文章编号:1002-1582(2002)04-0334-03

# 恒星光干涉仪中主动镜的研究

王海涛,范伟军,蒋筱如,周必方

(中国科学院国家天文台南京天文光学技术研究所, 江苏南京 210042)

摘 要: 主动镜是恒星光干涉仪中的关键部件之一。介绍了主动镜在干涉仪主动镜系统中的作用和主动镜的结构。给出了用光电法设计的用来测试主动镜动程、分辨率和频率响应特性的两套系统。对所研制的主动镜的性能进行 了实测并给出了测试结果。实测结果表明,主动镜两个轴上的转角行程和分辨率均方根值完全达到了设计指标。

关键词:光干涉;主动镜;压电陶瓷堆线性位移传感器(PZT)

**中图分类号**: TH741.13 **文献标识码**: A

# Research on the active mirror system of the stellar interferometer

WANG Hai-tao, FAN Wei-jun, JIANG Xiao-ru, ZHOU Bi-fang

(Nanjing Institute of Astronomical Optics and Technology, Nanjing 210042, China)

Abstract : Active mirror is one of the key parts in the stellar interferometer. The active mirror 's function on the active mirror system in the stellar interferometer and its structure is introduced. Two sets of measurement system are given with optoelectronic method to measure the tip-tilt mirror 's movement range, resolution and frequency response character. The real measurement result for active mirror is given.

Key words: optical interferometer; tip-tilt mirror; PZT

1 引 言

恒星光干涉技术<sup>[1~4]</sup>是高分辨率天文观测研究最主要的 技术方法之一。等光程和干涉光束波前的平行是恒星光干涉仪 最终得到干涉条纹和测量结果的关键。其中,干涉光束的平行 性测控是依赖主动镜系统实现的,主动镜系统在恒星光干涉仪 中的位置如图1所示。

由两个孔径光束 相干的恒星光干涉仪 在每一臂上分别设置 有一个主动镜系统(图 1中的 T1, T2)。通过北定 两个主动镜系统相互 谐调地自动调节,保持 两个臂相干光束的波 前平行性达到 0.2 量级的要求,且由于大 气扰动引起光束波前



倾斜,不仅是随机量,而且频率比较高,一般 100Hz,这样对主动镜系统又提出了校正频率 100Hz的要求。

主动镜是主动镜系统中的执行机构。由于相干波前的平行 性精度要求和校正频率的要求会给主动镜的研制带来很大的困 难,所以本文着重描述了主动镜在主动镜系统中的作用、主动镜 的结构设计、主动镜的性能测试。实践证明,所研制的主动镜性 能是很好的,已达到或超过了恒星光干涉仪样机研制<sup>[5]</sup>所提出 的要求。

## 2 主动镜在主动镜系统中的作用

主动镜系统 (工作原理见图 2)包括主动镜、8098 控制器、 PZT 高压驱动电源、光束方向传感器。星光经主动镜后入射到 环形镜。星光透过环形镜的中央部分到达恒星光干涉仪光束组 合器 (图 1 中的 BS)进行干涉,环形镜外环部分及后面部分为光 束方向传感器,部分星光光线经环形镜外部反射并经透镜聚焦 到判别星光方向的四象限棱镜组后,再由光电倍增管采集光子 数,8098 控制器根据采集到的光子数归算出星光方向的误差, 然后发送相应的数据到 D/A 转换器,转换后的模拟信号控制高 压驱动电源,驱动 PZT 伸缩,主动镜镜面在 PZT 的作用下绕两 维转轴精细微转,从而精确地矫正星光方向。矫正星光方向的 范围是 ± 25,超过这个范围,通过系统的联锁作用,由 8098 控 制器控制定天镜驱动系统,实现较大范围内的矫正,即粗调。





