔径上像点与标定位置的偏移量，由计算机（13）换算出子孔径光束在 x 轴和 y 轴上的斜率；由这一系列波前斜率组成一个 $2k$ 行 m 列响应矩阵 D

$$D = \begin{pmatrix} S_{x1z1} & S_{x2z1} & \cdots & S_{xmz1} \\ S_{y1z1} & S_{y2z1} & \cdots & S_{ymz1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ S_{x1zk} & S_{x2zk} & \cdots & S_{xmzk} \\ S_{y1zk} & S_{y2zk} & \cdots & S_{ymzk} \end{pmatrix}$$

此处 k 对应 Zernike 项数 $k=2\dots36$ ， m 对应哈特曼面阵探测器上每一行或每一列的子孔径数 $m=1\dots32$ ；得到的响应矩阵 D ，被自动存入计算机（13）。

8、根据权利要求 7 所述的无偏振光能量损失的液晶自适应光学系统，其特征是计算机（13）通过下述过程控制快速振镜（1）消除波面的整体倾斜和 LCOS 屏（8）校正畸变波面：

波面探测器（5）探测到任意波面的 2 行 m 列波前斜率矩阵 s ，都有 $s=Da$ ， a 是 Zernike 多项式每一项前面的系数 a_k 构成的向量，由这个等式计算机（13）解出 a_k ，即得到所探测波面的 Zernike 方程；Zernike 方程中的第一项与第二项分别为整个波面在 x 轴和 y 轴上的倾斜量，计算机（13）算出其数值并反馈给自适应系统快速振镜（1）以消除波面的整体倾斜；其余项为波面的较高次畸变也由计算机（13）算出位相数值解，并根据波面校正器 LCOS 屏（8）的位相与灰度级的关系将位相数值解转换为灰度级分布反馈给自适应系统 LCOS 屏（8），使畸变波面得到校正。

无偏振光能量损失的液晶自适应光学系统

技术领域

本发明属于自适应光学领域，涉及液晶波前校正器、波前探测器和 PBS 分束器等光学元件的组合，具体地说是一种无偏振光能量损失的液晶自适应光学系统。

背景技术

随着天文成像、光通讯及遥感探测等的迅速发展，大气湍流对光传输的干扰越来越引起人们的重视，因此，有必要研制光波前自适应校正系统。光波前自适应校正系统的功能是对入射光的畸变波面进行实时补偿校正，得到理想的光学传输。

目前使用的自适应光学系统中的关键器件是一种可以补偿波面畸变的可变形反射镜，它利用一系列压电驱动器控制镜面变形。驱动器的驱动电压高达 400V 左右；上百个驱动器的挑选与检验非常费时，使变形镜的研制周期往往需要数年时间。液晶器件采用微电子制备技术，高象素密度是其特点。液晶的象素数只要达到变形镜驱动器数目的 64 倍就可获得同样校正精度，且百万象素的液晶校正器制备工艺是目前已经成熟的工艺，因此基于液晶校正器的自适应系统具有更大的应用潜力。

1990 年 7 月公开了 Jan Grinberg 等人 1989 年 5 月 11 日申请的美国专利 US4943709 “Liquid crystal adaptive optics system”，他们主要提出液晶分子排列方向平行的透射屏叠加在液晶分子排列方向与之转过 90 度的反射屏上，以此来校正非偏振光，这种方法不能有效地校正偏振矢量在 45 度和 135 度附近的光。2000 年 8 月又公开了 Gordon D. Love 等人 1998 年 6 月 5 日申请的美国专利 US6107617 “Liquid crystal active optics correction for large space based optical systems”，他们把两层分子排列方向互相垂直的液晶层做在 1 个器件中，对非偏振光的校正效果与上相同。1999 年有人提出了在反射式液晶屏的后基板上附上 1/4 波长板，可使与 1/4 波长板限定的单

