

# 自适应光学在 4.3m 望远镜设计中的应用<sup>1)</sup>

马 品 仲

(中国科学院南京天文仪器研制中心, 南京 210042)

**摘要** 在阐述自适应光学系统性能要求和特点后,介绍了波面传感器、变形反射镜、人造参考星系统设计方案。

**关键词** 波面传感器,变形反射镜,人造参考星系统

**Abstract** After describing the required specifications, characteristics and overall design of the adaptive optical system for the 4.3m telescope, we introduce the basic principle underlying the correction of dynamic wavefront errors in real-time. This system consists of a Shack-Hartmann wave-front sensors, a 37-element deformable mirror and an artificial reference star system.

**Key words** wave-front sensors, deformable minor, artificial reference star system

## 1 前言

现代科学技术的迅猛发展和全球人口急剧增长,迫使人类重视开发利用宇宙,如利用月球作无污染和微重力生产,采矿(如  $^3\text{He}$  可作核燃料),作无引力宇航发射站和无大气湍流天文观测站等。探索人类能否在宇宙中长期生活和宇宙中是否有生命体,探索恒星和地球的形成与演变对人类的影响,探索天体剧变物理过程所产生的巨大能量对人类的危害与能否被利用,探索极遥远和极暗弱河外星系的形成与演变,并不断发现新天体,仔细研究天体的物质构成、形状和大小,化学物理性质及其坐标和运动等,迫切需要大口径望远镜。为此世界各国不惜投入巨资,争取在 1999 年建成 10 余台口径为 8m 和 10m 的望远镜,如日本投资 2 亿美元建 1 台 8m 镜,印度在 1985 年建成 2.34m 镜后,准备再建 1 台 7m 镜。我国在 1988 年建成 2.16m 镜后应继续研制口径更大的望远镜,否则必将影响我国天文、空间等高科技事业的发

展,影响全球联机观测,损害我国的国际威望。为此,根据我国台址和财力,设备和技术情况,我们拟研制 4.3m 光学红外望远镜 1 台<sup>1)</sup>。

但是望远镜口径增大后,大气湍流使光学系统能量分散,分辨率下降,严重影响成像质量。故实时测量波面畸变量并实时修正极为重要,为此我们利用控制理论来提高成像质量,形成自适应光学测控系统。

## 2 自适应光学测控系统原理

大气由于冷暖气体的混合并产生风,因而形成如沸水面上水蒸汽的不断对流运动。这种人眼看不见的大气湍流将严重影响望远镜的成像质量,因为空气折射率与温度有关,这种迅速变化的大气折射率不均匀,必将导致局部光程长度随湍流而变化,使光的成像波面产生畸变并分散能量,从而使像质模糊,分辨率下降。大气湍流能产生“凹凸不平”的波面畸变量为  $\lambda/6$

1) 1994 年 11 月 11 日收到初稿,1994 年 12 月 9 日收到修改稿。

的光束，我们把该光束的横向尺寸  $r_0$  称为大气相干长度。对于可见光， $r_0$  一般在 10cm 左右，就是说地面望远镜口径在 10cm 左右时，它的成像质量不受大气湍流影响，如大于 20cm 甚至达几米口径的大望远镜，它们的成像质量将严重地受到大气湍流的影响，使波面畸变和能量分散，导致大口径望远镜成像质量严重下降。为此需用图 1 “自适应光学测控”修正办

法，来校正波面畸变和能量分散。由于大气湍流，空气热影响，阵风等对反射镜的颤动具有 0.1—1000Hz 高频变化频率，因此要用高灵敏度波面探测器实时测出高频波面变化，并用与大气畸变波面相反的变形镜，实时修正  $\lambda/10$  波面误差，这种具有多路平行校正和 0.1—1000 Hz 带宽的变形反射镜，可恢复原来星体成像波面，并由 CCD 相机接收，从而获得衍射极限分辨率图像。

### 3 自适应测控系统总体设计

因河外星系的星光极其微弱，不允许再截取一部分星光作 Shack-Hartmann 波面探测，测量大气湍流引起的畸变波面误差，否则将严重降低观测星等和观测距离。为此采用人造参考星光（激光激发的大气散射荧光）作 Shack-Hartmann 的波面探测用<sup>[3]</sup>，而星光可全部用作成像以及光谱和光度测量之用。为避免人造参考星光对天文成像图像探测器 CCD 的干扰，天文成像和波面探测过程必须迅速交替进

