



# (12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 102540453 A

(43) 申请公布日 2012. 07. 04

(21) 申请号 201210046735. 9

G02B 26/08(2006. 01)

(22) 申请日 2012. 02. 27

G02B 27/00(2006. 01)

(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 130033 吉林省长春市东南湖大路 3888 号

(72) 发明人 宣丽 曹召良 穆全全 彭增辉  
胡立发 李大禹 刘永刚 姚丽双  
夏明亮 杨程亮 鲁兴海

(74) 专利代理机构 长春菁华专利商标代理事务所 22210

代理人 南小平

(51) Int. Cl.

G02B 26/06(2006. 01)

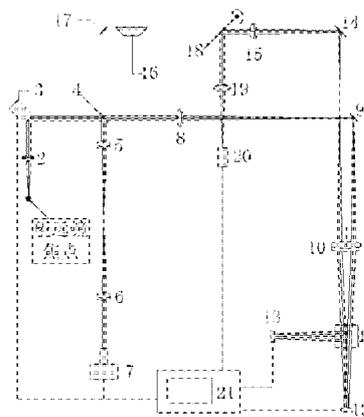
权利要求书 2 页 说明书 6 页 附图 3 页

## (54) 发明名称

结构紧凑的高灵敏度液晶自适应光学系统

## (57) 摘要

本发明属于自适应光学领域,涉及大气通道的液晶自适应光学成像系统,是一种探测支路与校正成像支路能量优化分配的、结构紧凑的高灵敏度液晶自适应光学系统。本发明由波前探测支路、校正成像支路、第三反射镜、道威棱镜构成,通过引入道威棱镜,与一固定反射镜、可旋转的反射镜和分色镜的光学组合,实现了自适应成像光路与液晶校正器响应测量光路间的切换,不但光路对准精度不受影响,而且解决了波前探测和校正器响应矩阵测量两个过程进入哈特曼波前探测器的光束截面翻转的问题,探测数据和校正器响应测量数据读出顺序实现了一致性;利用一个分色镜完成响应矩阵测量光路与波前探测器的对接,简化了探测支路的光学设计。



1. 一种结构紧凑的高灵敏度液晶自适应光学系统,其特征是由波前探测支路、校正成像支路、第三反射镜(17)、道威棱镜(16)构成;所述的波前探测支路由第一透镜(2)、快速振镜(3)、分色镜(4)、第二透镜(5)、第三透镜(6)、哈特曼波前探测器(7)、工控机(21)组成,所述的校正成像支路由第一透镜(2)、快速振镜(3)、分色镜(4)、第四透镜(8)、第一反射镜(9)、第五透镜(10)、PBS偏振分束器(11)、第一液晶校正器(12)、第二液晶校正器(13)、第二反射镜(14)、第六透镜(15)、第四反射镜(18)、第七透镜(19)、成像CCD(20)、工控机(21)组成;第一透镜(2)的前焦点与望远镜的出射焦点重合,快速振镜(3)位于第一透镜(2)和分色镜(4)之间,其法线与第一透镜(2)的光轴成 $45^{\circ}$ 配置;第四反射镜(18)做成以右端为轴进行 $0^{\circ}$ 与 $45^{\circ}$ 位置的旋转切换,当其为 $0^{\circ}$ 位置时就旋出光路,光束通过道威棱镜(16)至第三反射镜(17)反射,经分色镜(4)进入波前探测支路,当其为 $45^{\circ}$ 位置时,光束进入校正成像支路;

所述的波前探测支路中,第二透镜(5)和第三透镜(6)共焦面,快速振镜(3)到第二透镜(5)的光路长度为第二透镜(5)的焦距,第三透镜(6)到哈特曼波前探测器(7)的距离为第三透镜(6)的焦距;

所述的校正成像支路中,第四透镜(8)与第五透镜(10)共焦面,第四透镜(8)所在光轴经第一反射镜(9)折转 $90^{\circ}$ ,第五透镜(10)的中心轴线相对第一反射镜(9)的轴左移 $4\sim 6\text{mm}$ ,以使通过第五透镜(10)的平行光束产生 $2^{\circ}\sim 3^{\circ}$ 的倾斜,以这个入射角通过后面的PBS偏振分束器(11),又被分成透射P偏振光和反射S偏振光;分别在平行P偏振方向和S偏振方向设置第一液晶校正器(12)和第二液晶校正器(13)的e光光轴,即液晶取向方向;经两个校正器校正后的P、S偏振光束被反射回PBS偏振分束器(11),出射后两光轴重合合束,且以反向 $2^{\circ}\sim 3^{\circ}$ 的倾斜角再次经由第五透镜(10)出射;第二反射镜(14)将从第五透镜(10)出射的校正后光束折转 $90^{\circ}$ ,通过第六透镜(15)后成为直径与哈特曼波前探测器(7)接收口径相同的平行光;再用第四反射镜(18)折束 $90^{\circ}$ ,通过第七透镜(19)聚焦到CCD相机(20)上成像;

