

[19] 中华人民共和国国家知识产权局

[51] Int. Cl.

G02B 26/06 (2006.01)

G01J 9/00 (2006.01)



[12] 发明专利申请公布说明书

[21] 申请号 200610173385.7

[43] 公开日 2008 年 7 月 2 日

[11] 公开号 CN 101211008A

[22] 申请日 2006.12.29

[74] 专利代理机构 长春科宇专利代理有限责任公司

代理人 李恩庆

[21] 申请号 200610173385.7

[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 穆全全 胡立发 曹召良
李大禹 彭增辉 刘永刚 鲁兴海

权利要求书 5 页 说明书 9 页 附图 5 页

[54] 发明名称

白光液晶自适应光学系统

[57] 摘要

本发明属于自适应光学领域，是一种能量损失
很低的、覆盖白光波段的液晶自适应光学系统。采
用开环自适应光路，用 PBS 分束镜替代普通的偏振
片，PBS 分束镜将入射物光分成 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；S 光束在被校正之前，用分色片分为 3 ~
4 个子波段，然后对应放置 3 ~ 4 个液晶校正器并行
进行波前校正；校正后的 3 ~ 4 个子光束再重新合为
一束成像。本发明由于使用 PBS 分束镜替代了普通
偏振片使液晶自适应光学系统能量利用效率提高
1 倍；由于采用多个纯位相液晶波前校正器，使成
像光束的光谱可覆盖白光波段，成为高效利用光能
的液晶自适应光学系统。

1、一种白光液晶自适应光学系统，其特征是由快速振镜（1）、PBS 分束镜（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）、分色片、LCOS 屏、反射镜（10）、第五透镜（11）、第六透镜（12）、CCD 相机（13）和计算机（14）构成；第一透镜（3）与第二透镜（4）安装在 PBS 分束镜（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 分束镜（2）和分色片之间，分色片位于第四透镜（7）和 LCOS 屏之间，在第三透镜（6）和第四透镜（7）之间、位于第四透镜（7）的反射光焦点处放置反射镜（10），在反射镜（10）和 CCD 相机（13）之间，依次安装有第五透镜（11）和第六透镜（12）；快速振镜（1）、波前探测器（5）、LCOS 屏、CCD 相机（13）均与计算机（14）相连；光谱范围 450~880nm 的平行光首先到达快速振镜（1）上、然后反射到 PBS 分束镜（2）时分成 P 和 S 两束光，其中透过的 P 光通过第一透镜（3）、第二透镜（4）后，进入波前探测器（5）中；另一束在 PBS 上反射的 S 光，进入第三透镜（6）与第四透镜（7）后通过分色片分为子波段，以 1~2°入射角分别进入 LCOS 屏，被 LCOS 屏反射的光经分色片合成一束光后，通过第四透镜（7）与入射光束分离聚焦在反射镜（10）上，再通过第五透镜（11）、第六透镜（12）到达 CCD 相机（13）成像。

2、根据权利要求 1 所述的白光液晶自适应光学系统，其特征是通过 4~5 个分色片分为 3~4 个子波段后，分别进入 3~4 个 LCOS 屏。

3、根据权利要求 2 所述的白光液晶自适应光学系统，其特征是第一分色片（8a）、第二分色片（8b）、第三分色片（8c）、第四分色片（8d）和第五分色片（8e）将入射光在 450~880nm 光谱范围内分成四个子波段后，分别进入第一 LCOS 屏（9a）、第二 LCOS 屏（9b）、第三 LCOS 屏（9c）、第四 LCOS 屏（9d）。

4、根据权利要求 2 所述的白光液晶自适应光学系统，其特征是第一分色片（8a）、第二分色片（8b）、第三分色片（8c）和第四分色片（8d）将入射光在 500~880nm 光谱范围内分成三个子波段后，分别进入第一 LCOS

屏（9a）、第二 LCOS 屏（9b）和第三 LCOS 屏（9c）。

5、根据权利要求 4 所述的白光液晶自适应光学系统，其特征是第一 LCOS 屏（9a）、第二 LCOS 屏（9b）和第三 LCOS 屏（9c）的几何尺寸均相等。

6、根据权利要求 5 所述的白光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 分束镜（2）为偏振分光镜，透过光 S 光的消光比小于 1×10^{-3} ；

所述的第一透镜（3）与第二透镜 4 配合，将透过光 P 的光束缩束为与波前探测器 5 口径相同的平行光，最大峰谷值即畸变的 PV 值小于 25nm；

所述的波前探测器（5）为 Hartmann 微透镜阵列探测器，探测的均方根误差 rms 值应小于 5nm，波面的 PV 值的探测误差小于 25nm，探测频率不低于 500Hz；

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 光束形成直径与四个 LCOS 屏口径相等的平行光；第四透镜（7）焦距为 20~30mm，引入成像光路；

所述的第一 LCOS 屏（9a）、第二 LCOS 屏（9b）、第三 LCOS 屏（9c），为三个子波段的纯位相液晶波前校正器，中心校正波长分别为 532nm、635nm 和 785nm，位相调制深度分别是各自校正中心波长的 1.20~1.25 倍，LCOS 屏中液晶对驱动电压的响应时间 $t_{on} < 5\text{ms}$ ，去除电压时液晶恢复初始态的时间 $t_{off} < 20\text{ms}$ ，像素数符合应用要求的分辨率；