波长光在入射液晶层后、在 $1/4$ 波长板上入射、反射出来，所有偏振矢量都旋转 90 度，然后再经反射路程通过液晶层，这样所有方向的偏振光在入、反两个过程中获得一致相同的校正量。这种能使液晶波前校正器应用于非偏振光系统的思想，虽然还只能使液晶工作于单色光中，但从原理上解决了液晶系统必须偏振的苛刻要求。2002 年美国应用技术协会与空军实验室采用双频液晶材料做成 91 象元的液晶自适应系统，工作频率达到 40Hz ，校正量 1.8 微米，在 $700-950\text{nm}$ 近红外波段、望远镜 1.12 米的通光口径上对 400 公里轨道上的国际空间站进行了自适应观测，获得了国际空间站太阳能帆板图像。但他们没有报道液晶自适应系统中偏振光的处理方法，也没有报道是否使用偏振片或其它偏振元件。

自然界中的发光体发出的光大多是自然光，自然光通过偏振片能成为偏振光，但使入射光能量降低 50% ，这使必须工作在偏振光条件下的液晶自适应系统在弱目标观测领域无法应用。因此，须将这 50% 的光能量转换成可利用的能量。

通常自适应系统均为闭环系统，闭环与开环的不同是在光路上光束先通过校正器然后再通过探测器，即先校正波面然后再探测波面，探得的波面残差反馈给校正器，校正器在上一回校正的基础上进行修正，这样当闭环频率大于外界大气湍流干扰频率时，校正器在第二周期所校正的位相量就要比第一周期中校正的位相量小得多，经过一段时间校正器的校正量就会保持在一个较小的平衡量上。开环自适应是先探测波面后校正，因此每一周期都是重新开始，校正器所变动的位相量较大，驱动电压也高，这需要校正器的驱动稳定性要很高才行。因为液晶校正器是利用分子在电场中的旋转运动进行位相补偿，它的驱动稳定性极好，不需要校正后的平衡时间，且位相校正量越大、驱动电压越高、液晶的响应速度越快；而常规变形镜自适应系统依靠反射镜面的曲率变形、一种机械运动进行位相补偿，所以在平衡点会产生机械运动的阻尼振荡，它与液晶正相反，驱动电压越高、平衡点的振荡越强、平衡越慢。所以闭环自适应很适合变形镜这类校正器，校正量逐渐减小会使变形镜校正器很快到达驱动平衡点，而开环系

统符合液晶校正器的电场响应特点，可以响应速度快、又不失稳定性。

发明内容

本发明将液晶波前校正器、波前探测器和 PBS 分束器等光学元件进行有机组合，目的是提供一种无偏振光能量损失的、对光源单色性要求宽松的液晶自适应光学系统，其中 PBS 分束器是能将自然光中的 P 偏振分量和 S 偏振分量分开的分束器。

本发明的设计思想是采用 PBS 分束器替代普通的偏振片；PBS 分束器将入射物光分成 P 偏振和 S 偏振的两束光，P 光束完全用于波前探测，S 光束完全用于校正成像，使能量全部得到利用；而普通的偏振片靠吸收掉一个方向的偏振分量来产生偏振光，出射的偏振光有一半要用于波前探测，另一半用于校正成像，造成 50% 的光能量损失。

本发明的光学系统由快速振镜 1、PBS 分束器 2、第一透镜 3、第二透镜 4、波前探测器 5、第三透镜 6、第四透镜 7、硅基板上的液晶（LCOS）屏 8、反射镜 9、第五透镜 10、第六透镜 11、CCD 相机 12 构成。第一透镜 3 与第二透镜 4 安装在 PBS 分束器 2 和波前探测器 5 之间，第三透镜 6 与第四透镜 7 安装在 PBS 分束器 2 和 LCOS 屏 8 之间。在第三透镜 6 和第四透镜 7 之间、第四透镜 7 的反射光路焦点处放置反射镜 9。在反射镜 9 和 CCD 相机 12 之间，依次安装有第五透镜 10 和第六透镜 11。

本发明的光路如图 1 所示：外来的波带宽度不超过 50nm 的准单色平行自然光，首先到达快速振镜 1 上、然后反射到 PBS 分束器 2 时分成 P 和 S 两束光，其中透过光为 P 光，进入第一透镜 3、第二透镜 4 成为口径与波前探测器 5 匹配的平行光，然后进入波前探测器 5 中；另一束在 PBS 分束器 2 上反射的光为 S 光，具有很好的偏振性，进入第三透镜 6 与第四透镜 7 变成口径与 LCOS 屏 8 匹配的平行光，然后以 $1\sim 2^\circ$ 入射角进入 LCOS 屏 8，从 LCOS 屏 8 反射回来的光再通过第四透镜 7 与入射光束分离聚焦在反射镜 9 上，再通过第五透镜 10、第六透镜 11 形成汇聚光到达 CCD 相机 12 成像。