上述光路中的快速振镜(3)、哈特曼波前探测器(7)、第一液晶校正器(12)和第二液晶校正器(13)、CCD相机(20)均与工控机(21)相连,工控机(21)存有自适应控制软件。

2. 根据权利要求1所述的结构紧凑的高灵敏度液晶自适应光学系统,其特征是:

在上主光路进行目标的自适应校正成像过程之前,用哈特曼波前探测器(7)测量第一液晶校正器(12)和第二液晶校正器(13)的标准驱动响应信号;此时将第四反射镜(18)从光路中旋转移出,则从第六透镜(15)出射的平行光束将经过道威棱镜(16)、在第三反射镜(17)处折角 $90^{\circ}$ ,然后透射穿过分色镜(4)后被第二透镜(5)和第三透镜(6)调整为与哈特曼波前探测器(7)口径相同的平行光束;将点光源(1)放置在第一透镜(2)的前焦点处,并将望远镜接收的光截断使其不能进入系统光路;在第三透镜(6)和哈特曼波前探测器(7)之间插入波长与两个液晶校正器中心校正波长相同的单色滤光片(22),截断被分色镜(4)反射的光进入哈特曼波前探测器(7);测量第一液晶校正器(12)的响应信号时,用纸屏(23)插入PBS偏振分束器(11)和第二液晶校正器(13)之间,以截断第二液晶校正器(13)的光,保证只有第一液晶校正器(12)的光进入哈特曼波前探测器(7);分别用一系列Zernike模式、模式系数均取液晶校正器的中心校正波长 $785\text{nm}$ 、驱动第一液晶校正器(12),在哈特曼波前探测器(7)上获得一系列响应信号,将测得的第一液晶校正器(12)的

一系列响应信号存入工控机 (21) 的数据库中;测量第二液晶校正器 (13) 的响应信号时,将纸屏 (23) 插入 PBS 偏振分束器 (11) 和第一液晶校正器 (12) 之间,以截断第一液晶校正器 (12) 的光并保证只有第二液晶校正器 (13) 的光进入哈特曼波前探测器 (7),分别用一系列 Zernike 模式、模式系数均取液晶校正器的中心校正波长 785nm、驱动第二液晶校正器 (13),在哈特曼波前探测器 (7) 上获得一系列响应信号,将测得的第二液晶校正器 (13) 的一系列响应信号存入工控机 (21) 的数据库中;测量快速振镜 (3) 的标准驱动响应信号时,需旋转第四反射镜 (18) 至  $45^\circ$  位置,以阻挡从两个液晶校正器出射的光进入哈特曼波前探测器 (7),而此时只有快速振镜 (3) 的光被分色镜 (4) 反射进入哈特曼波前探测器 (7),将测得的快速振镜 (3) 的一系列响应信号存入工控机 (21) 的数据库中。

3. 根据权利要求 2 所述的结构紧凑的高灵敏度液晶自适应光学系统,其特征是与 1.23 米口径望远镜对接时,所述的哈特曼波前探测器 (7) 具有 5.85mm 接收孔径,微透镜阵列为  $9 \times 9$ ,其背部的 CCD 为高灵敏度 EMCCD,像素数  $128 \times 128$ ,使用  $2 \times 2$  binning 模式,采样频率达到 960Hz。

4. 根据权利要求 2 所述的结构紧凑的高灵敏度液晶自适应光学系统,其特征是所述的第一液晶校正器 (12) 和第二液晶校正器 (13) 的位相调制深度 800nm,中心校正波长为 785nm 响应时间为 2.6ms,象素数  $256 \times 256$ 。

5. 根据权利要求 2 所述的结构紧凑的高灵敏度液晶自适应光学系统,其特征是所述的快速振镜 (3) 为闭环自适应驱动式快速振镜,直径为 20mm,实际使用口径为 5.85mm,反射率大于 97%,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  $0.1 \mu\text{rad}$ 。

6. 根据权利要求 2 所述的结构紧凑的高灵敏度液晶自适应光学系统,其特征是所述的道威棱镜 (16) 为方形 K9 玻璃棱镜,截面尺寸  $10\text{mm} \times 10\text{mm}$ ,底边长度 42.28mm,透过率大于 99%。

## 结构紧凑的高灵敏度液晶自适应光学系统

### 技术领域

[0001] 本发明属于自适应光学领域,涉及液晶校正器、哈特曼波前探测器、自适应光学控制器、分色镜和 PBS 分束器、道威棱镜等光学元件的组合系统,具体地说是一种结构紧凑的高灵敏度液晶自适应光学系统。