所述的反射镜（10）位于第四透镜（7）的反射光路焦点处，引入成像光路；

所述的第四透镜（11）和第五透镜（12）焦距相同，使成像光束到达 CCD 相机（13）；

所述的 CCD 相机（13）为高灵敏度、低噪声电子倍增型 EMCCD 相机，其信噪比要符合具体应用要求，曝光时间不超过 2ms；

所述的计算机（14）配置 DSP 集成模块，使数据处理占用的时间不超

过 2ms。

7、根据权利要求 6 所述的白光液晶自适应光学系统，其特征是：

闭环自适应倾斜平面反射镜的反射率大于 97%，所用材料为不易膨胀的微晶硅玻璃，表面平整度的 PV 值小于 25nm，最大转动范围 2mrad，分辨率 0.1μrad，全程重复定位精度是±2 μrad，工作频率：2mrad 转动范围时为 150~200Hz，0.2mrad 转动范围时为 800Hz；

偏振分光镜的尺寸：长×宽×高为 25mm×25mm×25mm；

第一透镜（3）、第二透镜（4）、第三透镜（6）、第四透镜（7）、第五透镜（11）和第六透镜（12）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，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 25nm；

哈特曼波前探测器（5）的量子效率峰值在 500nm 到 600nm 波长处，高达 90%；

四个分色片将入射光光谱分成 500nm~580nm~690nm~880nm 三个子波段，其中第一分色片（8a）对波长大于 500nm 的光全反射、对波长小于 500nm 的光全透射；第二分色片（8b）对波长小于 580nm 的光全反射、对波长大于 580nm 的光全透射；第三分色片（8c）对波长小于 690nm 的光全反射、对波长大于 690nm 的光全透射；第四分色片（8d）对波长小于 880nm 的光全反射、对波长大于 880nm 的光全透射；

第一 LCOS 屏（9a）、第二 LCOS 屏（9b）、第三 LCOS 屏（9c）的波长校正范围分别为 500nm~580nm、580nm~690nm、690nm~880nm，在电场中的上升响应时间≤5ms，下降时间≤7ms，位相调制深度为 865nm；

反射镜（10）表面平整度的 PV 值小于 25nm，反射率大于 95%；

CCD 相机（13）的像素数 512×512，量子效率在 500—650nm 波段达

到峰值，高达 90%，读出噪声在读出速率 10MHz 时为 1—62 个电子；

计算机（14）的基本配置：CPU1.8G，内存 256M，硬盘 40G，法国产 VP3 型 DSP 板卡，含有 8 块 TMS320C64 的 DSP 芯片。

8、根据权利要求 7 所述的白光液晶自适应光学系统，其特征是在计算机（14）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 $k=2, 3, 4, \dots, 36$ ，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 屏上的灰度级分布值；将 35 项 Zernike 项的面形灰度级分布值通过计算机（14）逐项施加在 LCOS 屏上，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（14）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 $k=2、3、4、\dots、36$, m 对应哈特曼面阵探测器

(5) 上每一行或每一列的子孔径数 $m=1、2、\dots、14$, $D=D_a、D_b、D_c$;
得到的响应矩阵 $D_a、D_b、D_c$ 被自动存入计算机 (14)。

9、根据权利要求 8 所述的白光液晶自适应光学系统，其特征是计算机 (14) 通过下述过程控制快速振镜 (1) 消除波面的整体倾斜和 LCOS 屏校正畸变波面：

哈特曼探测器 (5) 探测到的任意波面的 2 行 m 列波前斜率矩阵 s , 都有 $s = Da$, 其中 D 分别为 $D_a、D_b、D_c$, 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 (14) 可以分别解出三个 a_k , 即可得到所探测波面在三个波段上的 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 (14) 将三个 Zernike 方程中的第一项与第二项分别平均, 算出整个波面在 x 轴和 y 轴上的倾斜量平均值反馈给快速振镜 (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 (14) 算出位相数值解, 并根据波面校正器第一 LCOS 屏 (9a)、第二 LCOS 屏 (9b)、第三 LCOS 屏 (9c) 的位相与灰度级的关系分别将三个波面的位相数值解转换为相应灰度级分布反馈给第一 LCOS 屏 (9a)、第二 LCOS 屏 (9b) 、第三 LCOS 屏 (9c), 就可使三个子波段的畸变波面得到校正。

白光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、PBS 分束镜和分色片等光学元件的组合，具体地说是一种能量损失很低的、覆盖白光波段的液晶自适应光学系统。

背景技术

地基望远镜对空间飞行目标的观测，必须透过地面以上 10~20 公里的大气层进行，大气湍流几乎无时不干扰成像光束的传播。光学口径越大，大气湍流中波面的畸变量越大，因此单纯依赖望远镜口径增大来提高分辨率的努力已达到极限，必须结合自适应光学校正系统，这已成为人们的共识。