本发明中所涉及到的快速振镜 1、波前探测器 5、LCOS 屏 8、CCD 相机

12 均与一计算机相联结，计算机的作用是：首先对波前探测器 5 获得的微透镜光点列阵进行拟合，给出波面函数和数值解，并将波面整体倾斜数据与较高次畸变数据分离，将波面整体倾斜数据反馈给快速振镜 1 以消除光束的抖动；较高次畸变数据反馈给 LCOS 屏 8，使畸变波面得到校正。此时 CCD 相机 12 所摄的像为校正后的无畸变像，计算机给出所拍摄像的显示。

为了更清楚理解本发明，下面对各个部件作进一步详细说明。

所述的快速振镜 1 为闭环自适应倾斜平面反射镜，与一计算机相联结，在计算机的驱动下校正波面的倾斜度，使进入波前探测器 5 和 LCOS 屏 8 的光束不抖动。

所述的 PBS 分束器 2 为偏振光分束器，反射的 S 光消光比小于 1×10^{-3} 。

所述的第一透镜 3 与第二透镜 4 配合，将透过的 P 光光束缩束为与波前探测器 5 口径相同的平行光。第一透镜 3 与第二透镜 4 引入的波前畸变不会进入校正器中，但被波前探测器 5 探测到，将造成校正器误校，所以限制其畸变的最大峰谷即畸变的 PV 值小于二十分之一波长。

所述的波前探测器 5 一般使用 Hartmann 微透镜阵列探测器，用来探测波前畸变，探测的均方根误差 rms 值应小于百分之一波长，波面 PV 值的探测误差小于二十分之一波长，探测速度由应用的要求来确定；波前探测器 5 也与快速振镜 1 连接的计算机相联结，测得的信号在计算机中解析为波面数据，其中波面倾斜数据反馈给快速振镜 1，波面较高次的畸变数据反馈给 LCOS 屏 8。

所述的第三透镜 6 与第四透镜 7 配合实现合适的缩束比，使反射光 S 光束形成直径与 LCOS 屏 8 口径相等的平行光进入 LCOS 屏 8；第四透镜 7 焦距为 20~30mm，保证有足够的空间放置反射镜 9，以引入成像光路。

所述的 LCOS 屏 8 为纯位相波前校正器，与波前探测器 5 所连接的计算机相连；计算机根据波前探测器 5 获得的信号解出波面数值解，扣除倾斜后将波面畸变转换为波面校正器 LCOS 屏 8 上的电压分布值，由计算机驱动 LCOS 屏 8，校正波面的畸变。LCOS 屏 8 的位相调制深度是光源中

心波长的 1.1~1.2 倍，刷新速率符合应用要求的速度，像素数符合应用要求的分辨率。

所述的反射镜 9 位于第四透镜 7 的反射光路焦点处，引入成像光路。

所述的第五透镜 10、第六透镜 11 焦距相同，使成像光束到达 CCD 相机 12。

所述的 CCD 相机 12 的信噪比要符合具体应用要求，CCD 相机 12 也与计算机相连，在计算机的显示屏上给出波面校正后的清晰图像。

本发明由于使用 PBS 分束器替代了普通偏振片使液晶自适应光学系统能量利用效率提高 1 倍。

附图说明

图 1 是本发明的光路示意图。图中 1 为快速振镜，2 为 PBS 分束器，3 第一透镜，4 第二透镜，5 波前探测器，6 第三透镜，7 第四透镜，8 为 LCOS 屏，9 反射镜，10 第五透镜，11 第六透镜，12 为 CCD 相机。