### 背景技术

[0002] 光波前自适应校正系统的功能是对入射光的畸变波前进行实时补偿校正,得到理想的光学成像。液晶校正器采用微电子技术,利用液晶器件高象素密度的特点,具有校正精度高,制备工艺成熟的特点,因此液晶校正器的自适应系统具有很大的应用潜力。但液晶校正器须在偏振光中工作,如果自适应系统设计为通常的闭环自适应校正模式,能量利用率将减低 50%。在“无偏振光能量损失的液晶自适应光学系统”(中国专利, ZL 200610173382) 中提出了一项开环液晶自适应光学系统的技术,解决了液晶自适应光学系统 50%的偏振能量损失问题。

[0003] 所述的闭环液晶自适应校正系统是光束先通过偏振片、校正器,然后被分为两路,一路用于探测,一路用于成像,且两路的能量均为入射光能的 25%;而开环液晶自适应校正系统是用 PBS 偏振分束器先将入射光分为两路偏振光,则大约 50%的能量用于探测,另外 50%的能量用于波前校正后进入 CCD 成像。所以开环液晶自适应校正系统能量利用率较高。

[0004] 但是,开环系统中,在测量液晶校正器的 Zernike 模式响应矩阵时,需将前述的 PBS 偏振分束器做一次旋转以将光路切换至内置光源,待响应矩阵测试完成后再将 PBS 旋转复原。由此带来的复位误差对成像效果影响也很大,针对这个问题“兼具开环与闭环的液晶自适应光学系统”(申请受理号 200910218116.1,公开号 CN101726848A),给出了解决办法。

[0005] 尽管如此,液晶自适应校正系统能够成像的星等仍然比预想的低、即要求成像物体的光强度较高;进一步寻找根源,发现是校正成像支路与波前探测支路之间的光能量分配不合理,没有考虑两支路上的接收器即相机的曝光极限时间不同。为此又提出了“能量优化分配的自适应系统”(申请受理号 201010004394.X),由于空间目标几乎都辐射可见-近红外光,所以望远镜接收的光谱范围一般对应 400nm-1000nm 波段;但相机的波段都较窄,在 400nm-700nm 波段和 700nm-950nm 波段才有量子效率很高的 CCD,因此“能量优化分配的自适应系统”按照波段分开探测支路和校正成像支路,通过曝光积分时间不同平衡两支路的能量,使系统的探测灵敏度提高。

### 发明内容

[0006] 本发明是针对上述液晶自适应系统存在的不足,做了进一步优化设计,目的是提供一种结构紧凑的高灵敏度液晶自适应光学系统,解决了像面翻转问题,简化了探测支路的光学设计,进一步提高了探测灵敏度,使液晶自适应系统的结构更紧凑,操作更简便,更

加符合工程化应用的要求。

[0007] 本发明的内容是：在如图 1 所示的主光学系统中引入道威棱镜 16，使系统在波前探测和液晶校正器响应矩阵测量两个过程中进入哈特曼波前探测器 7 的光束截面不会互成  $180^\circ$  翻转状态，使二者的数据读出顺序一致；另外利用主光路中的分色镜 4，加上与两个液晶校正器的中心校正波长相同的单色滤光片 22，如图 2 所示，即可形成液晶校正器响应矩阵测量光路与波前探测器的对接，简化探测支路，提高能量透过率。

[0008] 为了更好地理解本发明，下面详述本发明的光路设计。主光学系统如图 1 所示，由第一透镜 2、快速振镜 3、分色镜 4、第二透镜 5、第三透镜 6、哈特曼波前探测器 7、第四透镜 8、第一反射镜 9、第五透镜 10、PBS 偏振分束器 11、第一液晶校正器 12、第二液晶校正器 13、第二反射镜 14、第六透镜 15、道威棱镜 16、第三反射镜 17、第四反射镜 18、第七透镜 19、成像 CCD20、工控机 21 组成。从望远镜出射的光聚焦在第一透镜 2 的前焦点处，通过第一透镜 2 后成为平行光到达与光轴成  $45^\circ$  放置的快速振镜 3，快速振镜 3 的作用是校正望远镜接收光波前的倾斜。去掉倾斜的光束可以无抖动地到达分色波长为 700nm 的长波通分色镜 4，分色镜 4 的作用是将 400nm-700nm 波段的光束反射，700nm-950nm 波段的光束透射，形成互为垂直的短波波前探测支路和长波校正成像支路。

[0009] 在波前探测支路，快速振镜 3 到第二透镜 5 的光路长度为第二透镜 5 的焦距，第三透镜 6 到哈特曼波前探测器 7 的距离为第三透镜 6 的焦距，以使快速振镜 3 与哈特曼波前探测器 7 共轭。波前探测支路的短波段光束依次通过共焦面的第二透镜 5、第三透镜 6 后形成直径与哈特曼波前探测器 7 的接收口径相同的光束而全部进入哈特曼波前探测器 7，哈特曼波前探测器 7 的作用是探测望远镜接收光的波前畸变。