对于空间目标来说，绝大多数都是靠反射太阳光来展现自己的几何形态，而太阳辐射最强的波段是白光，占辐射总能量的 50%，采用白光成像是远目标观测的最佳选择，但对自适应光学系统提出更高要求，主要是白光波长短，系统的相对分辨率要提高。

目前使用的自适应光学系统中的关键器件是可变形反射镜，它利用一系列压电驱动器控制镜面变形来校正波面的畸变。驱动器的驱动电压高达百伏；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，尤其在白光领域，驱动器的数目比相应红外观测要多得多，成本极高。经计算，近地轨道目标进行线分辨率为 33cm 的白光观察，要克服中等强度湍流、即相干长度 $r_0 \approx 13\text{cm}$ 的干扰，变形镜的驱动器须达到 900 个；而进行同步轨道相同线分辨率的白光观察，就需要光学接收口径 D 为 72 米，在这样大的口径上克服中等强度湍流的干扰，就要使变形镜的驱动器达到 306700 个。据报道国际上已作出 900 驱动器的变形镜，但要做出 30 万个驱动器的变形镜恐怕极其困难。如果在变形镜应用极限以外的领域，将液晶校正器替代变形镜组成新的自适应系统，问题会迎刃而解。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 6.2 倍就可获得同样校正精度。那么相对变形镜的 30.67 万个驱动器，液晶校正器的象素数应接近 200 万个。200 万象素的液晶校正器制备工艺是目前已经成熟的工艺，易于批量生产。因此基于液晶校正器的自适应系统具有更大的应用潜力。

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 700~950nm 近红外波段、望远镜 1.12 米的通光口径上对 800 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 (Optics Express, Vol. 10, No. 25, (2002) 1508~1519)。这一结果说明液晶在 700~950nm 近红外波段色散较弱，可以进行宽光谱的波面校正。但在白光 450nm~800nm 波段，液晶的色散较强，并且表现为波长越短色散越强，所以通常只能在一个较窄的光谱范围内进行中心波长校正，因此至今未发现有白光波段的液晶自适应光学系统的文献报道和公开。

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、PBS 分束镜和分色片等光学元件进行有机组合，目的是提供一种即无偏振光能量损失的、又可覆盖白光波段的液晶自适应光学系统，其中 PBS 分束镜是能将自然光中的 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开环自适应光路；用 PBS 分束镜替代普通的偏振片，PBS 分束镜将入射物光分成 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；S 光束在被校正之前，用分色片分为 3~4 个子波段，然后对应放置 3~4 个液晶校正器并行进行波前校正；校正后的 3~4 个子光束再重新合为一束成像。

本发明由快速振镜 1、PBS 分束镜 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、第一分色片 8a、第二分色片 8b、第三分色片 8c、第四分色片 8d、第五分色片 8e、第一硅基板上的液晶（LCOS）屏 9a、第二 LCOS 屏 9b、第三 LCOS 屏 9c、第四 LCOS 屏 9d、反射镜 10、第五透镜 11、第六透镜 12、CCD 相机 13 和计算机 14 构成。第一透镜 3 与第二透镜 4 安装在 PBS 分束镜 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 分束镜 2 和第一分色片 8a 之间。在第三透镜 6 和第四透镜 7 之间、第四透镜 7 的反射光焦点处放置反射镜 10。在反射镜 10 和 CCD 相机 13 之间，依次安装有第五透镜 11 和第六透镜 12。第一 LCOS 屏 9a、第二 LCOS 屏 9b、第三 LCOS 屏 9c、第四 LCOS 屏 9d，分别对应第二分色片 8b、第三分色片 8c、第四分色片 8d、第五分色片 8e。四个 LCOS 屏的几何尺寸均相等。另外四个 LCOS 屏、波前探测器 5、CCD 相机 13 均与计算机 14 相连。

本发明的结构如图 1 所示，光谱范围 450~880nm 的平行光首先到达快速振镜 1 上、然后反射到 PBS 分束镜 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 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 入射到第一分色片 8a；通过第二分色片 8b、第三分色片 8c、第四分色片 8d 和第五分色片 8e，以 $1\sim2^\circ$ 入射角分别进入第一 LCOS 屏 9a、第二 LCOS 屏 9b、第三 LCOS 屏 9c、第四 LCOS 屏 9d；被 LCOS 屏反射的光合成一束到达第一分色片 8a，再通过第四透镜 7 与入射光束分离聚焦在反射镜 10 上，再通过透镜 11、12 到达 CCD 相机 13 成像。与快速振镜 1、波前探测器 5、四个 LCOS 屏、CCD 相机 13 相连结的计算机 14，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四个 LCOS 屏，使畸变波面得到校正。此时 CCD 相机 13 所摄的像为校正后的无畸变像，计算机 14 给出所拍摄像的显示。到此完成一个工作周期，之后周而复始。