<sup>\*</sup> 收稿日期: 2001-10-09; 收到修改稿日期: 2001-11-12

基金项目:中国科学院重点基金资助项目

作者简介:王海涛(1968-),江苏省溧阳市人,中国科学院国家天文台南京天文光学技术研究所博士研究生,主要从事光电检测、光干涉技术方面的研究。

图 2 虚框中的部分是主动系统的执行机构 ——主动镜(含 反射镜、镜室、转动支承和 PZT)、高压驱动源、D/A 转换器、 8098 控制器以及定天镜驱动系统。主动镜的结构设计必须考 虑摩擦和惯量的影响,除了镜面面形质量、镜室和转动支承设计 需考究外,还采用了频率高、位移分辨率高、便于计算机控制的 压电陶瓷线性位移器(PZT)作为执行元件,同时还必须对 PZT 的非线性进行校正。只有这样才能使作为执行机构的主动镜达 到高灵敏度(高分辨率)、高校正频率和转角范围较大的要求。

## 3 主动镜的设计

主动镜主要用于中低频大气扰动的改正。大气扰动的频率 约在 100Hz,主动镜的响应频率必须与之相当,甚至要尽量高于 它。另外,根据条纹可见度

$$V_{tilt} = \frac{2J_1 - D}{-D}$$

当要求  $V_{tilt} > 0.90$ , = 0.3 / D(D 为定天镜二维圆孔直径, D = 200mm)时, 0.17,即两束光的平行度应优于 0.2, 相应地主动镜的偏转分辨率应优于 0.1。所以应从这两个基本 要求出发来选择结构的设计方案。

在主动镜的设计中,重点考虑了对反射镜镜面加工的要求, 镜室及转动支承情况与主动镜中的有关机电结构的问题,以及 完成高频响应所需的 PZT 部件的研制。

## 3.1 主动镜镜面的加工质量

由于对主动镜镜面波面精度要求十分高,因此,在磨制时十 分认真,在质量上进行了严格把关,用上海光机所光学检测中心 的美国 ZYGO Mark 12 数字平面干涉仪进行了检测。检测结 果为:面形质量 PV 值达到了 0.049 (< /20), RMS 为 0.005 ( =632.8nm)。

3.2 主动镜的结构设 计 主动镜的结构设计 方案有多种,图 3(a)所示 为一般方案,图 3(b)所示 为德国 PI 公司生产的主 动镜轴系结构,两种方案 的利弊关系如表 1 所示。



图 3 (a) 一般方案;(b) PI 公司 生产的轴系结构。

 表1
 两种方案的比较

 一般方案
 PI公司轴系结构方案

 兼有轴承摩擦和材料内摩擦
 无外摩擦.只有材料变形时的内摩擦

 结构复杂、占空间大
 结构简单、紧凑

 频响低
 频响高

 寿命长
 寿命有限(受材料疲劳的制约)

为了获得高频响、高分辨率、长寿命的主动镜,本系统独创 地设计了一种新方案。该方案的基本思想是用球头轴将镜子和 镜室托住,并承重,再用一种特殊的、作用距离很短的扳簧(4 点)压紧镜框,使镜子稳定地与球头轴联接,并构成一个二维绕 性轴系,两只 PZT分别预压紧在镜框背面下方的一点和右侧的 一点。当 PZT 伸长时,镜框绕球头轴微转,同时与 PZT 对应的 簧片产生更大的压力,形成一个恢复力矩。这种方案的优点是 摩擦阻尼小、频响高、分辨率高、寿命长、不需要特殊的材料和加 工工艺、结构紧凑、简单可靠。图4是该结构方案的力系图。

 $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_3$ ,  $P_4$  代表板簧片产生的 压力,为  $P_1$ (或  $P_2$ ,  $P_3$ ,  $P_4$ ) 至球 心的距离, A 代表轴球头与  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_3$ ,  $P_4$  相抗衡时产生的压力, Q 代 表主动镜运动部件的重量, D 表示 运动部件重心至球心的距离,  $F_X$  和  $F_Y$ 分别代表 X 方向和 Y 方向 PZT 的压力, l 为 PZT 至球心的距离。 这一系列的作用力之间存在下列关