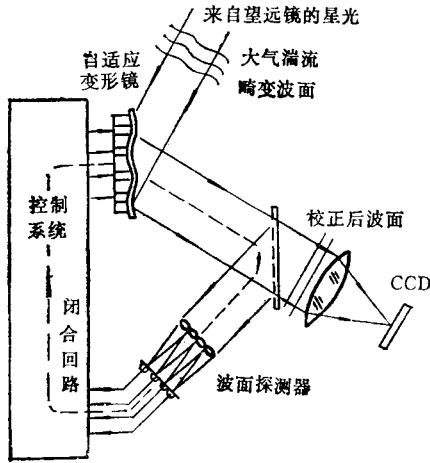


图 1 自适应光学测控原理

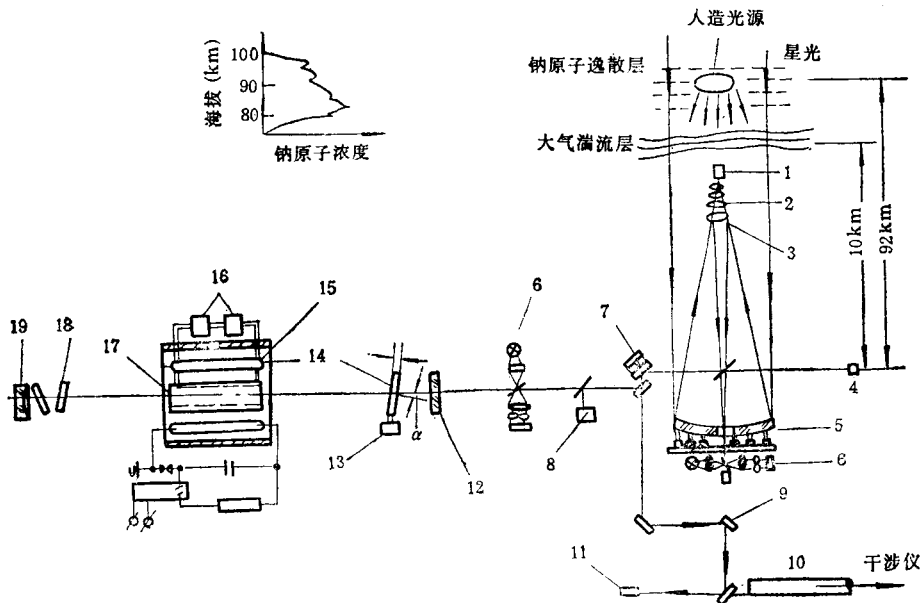


图 2 4.3m 光学红外望远镜和人造参考星系统原理

- (1.主焦 CCD 相机;2.改正镜;3.副镜;4.耐焦 CCD 相机;5.主动执行器;6.波面探测器;7.自适应变形镜;  
8.第一耐焦 CCD 相机;9.卡焦 CCD 相机;10.真空管道;11.折焦 CCD 相机;12.平面输出镜;13.转台;  
14.滤光器;15.脉冲氙灯;16.泵池;17.染料激光器;18.偏振器;19.凹全反射镜)

行,并使天文成像波段避开 5891—5896 Å 人造星光波段(可分光谱波),即人造光源的参考光波与实际星体的物光波在时间上是交替接收,并从波段上分离。因人造参考星光与被测星光同时经过大气湍流层(如图 2 所示),它们均有相同的畸变波面。因大气层在 92km 高空有厚约几公里的钠游离原子层,钠原子丰度是几个  $10^9$  原子/ $m^3$ ,因钠的 5896 Å 和 5891 Å 两条强黄色共振线在若丹明 6G 染料激光器增益极大值附近,这就有可能用高功率脉冲染料激光器的强光射向 92km 高空,使激光波长与钠的电子跃迁频率或分子振动频率一致,产生共振大气散射荧光,即人造光源。因染料激光器波长的可调谐性,共振线宽 1nm 可以在 5896 Å 附近激励钠原子和分子产生共振荧光,并进入 Shack-Hartmann 波面探测器,再通过自适应和主动光学测控系统,校正大气湍流、阵风和热影响等所产生的波面畸变,从而使成像质量达到衍射极限。