为了更清楚理解本发明，下面对各个部件进行详细说明。

所述的快速振镜 1 为闭环自适应倾斜平面反射镜，用于校正波面的倾斜度，使进入波前探测器 5 和 LCOS 屏的光束不抖动。

所述的 PBS 分束镜 2 为偏振分光镜，透过光 S 光的消光比小于 1×10^{-3} 。

所述的第一透镜 3 与第二透镜 4 配合，将透过光 P 的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值即畸变的 PV 值小于 25nm。

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 5nm，波面的 PV 值的探测误差小于 25nm，探测频率不低于 500Hz。

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 光束形成直径与四个 LCOS 屏口径相等的平行光；第四透镜 7 焦距为 20~30mm，保证有足够的空间放置反射镜 10，以引入成像光路。

所述的第一分色片 8a、第二分色片 8b、第三分色片 8c、第四分色片 8d 和第五分色片 8e 将入射光在 450~880nm 光谱范围内分成四个子波段。

所述的第一 LCOS 屏 9a、第二 LCOS 屏 9b、第三 LCOS 屏 9c、第四 LCOS 屏 9d 为四个子波段的纯位相液晶波前校正器，中心校正波长分别为 470nm、530nm、610nm 和 720nm，它们的位相调制深度分别是各自校正中心波长的 1.20~1.25 倍，LCOS 屏中液晶对驱动电压的响应时间 $t_{on} < 5\text{ms}$ ，去除电压时液晶恢复初始态的时间 $t_{off} < 20\text{ms}$ ，像素数符合应用要求的分辨率。

所述的反射镜 10 位于第四透镜 7 的反射光路焦点处，引入成像光路。

所述的第四透镜 11 和第五透镜 12 焦距相同，使成像光束到达 CCD 相机 13。

所述的 CCD 相机 13 为高灵敏度、低噪声电子倍增型 EMCCD 相机，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，曝光时间不超过 2ms。

所述的计算机 14 数据处理量很大，需配置 DSP 集成模块，使数据处理占用的时间不超过 2ms。

本发明由于使用 PBS 分束镜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；由于采用多个纯位相液晶波前校正器，使成像光束的光谱可覆盖白光波段，成为高效利用光能的液晶自适应光学系统。

附图说明：

图 1 是本发明的结构示意图。图中 1 为快速振镜，2 为 PBS 分束镜，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，8a 第一分色片、8b 第二分色片、8c 第三分色片、8d 第四分色片、8e 第五分色片，9a 第一 LCOS 屏、9b 第二 LCOS 屏、9c 第三 LCOS 屏、9d 第四 LCOS 屏，10 反射镜，11 第五透镜，12 第六透镜，13 为 CCD 相机，14 计算机。

图 2a 是本发明中测量拟合波前用的响应矩阵 D_a 的结构示意图。

图 2b 是本发明中测量拟合波前用的响应矩阵 D_b 的结构示意图。

图 2c 是本发明中测量拟合波前用的响应矩阵 D_c 的结构示意图。

图 3 是本发明具体实施方式结构图。

具体实施方式：

1) 本实施方式中所用的快速振镜 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 25mm，反射率大于 97%，所用材料为不易膨胀的微晶硅玻璃，表面平整度的 PV 值小于 25nm，最大转动范围 2mrad，分辨率 0.1 μ rad，全程重复定位精度是 $\pm 2 \mu$ rad，工作频率：2mrad 转动范围时为 150~200Hz，0.2mrad 转动范围时为 800Hz。

2) PBS 分束镜 2 的尺寸：长×宽×高为 25mm×25mm×25mm，其中 S 光的消光比小于 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 11 和第六透镜 12 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，因为光源为宽光谱白光，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 25nm。

4) 委托俄国莫斯科州立大学装配了哈特曼波前探测器 5，子孔镜阵列为 14×14 ，探测的均方根误差 rms 值小于 5nm，波面的 PV 值的探测误差小于 25nm，探测频率 500Hz，量子效率峰值在 500nm 到 600nm 波长处，高达 90%。

5) 四个分色片将入射光光谱分成 500nm~580nm~690nm~880nm 三个子波段，其中第一分色片 8a 对波长大于 500nm 的光全反射、对波长小于 500nm 的光全透射；第二分色片 8b 对波长小于 580nm 的光全反射、对波长大于 580nm 的光全透射；第三分色片 8c 对波长小于 690nm 的光全反射、对波长大于 690nm 的光全透射；第四分色片 8d 对波长小于 880nm 的光全反射、对波长大于 880nm 的光全透射。

6) 委托美国 BNS 公司加工了第一 LCOS 屏 9a、第二 LCOS 屏 9b、第三 LCOS 屏 9c，LCOS 屏校正的中心波长分别为 532nm、635nm、785nm，相应的波长校正范围分别为 500nm~580nm、580nm~690nm、690nm~880nm，在电场中的上升响应时间 $\leq 5\text{ms}$ ，下降时间 $\leq 7\text{ms}$ ，光利用率 61.5%，像素面积 $19\mu\text{m} \times 19\mu\text{m}$ ，象素数 512×512，256 灰度级，此处灰度级对应驱