图 2 是本发明具体实施方式的结构图。图中 13 为计算机，14 为点光源，15 为第七透镜，16 为热扰源，17 为单色滤光片。

图 3 是本发明测量拟合波前用的响应矩阵 D 的结构图。

图 4 是校正前和校正后的光源灯丝像，(a)为校正前的光源灯丝像，(b)为校正后的光源灯丝像。

具体实施方式

按图 2 所示备齐各部件。

1) 快速振镜 1 是德国普爱纳米位移技术有限公司的产品，为闭环自适应驱动式快速振镜，其中反射镜直径为 20mm，反射率大于 97%，所用材料为不易膨胀的微晶硅玻璃，表面平整度 PV 值小于 $\lambda/20$ ，其中 $\lambda=633\text{nm}$ ，最大转动范围 2mrad，分辨率 0.1 μrad ，全程重复定位精度是 $\pm 2\ \mu\text{rad}$ ，工作频率：2mrad 转动范围时为 150~200Hz，0.2mrad 转动范围时为 800Hz。

2) PBS 分束器 2，尺寸：长×宽×高为 25mm×25mm×25mm，其中透过光 S 的消光比小于 1×10^{-3} 。

3) 第一透镜 3、第二透镜 4、第三透镜 6、第四透镜 7、第五透镜 10

和第六透镜 11 的口径依次为 20mm、10mm、30mm、20mm、20mm 和 20mm，焦距依次为 300mm、60mm、210mm、200mm、200mm 和 200mm，因为允许成像光束有 50nm 的光谱宽度，故这些透镜均为消色差透镜，且第一透镜 3、第二透镜 4 各自引入的波前畸变 PV 值小于 $\lambda/20$ 。

4) 波前探测器 5 是法国 Imagine Optics 公司的产品，为哈特曼波前探测器，其微透镜阵列为 32×32，探测的均方根误差 rms 值小于 $\lambda/100$ ，波面 PV 值的探测误差小于 $\lambda/20$ ，工作频率 60Hz。

5) 波前校正器 LCOS 屏 8，是纯位相波前校正器，象素尺寸 19 μm ×19 μm ，象素数 1024×768，256 灰度级，此处灰度级对应驱动电压的分度值，调制深度为 1.1 λ ，表面平整度或自我修正后的平整度 PV 值小于 $\lambda/15$ 。

6) 反射镜 9，表面平整度 PV 值小于 $\lambda/20$ ，反射率大于 95%。

7) CCD 相机 12，象素数 640×480，象素尺寸 9 μm ×9 μm ，最大帧频 100Hz。

8) 计算机 13 的硬件基本配置为：CPU1.8G，内存 256M，硬盘 40G。波前探测器 5、快速振镜 1 和 LCOS 屏 8、CCD 相机 12 均与计算机 13 相连。

9) 用手电筒灯泡、其灯丝长约 1mm，作为点光源 14；在点光源 14 前面放置第七透镜 15，为消色散透镜，其口径 20mm、焦距 200mm，形成平行光源；再在 CCD 相机 12 前面、第五透镜 10 和第六透镜 11 之间插入中心波长为 633nm 的单色滤光片 17，允许其透过光的光谱全宽度小于 50nm。这样做的效果相当于使用了一个准单色平行光源。

10) 25W 烙铁作为热扰源 16。

11) 首先建立拟合波前用的响应矩阵 **D**：按照图 3 搭建光学系统。开启点光源 14，开启计算机 13；根据任意波面 $\Phi(x, y)$ 都可以用 Zernike 多项式的线性组表示的原理， $\Phi(x, y)$ 写成为：

$$\Phi(x, y) = \sum_{k=1}^{k=M} a_k z_k(x, y)$$

此处 k 对应 Zernike 项数, a_k 为每一项前面的系数, 通常选 $M=36$, 因为第一项为常数在波面拟合中不起作用, 故选择 k 是 2 至 36 的自然数, 即采用 35 项 Zernike 多项式; 令每一项前面的系数为 1, 以波长为单位, 分别解出 35 项 Zernike 项的面形位相数值解; 利用事先在 LCOS 屏 8 上测好的位相—灰度级关系, 将 35 项 $Z_k(x,y)$ 的面形位相数值转换成 LCOS 屏 8 上的灰度级分布值; 将 35 项 Zernike 项的面形灰度级分布通过计算机 13 逐项施加在 LCOS 屏 8 上, 在哈特曼面阵探测器 5 上测量出每个子孔径上像点与标定位置的偏移量, 由计算机 13 换算出子孔径光束在 x 轴和 y 轴上的斜率; 由这一系列波前斜率组成一个 $2k$ 行 m 列响应矩阵 D