#### 4 自适应校正与波面检测

因大气湍流使星光经大气层到望远镜时,其成像的球面波已发生畸变,因而被测星在望远镜焦面上的像变得模糊,即光学成像光束能量分散,不能达到瑞利衍射极限。为了成像清晰和提高分辨率,必须测出波面畸变量,并用计算机和自动控制系统使变形反射镜的面形与已畸变的人射光波面相共轭,这样经过变形反射镜校正后的人射光又复原为原来的星体发射出的理想球面球,消除了大气湍流影响,使会聚后的焦面上像点符合瑞利衍射理论,从而使望远镜达到衍射极限分辨率。因大气湍流频率可高达 1000Hz,通常在 100Hz 左右,故波面畸变的实时测量与变形反射镜的控制,均应在大气湍流周期的时间内完成。因湍流是随机的,故波面畸变测量和变形反射镜的单元数要多,单元面积要小,这样实时校正的像才能达到理论极限分辨率。

##### 4.1 波面检测系统设计

为保证动态测量精度,波面检测系统设计应符合以下要求:

(1) 为探测有较大背景干扰的微弱星光目标,要求探测器灵敏度高,并能抑制各种噪声,减少目标光能损耗,如用人造光作波面畸变测量,要求探测器结构简单,光能损耗少。

(2) 波面畸变测量和数据处理速度要快,并高于大气湍流变化速度,计算机采样频率  $> 1\text{kHz}$  (即在毫角秒时间内完成)。

(3) 能测 20 等星的波面,要求参考光和人造光有稳定光强,避免照度变化使 CCD 误测。

(4) 因大气湍流是随机的,且波面畸变起伏较大和斜率变化大,而补偿系统希望能补偿到零相位,故要求波前动态测量范围大,并防止  $2\pi$  相位混淆(因波面误差可大于一个波长,且在零相位有较高测量精度)。

(5) 要求分辨率高,微透镜阵内每个单元要小,CCD 相机的分辨率要高,灵敏度高。

目前波面检测系统大多采用波面直接测量<sup>[6]</sup>,即测孔径内各点波面斜率,再经波面复原算法解算出波面误差。例如,用交变横向剪切干涉仪,使旋转的 Ronchi 光栅对波面剪切并进行信号调制,使信号的相位角表示波前斜率。这种方法的缺点是结构复杂,且容易产生  $2\pi$  相位混淆。因此我们决定采用结构紧凑、简单、固定,不需精确调整,测量结果可与光线追迹相比较的 Shack-Hartmann 法(见图 3)。从望远镜来的成像光束经准直镜转换为平行光,再由微透镜面阵分割为大小相等和彼此相连的采样单元阵,并将各自的子口径光束会聚在焦面上,由像增强型 ICCD 接收,并算出光斑能量中心  $\bar{x}_i$  和  $\bar{y}_i$ 。当波面畸变时,其焦点偏离参考光源的光轴  $x_i$  和  $y_i$ ,用 ICCD 测出畸变波与参考波间的焦点距  $\bar{x}_i - x_i, \bar{y}_i - y_i$ ,即可算出第  $i$  个微透镜内畸变波面相对于理想波面的平均倾斜量  $Q_{x_i} = \frac{\bar{x}_i - x_i}{f}, Q_{y_i} = \frac{\bar{y}_i - y_i}{f}$ ,式