动电压的分度值，位相调制深度为 865nm。

- 7) 反射镜 10, 表面平整度的 PV 值小于 25nm, 反射率大于 95%。
- 8) CCD 相机 13, 为美国 ANDOR 公司的产品, 型号为 DV897, 像素数 512×512 , 像素面积 $16\mu\text{m} \times 16\mu\text{m}$, 量子效率在 $500 - 650\text{nm}$ 波段达到峰值, 高达 90%, 读出噪声在读出速率 10MHz 时为 1—62 个电子。
- 9) 计算机 14 的基本配置: CPU1.8G, 内存 256M, 硬盘 40G, 法国产 VP3 型 DSP 板卡, 含有 8 块 TMS320C64 的 DSP 芯片。
- 10) 在平行光源和快速振镜 1 之间、光束之下放置 25W 烙铁作为热扰源。
- 11) 首先建立拟合波前用的响应矩阵 D , 因为系统使用了三个液晶校正器即 LCOS 屏, 响应矩阵也需建三个, 三个响应矩阵的获得方法相同, 故只以其中一个液晶校正器即第一 LCOS 屏 9a 为例进行详细说明: 按照图 2a 搭建液晶闭环自适应光学系统。开启计算机 14, 热扰源处于无驱动状态; 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 $k=2, 3, 4, \dots, 36$, 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; 利用事先在第一 LCOS 屏 9a 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第一 LCOS 屏 9a 上的灰度级分布值; 将 35 项 Zernike 项的面形灰度级分布值通过计算机 14 逐项施加在第一 LCOS 屏 9a 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 14 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_a

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

此处 k 对应 Zernike 项数 $k=2、3、4、\dots、36$, m 对应哈特曼面阵探测器 5 上每一行或每一列的子孔径数 $m=1、2、\dots、14$ 。到此得到了响应矩阵 D_a , 并被自动存入计算机 14。

下一步是测量响应矩阵 D_b : 按照图 2b 搭建液晶闭环自适应光学系统, 以上述相同步骤可以获得响应矩阵 D_b 。

再下一步是测量响应矩阵 D_c : 按照图 2c 搭建液晶闭环自适应光学系统, 以上述相同步骤可以获得响应矩阵 D_c 。

11) 后面对于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 $s = Da$, 其中 D 分别为 D_a 、 D_b 、 D_c , 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 14 可以分别解出三个 a_k , 即可得到所探测波面在三个波段上的 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 14 将三个 Zernike 方程中的第一项与第二项分别平均, 算出整个波面在 x 轴和 y 轴上的倾斜量平均值反馈给快速振镜 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 14 算出位相数值解, 并根据波面校正器第一 LCOS 屏 9a、第二 LCOS 屏 9b、第三 LCOS 屏 9c 的位相与灰度级的关系分别将三个波面的位相数值解转换为相应灰度级分布反馈给第一 LCOS 屏 9a、第二 LCOS 屏 9b、第三 LCOS 屏 9c, 就可使三个子波段的畸变波面得到校正。

12) 按照图 3 搭建快速向列液晶开环自适应系统, 在入射的平行光束

之下、快速振镜 1 之前放置 25W 烙铁作为热扰源。

13) 开启热扰源，使平行光 1 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，口径与波前探测器 5 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 14 根据 $s = Da$ ，分别解出三个 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第一 LCOS 屏 9a、第二 LCOS 屏 9b、第三 LCOS 屏 9c 上的灰度级分布值；d) 驱动第一 LCOS 屏 9a、第二 LCOS 屏 9b、第三 LCOS 屏 9c 以校正三个子波段波面的畸变；e) PBS 分束镜 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第一 LCOS 屏 9a、第二 LCOS 屏 9b、第三 LCOS 屏 9c 上，且入射 S 光与每个 LCOS 屏的基板法线夹 1.5° 的角度，从第一 LCOS 屏 9a、第二 LCOS 屏 9b、第三 LCOS 屏 9c 反射的 S 光成为没有畸变的平行光，合为一束到达第一分色片 8a 上；f) 从第一分色片 8a 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 10 上，然后通过第五透镜 11、第六透镜 12 形成星点像到达 CCD 相机 13；g) 计算机 14 显示出 CCD 相机 13 所拍摄的像。至此完成一个工作周期，之后周而复始重复 a) 到 g) 步骤。

检验上述自适应系统的校正效果：自适应校正之前计算机 14 显示出的星点像是亮度较低、形状不规则的大尺寸弱光斑；而自适应校正之后所成的像是尺寸很小的圆亮斑，说明校正效果良好。