[0010] 在校正成像支路，长波段光束依次通过第四透镜 8、第一反射镜 9、第五透镜 10，使光束调整为直径与液晶校正器接收口径相同的平行光。第四透镜 8 与第五透镜 10 共焦面，第四透镜 8 所在光轴经第一反射镜 9 折转  $90^\circ$ ，第五透镜 10 的轴线相对第一反射镜 9 后的光束轴线左移  $4 \sim 6\text{mm}$ ，使得通过第五透镜 10 的光束为偏心入射，然后产生  $2^\circ \sim 3^\circ$  的倾斜出射，以这个入射角通过 PBS 偏振分束器 11 被分成透射 P 偏振光和反射 S 偏振光，分别在平行 P 偏振方向和 S 偏振方向设置第一液晶校正器 12 和第二液晶校正器 13 的 e 光光轴、即液晶取向方向。经第一液晶校正器 12 校正后的 P 偏振光、第二液晶校正器 13 校正后的 S 偏振光，光束被反射回 PBS 偏振分束器 11，出射后两光轴重合合束，且以反向  $2^\circ \sim 3^\circ$  的倾斜角再次到达第五透镜 10，到达第五透镜 10 的焦面时形成的焦斑正好与入射光束的焦斑分开  $8 \sim 12\text{mm}$ 。从第五透镜 10 出射的校正后光束被第二反射镜 14 折转  $90^\circ$ ，通过第六透镜 15 后成为直径与哈特曼波前探测器 7 接收口径相同的平行光，以备用于液晶校正器响应信号的测量；再用第四反射镜 18 折束  $90^\circ$ ，通过第七透镜 19 聚焦到 CCD 相机 20 上成像。

[0011] 上述主光路中，第五透镜 10 与第一液晶校正器 12 和第二液晶校正器 13 的距离均为第五透镜 10 的焦距，第六透镜 15 与第二透镜 5 的距离为第六透镜 15 和第二透镜 5 的焦距之和，以保证探测支路上的哈特曼波前探测器 7 与第一液晶校正器 12 和第二液晶校正器 13 共轭。另外，快速振镜 3、哈特曼波前探测器 7、第一液晶校正器 12 和第二液晶校正器 13、CCD 相机 20 均与工控机 21 相连，工控机 21 存有自适应控制软件，其作用是：将哈特曼波前探测器 7 中的波前光学信号读出，处理为 Zernike 模式表示的波前像差；将倾斜像差发送给

快速振镜 3,使其校正这个倾斜,其余的高阶像差发送给第一液晶校正器 12 和第二液晶校正器 13,使二者校正 P 偏振光和 S 偏振光中的高阶像差;启动 CCD 相机 20 拍摄,并控制其曝光时间。

[0012] 图 1 所示的光路中还有道威棱镜 16、第三反射镜 17,这两个元件的设置是用于测量探测器对校正器的响应关系的。自适应波前校正系统需要使校正器与探测器的几何位置严格对准,且校正器的位相驱动须在探测器上有严格的定量响应。在本发明的主光路中只有通过初级校正器即快速振镜 3 的光束能够进入哈特曼波前探测器 7,通过高级校正器即第一液晶校正器 12 和第二液晶校正器 13 的光束通常不能进入哈特曼波前探测器 7,因此需要特别设计,从而给出本发明的关键内容。

[0013] 如图 2 所示,将第四反射镜 18 设计成以右端为轴能进行  $0^{\circ}$  与  $45^{\circ}$  旋转切换的功能元件,当其为  $0^{\circ}$  时就旋出光路,通过第一液晶校正器 12 和第二液晶校正器 13 的光束就能通过道威棱镜 16、再由第三反射镜 17 反射进入分色镜 4,分色镜 4 允许 700nm 以上波长的光透过,这正是两个高级校正器的工作波段,这样经第一液晶校正器 12 和第二液晶校正器 13 作用的光束就能进入哈特曼波前探测器 7,实现响应测量。上述设计中道威棱镜 16 的作用是使光束截面上上下下翻转,补偿一次反射镜的翻转作用;因为在探测支路中光束只被分色镜 4 反射了一次,而在校正支路中除了被液晶校正器反射了一次,还被三个反射镜反射了三次,这四次光束翻转正好与探测支路的光束截面上上下下颠倒,也就是哈特曼波前探测器 7 对液晶校正器的驱动响应与探测外来光时的光束截面上上下下颠倒,给后续的数据处理带来很大麻烦。因此在光束到达反射镜 17 之前,令其首先通过道威棱镜 16 补偿一次反射镜的翻转作用,形成探测支路与校正支路中的反射次数同为奇数或同为偶数,以保持探测光束与响应测量光束截面的几何位置一致。