中  $f$  为微透镜焦距。这个方案只要一个 ICCD 和微透镜面阵,就可探测任意相位波面(即采样单元内相位差大于  $2\pi$  时也可测量)倾斜量,光

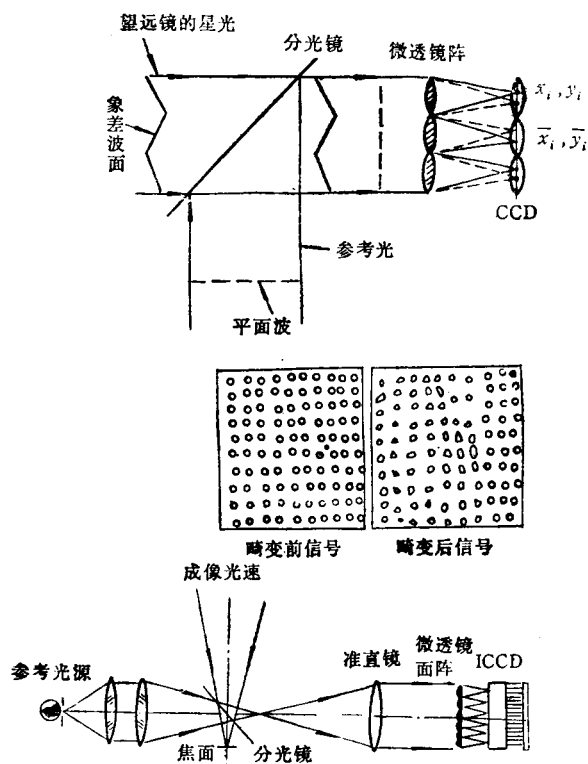


图3 动态 Shack-Hartmann 波面探测器原理

利用率为 100%，适用于白光，是价廉而又可靠的方案。

为此在 4.3m 光学红外望远镜第一耐焦点 (在图 2 水平轴处)，设 37 单元自适应变形镜和 Shack-Hartmann 波面探测器 (用共轭的 37 个微透镜和 ICCD 面阵)，微透镜直径为 1mm，焦距为 170mm，使在 2.5—15 $\mu\text{m}$  红外区作波面畸变校正，以提高像质，使星斑弥散像盘 < 1"，即可作接近衍射极限的高分辨率精细结构图像观测。因 20 等星只有极微弱的光度，故要求 ICCD 的光子利用率高，灵敏度高，分辨率高，动态范围大，读出噪声低，能用 64 通道平行输出，帧频 40kHz。因大气湍流变化频率高 (几十到几百赫兹)，故要求计算机采样频率大于 1kHz。因波面斜率测量后，还需计算波面误差才能用于反馈校正，故控制单元较多时，计算量很大，需用带宽 100Hz，计算速率为 1000 万次/s 乘加的高速大容量计算机，用并行数字化乘加器实现高的数据处理速率，使数据率大于 200Mbytes/s。为充分利用弱光目标的光能量，

用铟化镉 (InSb 用液氮冷却) 多路读出列阵，像增强器与 CCD 间耦合用锥形光纤，提高耦合效率，使结构紧凑和稳定，CCD 光谱响应范围为 0.4—0.9 $\mu\text{m}$ ，量子效率 > 10%，时钟频率为 20MHz。

#### 4.2 自适应校正系统设计

为校正已畸变的波面，必须根据测得的波面误差，用可改变波面相位的变形反射镜进行校正，即使变形反射面以波面误差相反的共轭值去补偿和校正相位，使其达  $\lambda/10$  误差以内。因大气湍流具有高频随机性，故校正单元数  $N$  要根据望远镜口径  $D$  和大气相干长度  $r_0$  决定，即  $N \approx \left(\frac{D}{r_0}\right)^2$  并且镜面要快速变化 (约 100

Hz)，使与大气湍流造成的畸变波面共轭，否则不能实时修正成像波面。为此利用压电陶瓷 (PZT) 的快速正反电压效应，使 PZT 两端加电压产生电极化，引起与电场强度成正比的变形，如图 4 所示。但 PZT 存在往返电压-变形曲线不重复 (即磁滞回线)，而存在残余变形，影响变形反射镜的精度；另外 PZT 与反射镜间粘结胶等有滞后，如变形反射镜在  $f = 100\text{Hz}$  循环电压  $\pm 750\text{V}$  作用下，变形与电压间关系是非线性的，并随电压增大而增大，故要求 PZT

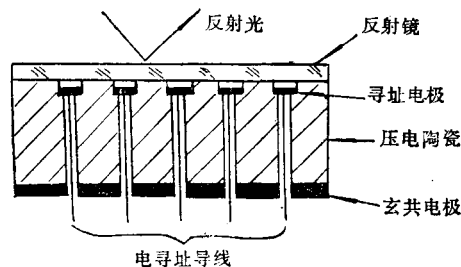


图4 整体式 PZT 变形镜

和胶的线性好且滞后少；另外变形反射镜的变形落后于所加电压相位，故要求控制系统能在低的谐振频率下工作。为防止每个 PZT 作用器间拟合残差引起交连误差，故反射镜厚度与极间距要适当；且薄反射镜与 PZT 间胶接强