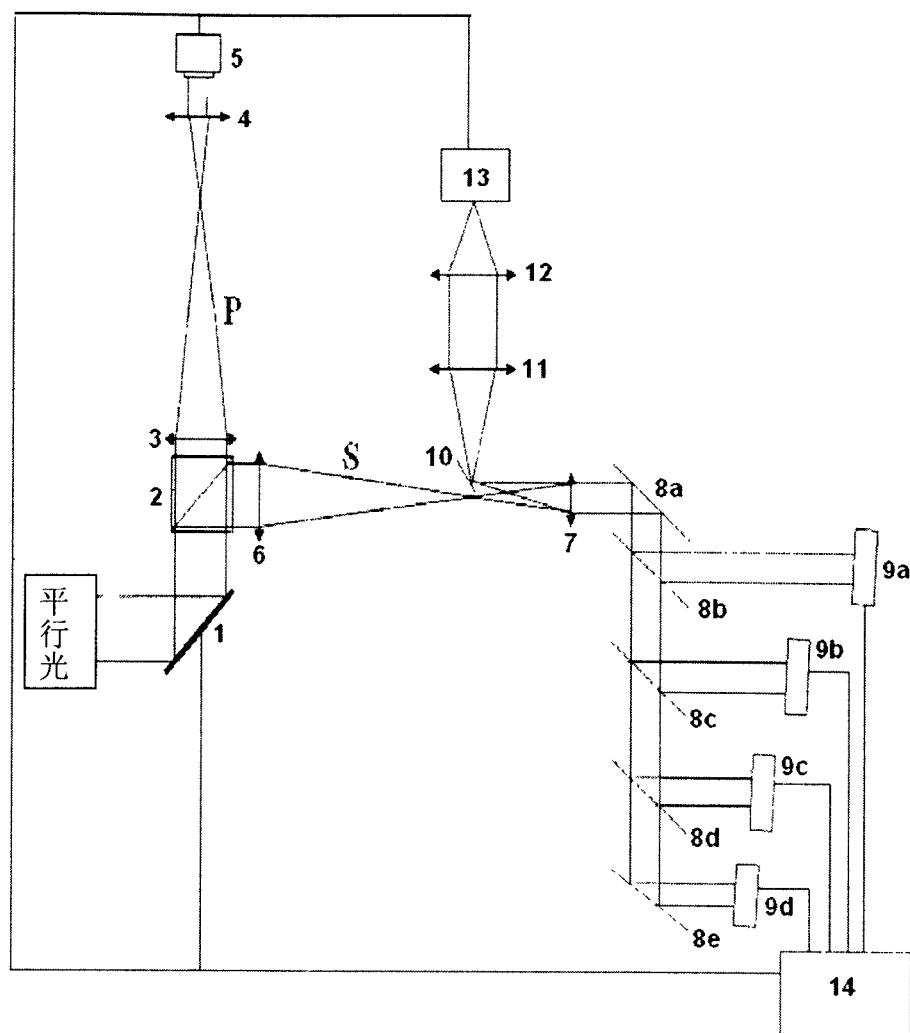


图 1

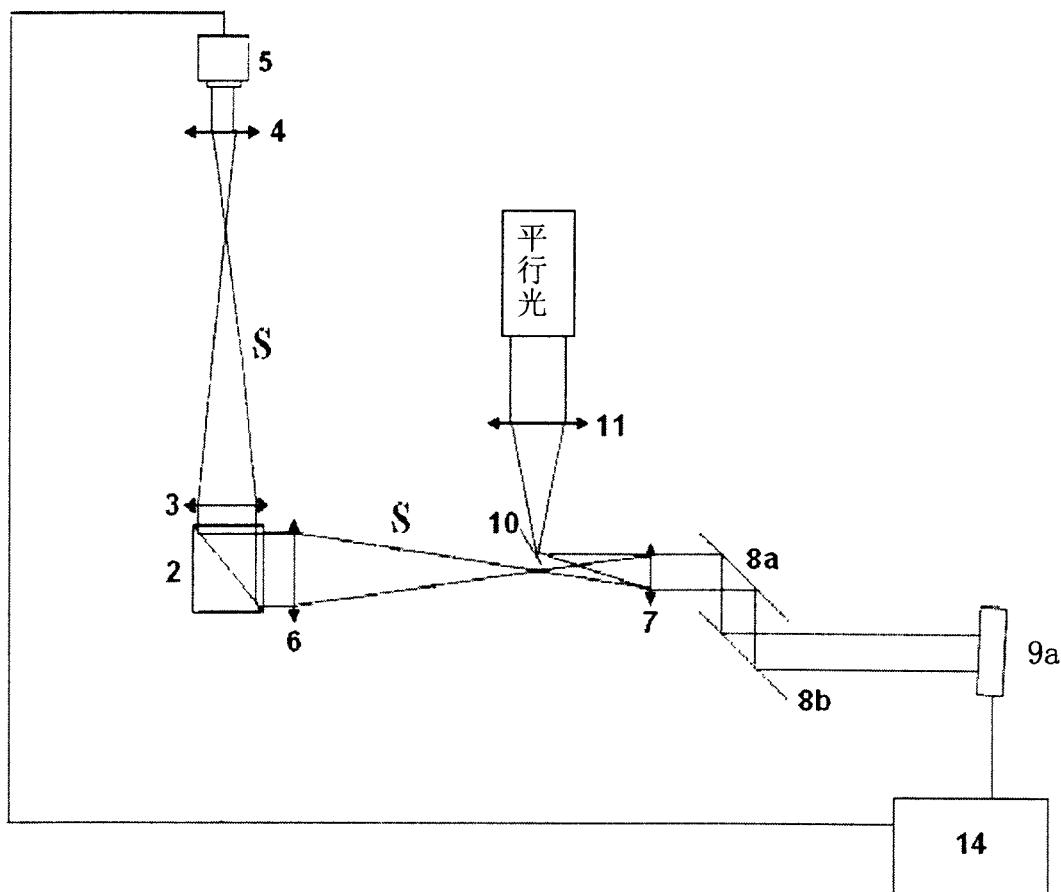