$$D = \begin{pmatrix} S_{x1z1} & S_{x2z1} & \cdots & S_{xmz1} \\ S_{y1z1} & S_{y2z1} & \cdots & S_{ymz1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ S_{x1zk} & S_{x2zk} & \cdots & S_{xmzk} \\ S_{y1zk} & S_{y2zk} & \cdots & S_{ymzk} \end{pmatrix}$$

此处 k 对应 Zernike 项数是 2 至 36 的自然数, m 对应哈特曼面阵探测器上每一行或每一列的子孔径数 m 是 1 至 32 的自然数。到此得到了响应矩阵 D , 并被自动存入计算机 13; 后面对于自适应系统哈特曼探测器探测到的任意波面的 2 行 m 列波前斜率矩阵 s , 都有 $s=Da$, a 是 Zernike 多项式每一项前面的系数 a_k 构成的向量, 由这个等式计算机 13 可以解出 a_k , 即可得到所探测波面的 Zernike 方程; Zernike 方程中的第一项与第二项分别为整个波面在 x 轴和 y 轴上的倾斜量, 计算机 13 算出其数值并反馈给自适应系统快速振镜 1 以消除波面的整体倾斜; 其余项为波面的较高次畸变也由计算机 13 算出位相数值解, 并根据波面校正器 LCOS 屏 8 的位相与灰度级的关系将位相数值解转换为灰度级分布反馈给自适应系统 LCOS 屏 8, 就可使畸变波面得到校正。

13) 按照图 2 搭建液晶开环自适应光学系统, 手电筒灯泡的灯丝作为被观察物。在点光源 14 前面加入第七透镜 15 形成准平行光, 模拟无穷远处的点光源; 在第七透镜 15 和自适应驱动式快速振镜 1 之间、光束之下放置 25W 烙铁作为热扰源 16; 在第五透镜 10 和第六透镜 11 之间插入 633nm 的单色滤光片 17, 以滤除波长范围以外的光。

14) 在搭建好的系统上开启热扰源 16, 使入射平行光受到大气湍流干扰, 自适应系统开始工作: a) 畸变波前首先到达快速振镜 1 上、然后反射到 PBS 分束器 2 时分成 P 光和 S 光; b) P 光经过第一、第二透镜 3、4 准直和口径匹配后进入波前探测器 5, 波前探测器 5 给出 2 行 m 列波前斜率矩阵 s ; c) 计算机 13 根据 $s = Da$, 解出 Zernike 多项式每一项前面的系数 a_k , 然后由 Zernike 方程解出波面数值解, 并将其转换为波面校正器 LCOS 屏 8 上的灰度级分布值; d) 驱动 LCOS 屏 8 校正波面的畸变; e) PBS 分束器 2 分出的 S 光经过第三、第四透镜 6、7 准直和口径匹配后入射到 LCOS 屏 8 上, 且入射 S 光与 LCOS 屏 8 的基板法线夹 1.5° 的角度, 从 LCOS 屏 8 反射的 S 光是校正后没有畸变的平行光; f) 从 LCOS 屏 8 反射的 S 光再通过第四透镜 7 与入射光束分离, 聚焦在反射镜 9 上, 然后通过第五透镜 10、单色滤光片 17、第六透镜 11 形成灯丝像到达 CCD 相机 12; g) 计算机 13 显示出 CCD 相机 12 所拍摄的像。到此完成一个工作周期, 之后周而复始重复 a) 到 g) 步骤。