度要高,防止在高频拉压循环负荷下产生脱胶损坏。

如选用美国 ITEK 公司整块表面反射镜的 37 单元变形镜,其口径  $\phi$  为 23cm,驱动器用 PZT 叠层,驱动器间距为 2.75cm,最大变形量为  $\pm 5\mu\text{m}$ ,灵敏度为  $0.005\mu\text{m}/\text{V}$ ,频宽从直流到 150Hz,最高循环电压  $\pm 1500\text{V}$ ,反射镜平度  $0.2\mu\text{m}$ ,可对 4.3m 光学红外望远镜作 2.5—15  $\mu\text{m}$  波段范围成像光束进行校正,使达到衍射极限分辨率。如美国国家天文台和天体物理中心,欧洲南半球天文台 COME-ON 计划中均取得自适应校正成功的经验,并在星体和太阳红外波段观测使用。

### 5 人造参考星系统设计

因脉冲染料激光器输出峰值功率高达 10 J,且可在很宽范围内 (570—616nm) 连续调谐,可循环冷却和自行修复损伤,没有显著损耗地把激光能量引导到 1nm 窄波段内,信噪比高,空间相干性和准直性好,高定向性和高强度对激活钠原子和分子的共振散射有重要作

用<sup>[5]</sup>。用闪光灯泵浦若丹明 6G 染料,其增益高,转换效率也高(50%),脉冲持续时间为几分之一微秒到几毫秒。闪光灯具有价廉,工艺简单,结构紧凑,元件少,操作使用方便等优点。因此我们设计了如图 5 所示的人造参考星系统,用乙醇溶剂,若丹明 6G 染料作激活介质,浓度为  $2.5 \times 10^{-3}\text{mol}/\text{l}$  的染料溶液装在长 80 mm 的  $\phi 10\text{mm}$  的石英管内,用不锈钢齿轮泵使其流动,其流速为 1m/s。因循环冷却快,故染料溶液混合均匀,并处于湍流状态,降低染料池中吸收泵浦光不均匀引起的热梯度,以防止损耗和三重态猝灭。选用高功率 (1MW) 短脉宽氙闪光灯,它具有快上升时间 (150ns) 和 0.3—1 $\mu\text{s}$  脉冲持续时间。采用 100Hz 重复率的两根直径氙灯,其长为 80mm,  $\phi 5\text{mm}$ ,装在双椭圆柱镀银聚光腔焦点上,灯内氙气压强为 1Pa。闪光灯与火花隙串联,可提高输出功率和缩短上升时间。加在灯上的 25kV 高压可保证等离子体迅速建立和提高峰值功率。用小电容可使上升时间短  $10^{-4}$ — $10^{-6}\text{s}$ 。为防止氙闪光灯紫外光裂解染料分子,用 0.75mol/l 硫酸铜水溶液冷却灯管。为防止三重态猝灭,应加 0.05%

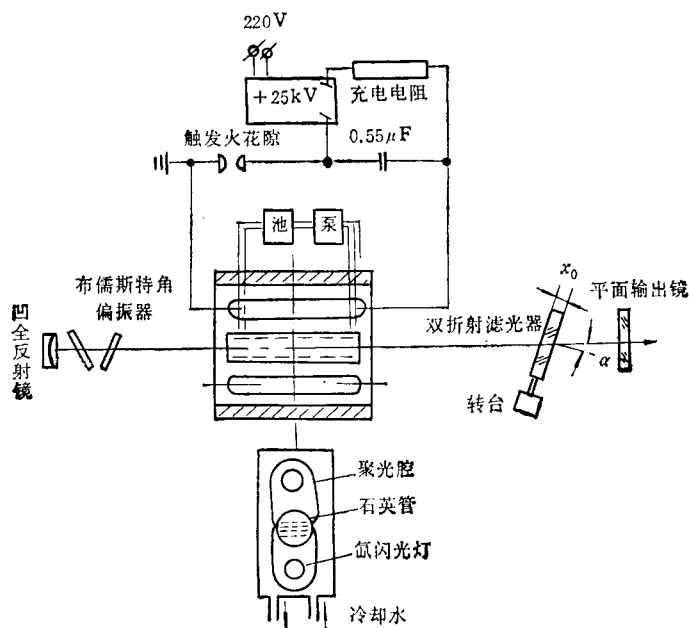


图 5 人造参考星激发光源

环辛四烯。为防寄生振荡使效率下降,应在染料池两端面有 $3-5^\circ$ 倾角。

因 92km 高空逸散层钠原子共振激发波长 $5896\text{\AA}$ 和 $5891\text{\AA}$ ,故用布儒斯特角偏振器和双折射滤光器的精密转台在 $570-616\text{nm}$ 范围调谐,调谐宽度 $1\text{nm}$ 。选用波长