图 2a

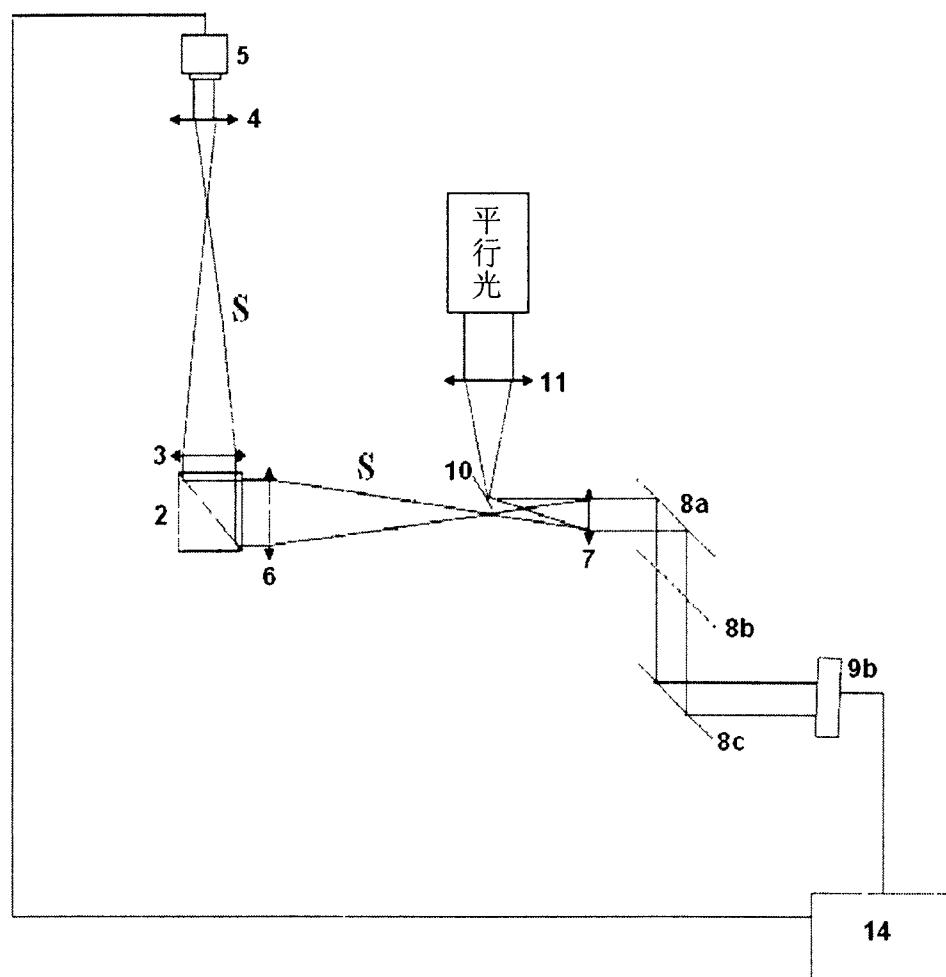


图 2b