[0014] 为了准确测量快速振镜 3、第一液晶校正器 12 和第二液晶校正器 13 这三个器件在标准 Zernike 模式驱动信号下的探测器响应信号,需要使用没有大气湍流干扰的稳定点光源。本发明中,将具有氙灯光谱的点光源 1 放置在望远镜和第一透镜 2 的共焦点处,并将望远镜接收的光截断而不能进入自适应光路,如图 2 所示,先分别测量第一液晶校正器 12 和第二液晶校正器 13 的标准驱动响应信号。在哈特曼波前探测器 7 前放置波长与两个液晶校正器的中心校正波长相同的单色滤光片 22,以阻断被分束镜 4 反射过来的未经过液晶校正器的光束进入哈特曼波前探测器 7,而只让携带有液晶校正器驱动信号的 785nm 单色光进入;由于第一液晶校正器 12 和第二液晶校正器 13 的响应信号会有所不同或根本不同,故分别测量二者的响应信号。首先用纸屏 23 插入 PBS 偏振分束器 11 和第二液晶校正器 13 之间,以截断进入第二液晶校正器 13 的光,而只有第一液晶校正器 12 的光进入哈特曼波前探测器 7,用工控机 21 向第一液晶校正器 12 施加一系列 Zernike 模式的分布电压,同时在哈特曼波前探测器 7 中获得相应的响应信号,称为第一液晶校正器 12 的响应信号,将其存入工控机 21 的数据库中。然后将纸屏 23 插入 PBS 偏振分束器 11 和第一液晶校正器 12 之间,以截断进入第一液晶校正器 12 的光,并保证只有第二液晶校正器 13 的光进入哈特曼波前探测器 7,用工控机 21 向第二液晶校正器 13 施加同样系列 Zernike 模式的分布电压,将在哈特曼波前探测器 7 中获得的第二液晶校正器 13 的响应信号存入工控机 21 的数据库中。完成了这两个校正器件在标准 Zernike 模式驱动信号下的探测器响应信号测量。下一步测量快速振镜 3 的响应信号,将单色滤光片 22 和纸屏 23 移出光路,旋转第四反射镜 18

为  $45^\circ$ ，以使经过第一液晶校正器 12 和第二液晶校正器 13 的光不能再进入哈特曼波前探测器 7，构成图 3 所示的形式，这个光路只有快速振镜 3 的光能够进入哈特曼波前探测器 7，可以测量快速振镜 3 的响应信号。用工控机 21 向快速振镜 3 施加一系列倾斜模式的分布电压，同时在哈特曼波前探测器 7 中获得的快速振镜 3 的响应信号，存入工控机 21 的数据库中。完成了三个器件的驱动响应测量，将光源 1 移出光路，与望远镜连接，恢复为图 1 所示的光路，即可进行目标的自适应校正成像。

[0015] 本发明采用道威棱镜 16、第三反射镜 17、可旋转的第四反射镜 18 和分色镜 4 的光学组合，实现了自适应成像光路与液晶校正器响应测量光路间的切换。切换过程中光路对准精度不受影响，没有光束翻转问题，简化了数据处理，元件少，结构简化。另外液晶校正器的响应矩阵改为单色光条件下测量，可以提高测量的准确性。

### 附图说明

[0016] 图 1 是本发明的液晶自适应校正成像光路示意图。2 为第一透镜，3 为快速振镜，4 为分色镜，5 为第二透镜、6 为第三透镜，7 为哈特曼波前探测器，8 为第四透镜，9 为第一反射镜，10 为第五透镜，11 为 PBS 偏振分束器，12 为第一液晶校正器、13 为第二液晶校正器，14 为第二反射镜，15 为第六透镜，16 为道威棱镜，17 为第三反射镜，18 为可以右端为轴进行旋转的第四反射镜，当其为  $0^\circ$  时就旋出光路，19 为第七透镜、20 为成像 CCD，21 为工控机。第一透镜 2 的前焦点与接收望远镜的焦点重合，第五透镜 10 的轴线相对第一反射镜 9 的轴线左移  $4 \sim 6\text{mm}$ ，第一液晶校正器 12 和第二液晶校正器 13 分别校正 P 偏振光和 S 偏振光，工控机 21 存有自适应控制软件。

[0017] 图 2 是测量第一液晶校正器 12 响应信号的光路示意图。1 为点光源，具有氙灯光谱，位于第一透镜 2 的前焦点处；第四反射镜 18 从光路中旋转移出至  $0^\circ$  位置，以使经过第一液晶校正器 12 的光能够进入哈特曼波前探测器 7；22 为波长  $785\text{nm}$  的单色滤光片，以截断由分束镜 4 反射过来的未经过液晶校正器的光束进入哈特曼波前探测器 7；23 为纸屏，以截断第二液晶校正器 13 的光进入哈特曼波前探测器 7。

[0018] 图 3 是测量快速振镜 3 响应信号的光路示意图。第四反射镜 18 旋转为  $45^\circ$  进入光路，以使经过两个液晶校正器的光不能进入哈特曼波前探测器 7，而只有通过快速振镜 3 的光进入哈特曼波前探测器 7。

[0019] 图 4 是本发明的系统与长春市经济开发区的 1.23 米口径望远镜对接，获得的北极星图像，其中 (a) 为自适应校正前的像，(b) 为自适应校正后的像。当时大气相干长度  $r_0 = 6\text{cm}$ ，湍流格林伍德频率约  $85\text{Hz}$ ；成像波段设置为  $700\text{nm} - 900\text{nm}$ ，成像 CCD20 的曝光时间设置为  $200\text{ms}$ 。