$$\lambda = \frac{2x_0\Delta\mu}{K} \cos\alpha,$$

式中 $K$ 是级数,晶体厚 $x_0 = 0.36\text{mm}$ , $\Delta\mu$ 为双折射率。当光束发射角为 $\Delta\alpha$ 时,波长宽 $\Delta\lambda = -\lambda \operatorname{tg}\alpha \cdot \Delta\alpha$ 。当 $\alpha$ 角小时,则 $\Delta\alpha$ 也小( $\alpha = 35^\circ-50^\circ$ )。染料激光器谐振腔凹全反射镜 $R = 99\%$ ,曲率半径为 $2\text{m}$ ,平面输出镜反

射率 $R = 60\%$ ,镀宽带介质膜厚 $550-650\text{nm}$ ,输出 $1.2\text{J}$ 能量黄光射向 $92\text{km}$ 高空,光束分散度为 $0.2\text{m}$ (半径),每个脉冲发射光子数为 $10^6$ 个,脉冲持续时间为 $0.4\mu\text{s}$ ,重复率为 $100\text{Hz}$ 。

## 参 考 文 献

- [1] 马品仲,光学学报,14-4(1994),403.
- [2] 马品仲,大连理工大学学报,34-5(1994),527.
- [3] F. Merkle, Proc. VLT, ESO, No. 30 (1988), 639.
- [4] F. P. Schafer, Dye Lasers, Springer-Verlag, (1978).
- [5] Ma Pinzhong, Proc VLT, ESO, No. 42 (1992), 101.
- [6] 姜文汶,光学学报,8-5(1988),441.

## 磁光数据存贮技术进展<sup>1)</sup>

王 荣 李锡善 千福熹

(中国科学院上海光学精密机械研究所,上海 201800)

**摘要** 介绍了光学数据存贮的基本原理。磁光存贮是目前备受重视的可擦重写光存贮技术,它在计算机外存贮设备中有着广泛的应用前景。详细介绍了磁光存贮技术的进展及未来的发展趋势。

**关键词** 光盘,磁光存贮,Kerr 效应。

### 1 光学数据存贮技术

随着社会的进步和科技的发展,人类积累的知识量和信息量也在迅速地增长,需要存贮、处理和传递的信息量也越来越大,因此迫切需要更大容量的信息存贮设备和更高速度的信息处理设备。光存贮技术就是在这样的背景下发展起来的。

光存贮技术是从本世纪70年代前后才开始大量研究和开发的一种新型数据存贮技术。它用激光束将数字信息或模拟信息记录于光存贮介质中,并可以用激光束再现和读出这些信息。相对于磁存贮而言,光存贮具有存贮密度高、存贮寿命长、采用非接触式读写、信噪比或载噪比高、信息位价格低等优越的性能<sup>[1]</sup>,因此

近十几年来,世界各发达国家都投入了大量的人力、物力和财力来开发这一新技术。80年代,光盘介质与光盘驱动器的研究取得重要进展,光盘在声像设备与计算机外存贮设备中的应用得到了很大的发展,例如激光唱片、激光视盘目前已进入普通家庭。光盘产业现在已经形成了一支重要的工业产业。仅1993年世界光盘介质及光盘驱动器的产值就超过150亿美元,销售了6500万套以上的光盘驱动器和数千万片光盘介质<sup>[2]</sup>。近年来,由于光盘的容量、数据传输率、数据存取时间、信噪比等光盘的主要性能不断提高,因此在计算机外存贮设备的应用中得到了迅猛的发展。1988年,MO-500型

1) 中国科学院“八·五”重大项目。  
1994年8月18日收到初稿,1994年10月17日收到修改稿。