这一系列的作用力之间存在下列关 图4 主动镜结构力系图 系:

$$P_i = A + F_X + F_Y$$

$$P_1 + F_X l = P_2 + QD$$

$$P_3 + F_X l = P_4$$

3.3 PZT的设计

为使主动镜达到 100Hz 以上的高频响应,从而来补偿大气 扰动的影响,最常用的方法是采用 PZT 作反射镜的驱动器。本 系统所采用的 PZT 以及为它配套的高压电源,根据作者的技术 要求,是委托南京理工大学电光学院研制的,测得的 PZT 性能 参数见表 2,并对之进行了线性校正。但有关 PZT 的非线性校 正,结合本系统以及其它系统的应用研究,本文作者和其他合作 者提出了分段非线性校正的新方法<sup>[6]</sup>。

表 2 PZT 性能参数	
--------------	--

试件号	最大伸长/µm	非线性/ %			
1	5.51	4.5			
2	5.63	4.3			

## 4 主动镜的性能测试

主动镜在使用前须对它的性能指标进行检测,查看其是否 符合设计要求。检测参数包括主动镜的动程、分辨率和响应频 率。

### 4.1 主动镜的动程、分辨率的检测

主动镜动程、分辨率的检测系统如图 5 所示。



#### 图 5 主动镜动程、分辨率的检测系统示意图

在平行光管出射口放置一个直径为 50µm 的小圆孔,由小 灯发出的光经过平行光管平行地入射到主动镜上,经透镜 L 聚 焦和反射镜 M 的反射,在 CCD 相机上成像。PC 机向 8098 前端 机发出命令,一步一步地控制 PZT,使主动镜镜面转动,全程共 512 步。PZT 高压驱动源的电压变化范围为 30~350V,主动镜 每偏转一步,CCD 采集一帧光源的像(一个圆斑)。计算机归算 出像的重心位置。由计算机发出指令让 PZT 每作一次动作便 测量一次像斑重心,从而得到主动镜的实测值。其性能见表 2。

PZT 安装在距主动镜中心 40mm 处,理论上主动镜受控的 偏转范围见表 3。图中成像镜的焦距为 2400mm,CCD 成像面 积为 7.96 ×6.45mm<sup>2</sup>,对应的像元为 795 ×596,每个像元的大 小为 0.010 ×0.0108mm<sup>2</sup>,对应入射到 CCD 光束方向偏转角水 平方向为 0.8594,高度方向为 0.9428。

表 3 主动镜的 PZT 受控转角的理论值

试件号	偏转角范围/()	偏转角分辨率/()
1	28.4~56.8	0.11
2	29.03~28.1	0.11

主动镜按上述方法实测的结果见表 4。实测结果表明,主 动镜两个轴上的转角行程和分辨率均方根值完全达到了设计指 标.

表4 主动镜的实测结果

PZT 器件 试件号	主动镜行程 /()	平均转角(分辨率) /()	分辨率 均方根值
1	57.2	0.112	0.117
2	50.4	0.098	0.117

## 4.2 主动镜响应频率的检测

响应频率是主动镜性能的另一个重要指标,要求主动镜的 响应频率应高于 100Hz。对于 PZT 来说,大于 100Hz 的响应频 率是完全可以达到的。考虑到机械结构摩擦阻尼和转动惯量方 面的影响,有必要作一个综合性检测。为此设计了一套光电二 极管检测系统,如图6所示。



## 图 6 主动镜响应频率检测系统

激光为 3mW 的 He-Ne 激光器。激光经反射镜 M 和主动 镜后,经透镜 L 将细小的激光斑点落在光电二极管的接收头 上,所产生的电信号作为示波器的一路输入。由 PC 机控制的 8098 前端机产生一组不同频率的信号经 DAC、高压驱动源连接 PZT,使主动镜产生动作。同时该路 DAC 出来的电信号作为示 波器的另一路输入。观测输入波形的形状以及时间延迟,就可 以得出主动镜的频率响应情况。

对系统的响应频率的测试通常用两种信号输入:一种是连 续信号,另一种是冲击脉冲信号。冲击脉冲测量法是一次对全 频谱进行测量,分配到各频率点的能量就很小,但它的优点是快

(上接第 333 页)