### 具体实施方式

[0020] 1) 第一透镜 2、第二透镜 5、第三透镜 6、第四透镜 8、第六透镜 15、第七透镜 19 均为双胶合消色差透镜，且表面镀有增透膜，口径均为  $30\text{mm}$ ，焦距分别为  $51.8\text{mm}$ 、 $100\text{mm}$ 、 $100\text{mm}$ 、 $200\text{mm}$ 、 $200\text{mm}$ 、 $100\text{mm}$ ，第五透镜 10 也为双胶合消色差、表面镀有增透膜的透镜，口径为  $50\text{mm}$ ，焦距为  $200\text{mm}$ 。

[0021] 2) 快速振镜 3 为闭环自适应驱动式快速振镜（德国 PI 公司），直径为  $20\text{mm}$ ，实际

使用口径为 5.85mm, 反射率大于 97%, 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  $0.1\ \mu\text{rad}$ 。

[0022] 3) 哈特曼波前探测器 7 具有 5.85mm 接收孔径, 微透镜阵列为  $9 \times 9$ , 其背部的 CCD 为高灵敏度 EMCCD (英国 ANDOR 公司 DV897), 像素数  $128 \times 128$ , 使用  $2 \times 2$  binning 模式, 采样频率达到 960Hz, 可探测波段从 350nm ~ 1000nm, 波前测量误差峰谷值  $0.05\lambda$ , 均方根值  $0.01\lambda$ , 其中  $\lambda = 633\text{nm}$ 。

[0023] 4) 第一反射镜 9 为  $30 \times 30$  方形反射镜, 反射率大于 98%。

[0024] 5) 第二反射镜 14、第三反射镜 17、第四反射镜 18, 口径均为 20mm、反射率大于 98%; 第四反射镜 18 以右端为轴能进行  $0^\circ$  与  $45^\circ$  旋转切换, 当其为  $0^\circ$  位置时就旋出光路, 当其为  $45^\circ$  位置时就进入光路。

[0025] 6) 道威棱镜 16 为方形 K9 玻璃棱镜, 截面尺寸  $10\text{mm} \times 10\text{mm}$ , 底边长度 42.28mm, 透过率大于 99%。

[0026] 7) 第一液晶校正器 12、第二液晶校正器 13 均为 LCOS 型液晶校正器, 接收窗口为  $6.14\text{mm} \times 6.14\text{mm}$ , 响应时间 2.6ms, 像素数  $256 \times 256$ , 位相调制深度 800nm, 中心校正波长为 785nm, 驱动电压的分度值即灰度级有 256 个。

[0027] 8) PBS 偏振分束器 11, 尺寸为  $25\text{mm} \times 25\text{mm} \times 25\text{mm}$ , 其 S 偏振光或 P 偏振光的消光比为  $1 \times 10^{-3}$ 。

[0028] 9) 成像用 CCD 相机 20 为英国 ANDOR 公司 DV897 型号的产品, 像素数  $512 \times 512$ 。

[0029] 10) 点光源 1, 是光纤束耦合的卤素光源, 具有氙灯光谱, 光纤束直径 1mm, 单根光纤直径为  $25\ \mu\text{m}$ 。

[0030] 11) 分色镜 4, 分色波长为 700nm 的长波通分色镜。

[0031] 12) 单色滤光片 22 的透过波长与两个液晶校正器的中心校正波长相同, 为 785nm。

[0032] 13) 按照图 1 所示光路, 利用 1) ~ 10) 所述的元件搭建液晶自适应光学系统, 各元件的位置与摆放方式严格按照“发明内容”所述的位置与方式摆放, 并且快速振镜 3、哈特曼波前探测器 7、第一液晶校正器 12、第二液晶校正器 13、成像 CCD 相机 20 均与存有自适应控制软件的工控机 21 相连接, 望远镜为坐落在长春市经济开发区的 1.23 米口径望远镜。

[0033] 14) 按照图 2 所示光路, 第四反射镜 18 从  $45^\circ$  位置上旋转至  $0^\circ$  位置, 移出光路, 以使经过第一液晶校正器 12 的光束经过道威棱镜 16 发生光束截面上下翻转, 然后到达反射镜 17 后光束截面又翻转回来, 通过分色镜 4 后一直到达哈特曼波前探测器 7。在哈特曼波前探测器 7 之前置入波长 785nm 的单色滤光片 22, 以滤除分色镜 4 反射过来的未经过第一液晶校正器 12 的干扰光。在第二液晶校正器 13 之前置入纸屏 23, 以截断进入第二液晶校正器 13 的光。测量哈特曼波前探测器 7 对第一液晶校正器 12 的标准 Zernike 模式驱动响应。分别用 Zernike 多项式的第 2 项到第 36 项模式、模系数均取液晶校正器的中心校正波长 785nm, 驱动第一液晶校正器 12, 在哈特曼波前探测器 7 上获得一系列响应信号, 将测得的第一液晶校正器 12 的一系列响应信号存入工控机 21 的数据库中。