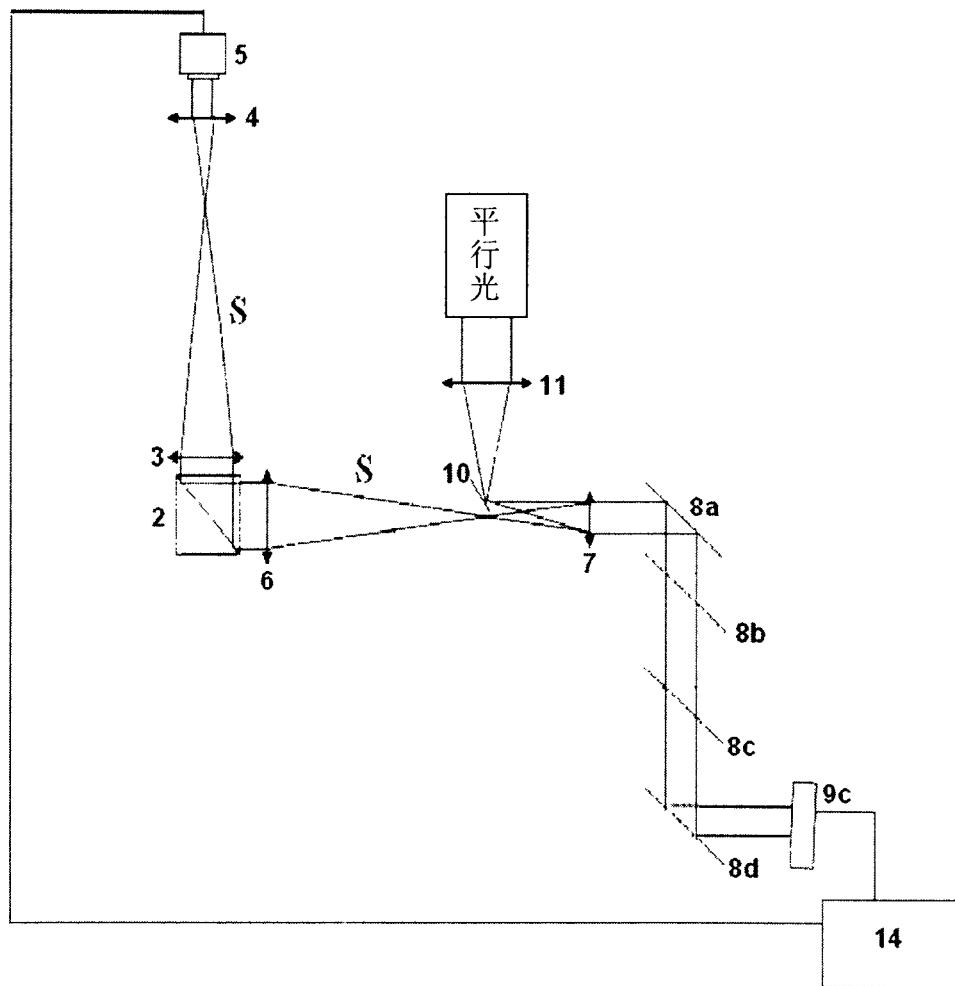


图 2c

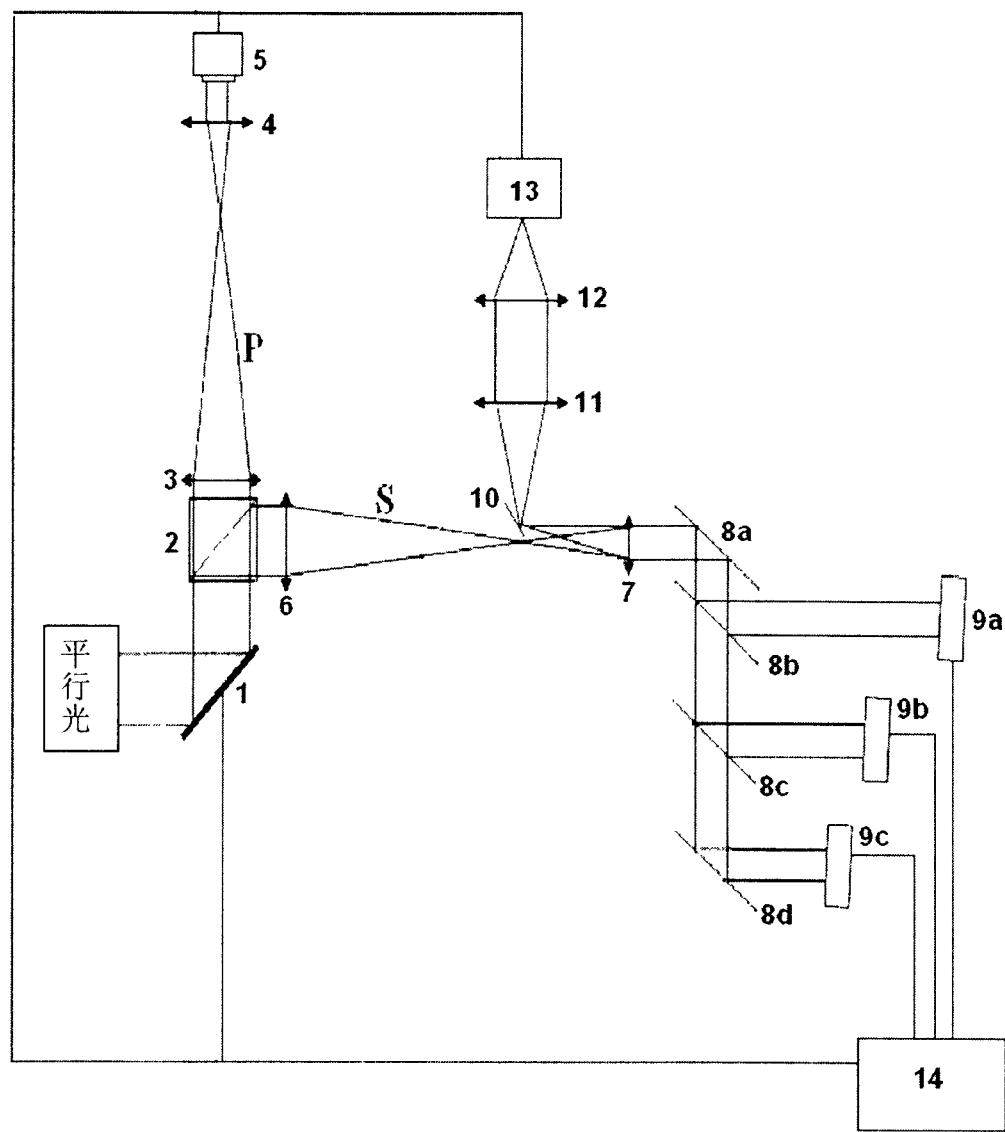


图 3