在热扰中, 自适应校正前拍摄的光源灯丝像如图 4 (a), 进行自适应校正后拍摄的光源灯丝像如图 4 (b), 表明了本发明的效果。

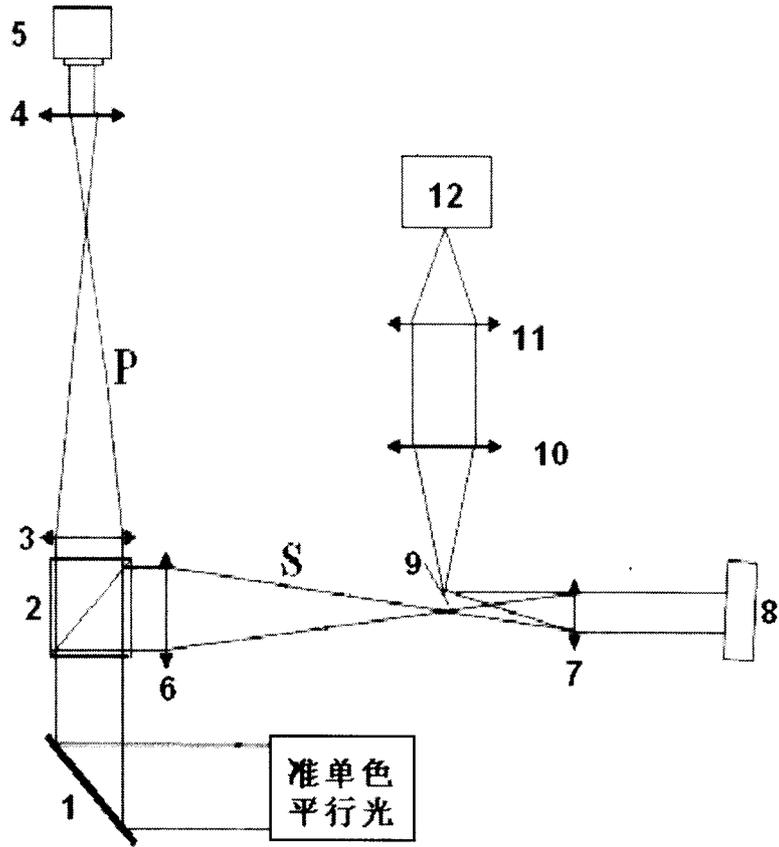


图 1

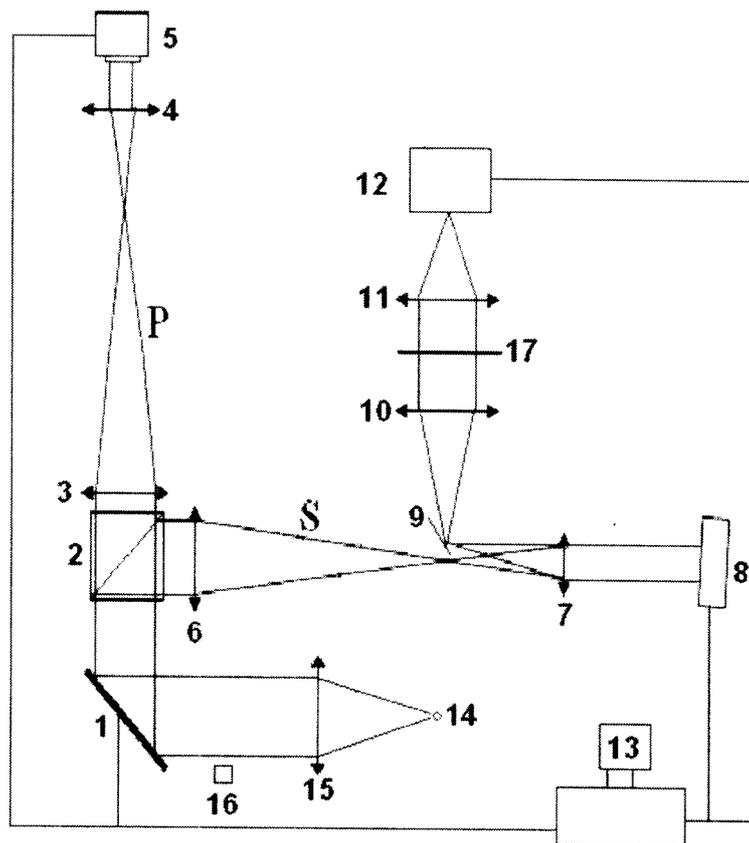