[0034] 15) 将图 2 所示光路中的纸屏 23 移至 PBS 偏振分束器 11 和第一液晶校正器 12 之间, 以截断进入第一液晶校正器 12 的光, 并保证只有第二液晶校正器 13 的光进入哈特曼波前探测器 7, 按照步骤 14) 所述方法测量哈特曼波前探测器 7 对第二液晶校正器 13 的标准 Zernike 模式驱动响应, 然后将第二液晶校正器 13 的响应信号存入工控机 21 的数据库中。

[0035] 16) 按照图 3 所示光路,测量哈特曼波前探测器 7 对快速振镜 3 的标准驱动响应,将快速振镜 3 的响应信号存入工控机 21 的数据库中。

[0036] 17) 将光路恢复为图 1 所示的结构。

[0037] 18) 使望远镜对准北极星进行自适应校正成像实验,当时大气相干长度  $r_0 = 6\text{cm}$ ,湍流格林伍德频率约 65Hz,属于较差的观测条件即湍流较强。成像波段设置为 700nm-900nm,成像 CCD20 的曝光时间设置为 200ms。

[0038] 19) 启动工控机 21 中的自适应控制程序,获得自适应校正前后的星像,如图 4。

[0039] 结果表明,校正前 (a) 的星像由于湍流干扰发散为一片低能量的光点集合,校正后 (b) 的星像恢复了无穷远处点目标的特征,说明本发明的液晶自适应光学系统设计合理。