## 4 结 论

图 4 相位变化与滚转角的关系

本测量系统由于采用了合理的结构设计,在文献[4]的基础 上又将放大率提高了4倍,所以进一步提高了滚转角的测量分 辨率,并利用新的系统设计了滚转角干涉测量仪,经检测,比例 系数超过 120。同时本测量系统还具有以下优点: (1)系统光路 捷。以不同频率的连续输入信号测频 率特性的优点是准确度高,这是因为在 每一个频率点上加的激励能量很大的 缘故。对于本系统来说,只要求主动镜 能够工作在 100Hz 以上。故采用了用 不同频率的连续信号方法进行了测试。



在检测频率响应实验中,分别采用 了频率为 65 Hz, 125 Hz, 250 Hz 的三角

图 7 主动镜频率 响应实测图

波检测主动镜装置的频响,在不考虑视觉误差的情况下,从示波 器上可以看出二极管接收的信号滞后于发射信号 1ms.也就是 说,主动镜的响应频率可达1000Hz。图7是用250Hz的三角波 检测的结果照片。图中,上面是由计算机和 8098 前端机发出的 250Hz的三角波信号(测试系统的输入信号),下面是光电二极 管电路所接收到的系统输出响应波形(测试系统的输出信号)信 号。从这个响应频率的输出信号几乎与输入信号相吻合的结果 说明,主动镜能够响应高达 250Hz 的输入频率信号,远大干 100Hz的系统设计要求。

## 5 结 论

星光方向矫正系统是一套非常复杂的系统。主动镜的性能 好坏不仅直接影响两束干涉光的平行性调整,而且也是影响干 涉条纹可见度高低的主要因素之一。从系统的设计和实验结果 来看 .均已达到" 恒星光干涉仪样机与关键技术研究 "项目设计 指标的要求。该项目通过了由中国科学院组织的由叶淑华和朱 能鸿院士为首的验收组的验收,为以后的工作打下了坚实的基 础。

致谢:南京理工大学电光学院老师们为笔者研制了 PZT 部 件及其驱动电源,在此向他们表示感谢。

#### 参考文献:

- [1] 赵培谦,周必方,Lena P,等.望远镜干涉阵中光程调制的研究[J].
   光学学报,1994,14(7):748-751.
- [2] Zhao Peiqian, Zhou Bifang. Design consideration of Chinese long base-line stellar interferometer[J]. SPIE, 1990,1334:129 38.
  [3] 赵培谦,周必方. 自适应光学在天文学中的应用[J]. 天文学进展,
- 1991,9(2):151-160.
- [4] Shao M. The mark stellar interferometer [J]. A &A, 1988, 198: 57 - 367
- 537 507. [5] 周必方,毛伟军,李再雄,等.恒星光干涉仪光学系统[J].天文仪器 与技术,1998,34 49. [6] 罗秋凤,王海涛,崔向群,等.红外移相干涉仪中移相器的非线性校
- 正[J]. 仪器仪表学报,2001,22(增刊):53-54.

简单。由于光路折回,接收器和光源在同一侧,使结构更为紧 凑,更容易仪器化,同时系统的适应性也更强,可以在多种条件 下工作。作为角度传感器的 1/2 波片,可以放在远离激光源的 地方,且无须启动和回转力矩。整个系统没有运动部件,避免了 死程和摩擦带来的误差。(2)系统对传感器的平动误差具有自 适应性,对加速度和重力不敏感。光路的简化使得引起漂移的 因素大大减小,系统工作稳定,重复性好。

## 参考文献:

- [1] Coronkevich P, Tarasov G G, Hano B A. Roll angle measurement with dual-frequency laser[J]. Automeasurement, 1974, (1): 68-71
- [2] 殷纯永,谢广平,成相印,等. 滚转角测量方法的研究[J]. 清华大学 学报,1996,10:86-91.
- [3] Wei Gao, Sizhou Zhang, Satoshi Kiyono. Measurement and control of rolling of a precision moving table[A]. Proceedings of the IEEE International Conference on Intelligent Processing Systems [C]. 1997. 28-31.70 - 74
- [4] Hong Jiang, Chunyong Yin. Sensitivity enhanced roll angle measurement[J]. Optical Engineering, 2000, 39(2): 516-519.

0