图 2

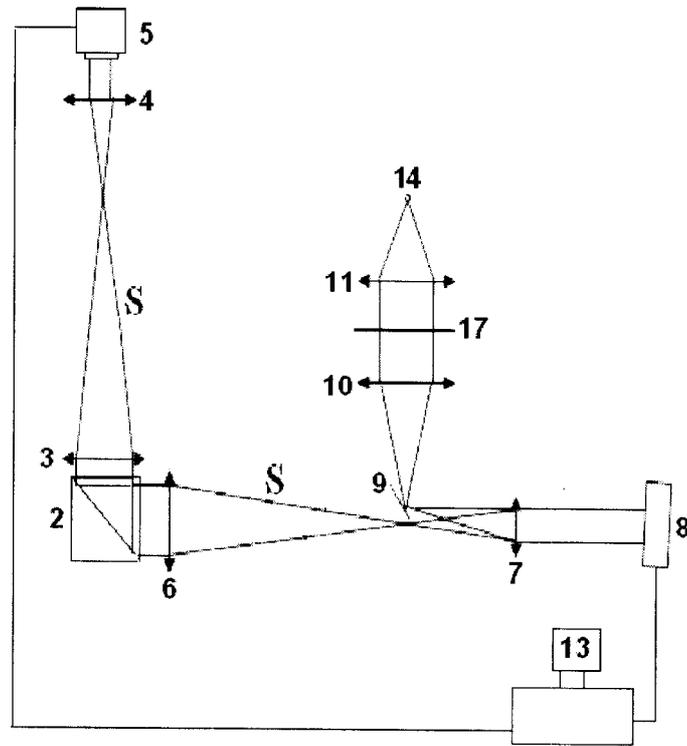
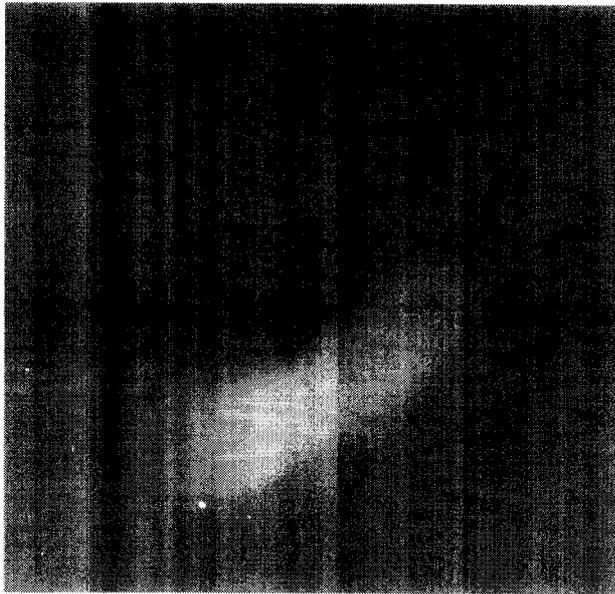
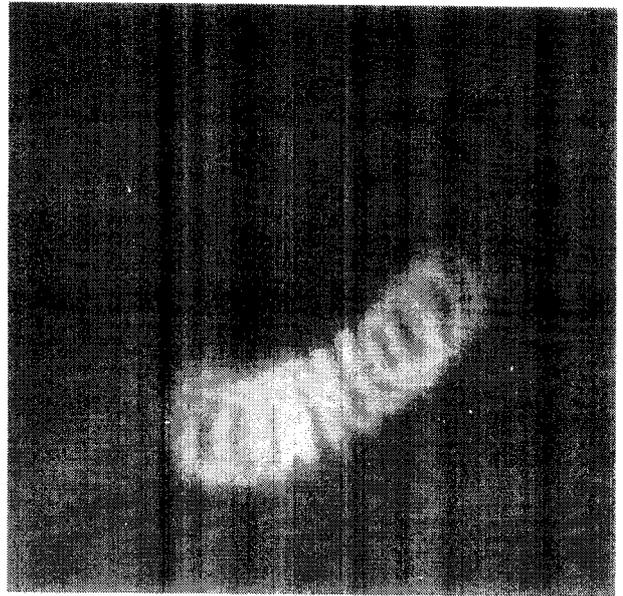


图 3



(a)



(b)

图 4