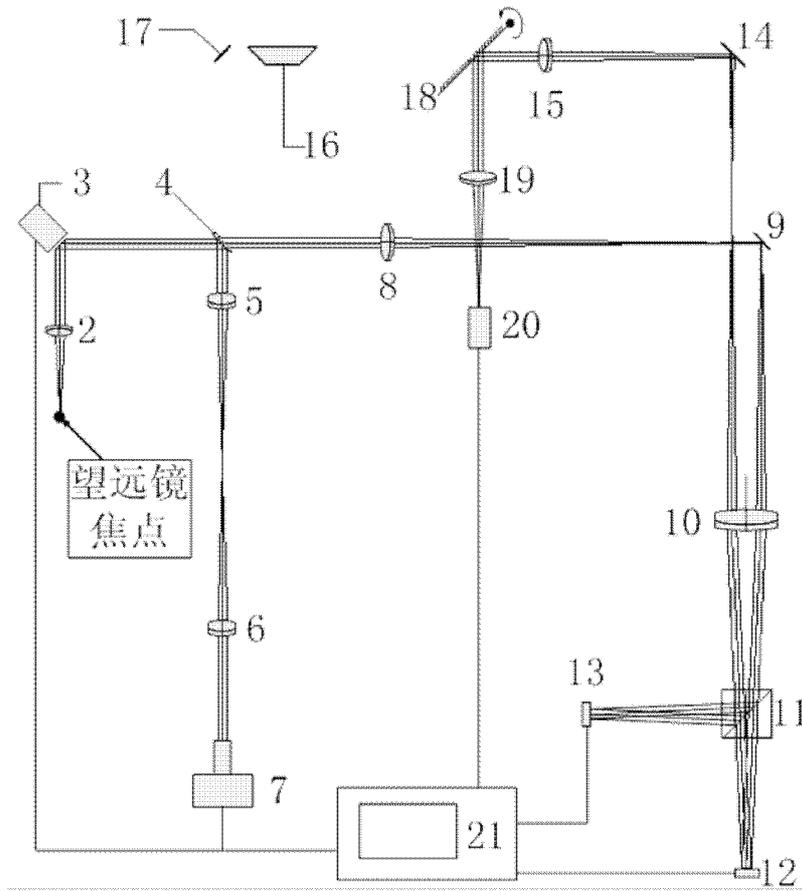


图 1

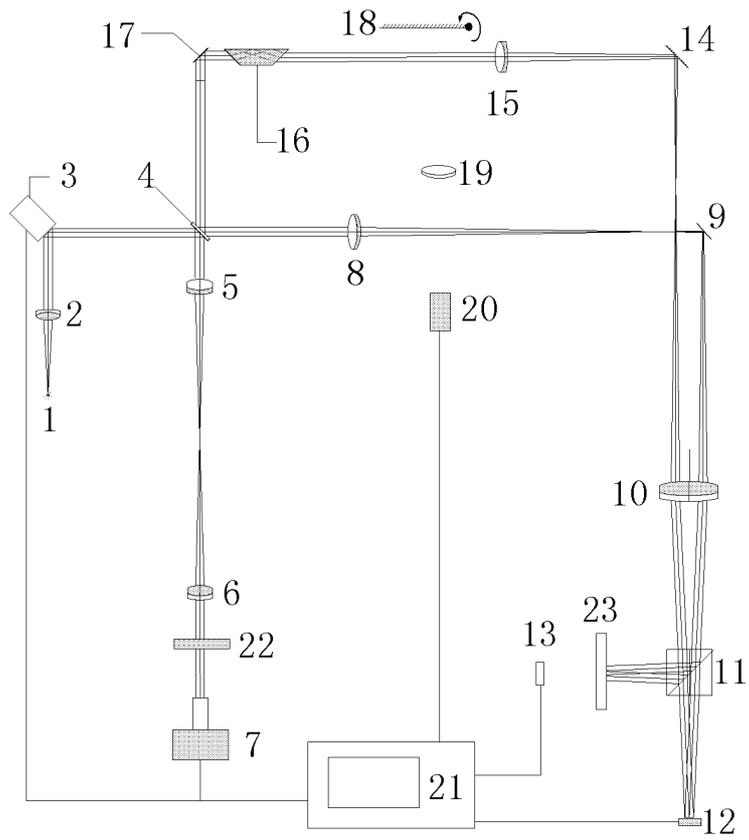


图 2

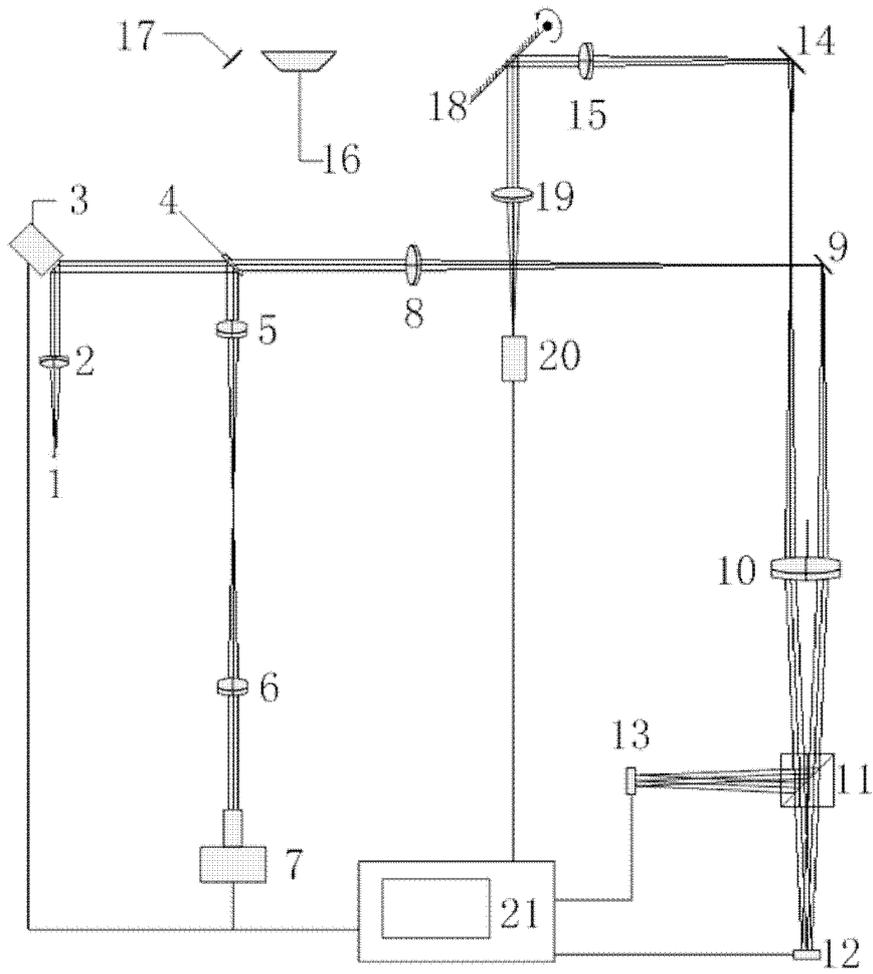


图 3

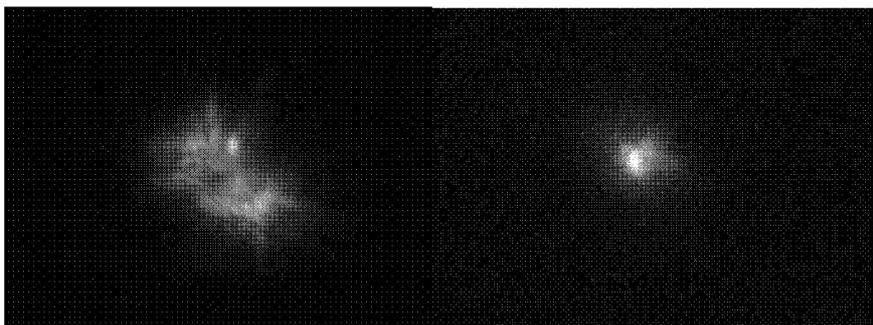


图 4