

恒星光干涉仪倾斜镜系统的研制

孙后环^{*1}, 周必方², 蒋筱如¹

(1. 南京建筑工程学院城建系, 江苏 南京 210009;
2. 中国科学院南京天文仪器研制中心, 江苏 南京 210042)

摘要:介绍了倾斜镜在恒星光干涉仪中的作用及倾斜镜系统的组成和工作原理,对倾斜镜系统中的 AT89C51 控制单元、高压驱动电源、压电陶瓷微位移装置 (PZT) 以及倾斜镜的机械结构设计进行了详细的讨论,并给出了倾斜镜系统闭环实验调试平台。

关键词:倾斜镜系统;压电陶瓷微位移装置;结构设计

中图分类号: TP391.41

文献标识码: B

文章编号: 1006-3757(2000)03-0148-06

恒星光干涉仪在进行天文观测时,由于受到随机高频的大气扰动的影响,使探测的光波波前发生倾斜,从而使干涉仪两相干光束不再平行,结果导致获得的干涉条纹可见度大大降低,尤其是当望远镜观测目标的曝光时间长于图像抖动时间尺度时上述影响就更大。随着电子技术的飞速发展,采用 CCD 相关跟踪技术的自适应调节系统也得到快速发展并开始应用于天文望远镜。根据恒星光干涉仪研制总体技术性能指标要求,干涉仪中两相干光束方向不平行性误差应小于 $0.1''$ 。要保持如此高的平行度,

就必须有高精度的星光方向探测系统和星光方向矫正系统。倾斜镜系统作为星光矫正器成为恒星光干涉仪中的一个重要部件,它不仅能矫正由于频率在 100 Hz 以内的大气扰动所带来的两相干光束的不平行性,而且能矫正周围环境产生的振动以及仪器本身在运转过程中的机械误差、振动、热膨胀等原因引起的星光方向的微小偏转。

1 倾斜镜系统的组成和工作原理

图 1 为恒星光干涉仪波前校正系统框图。来自

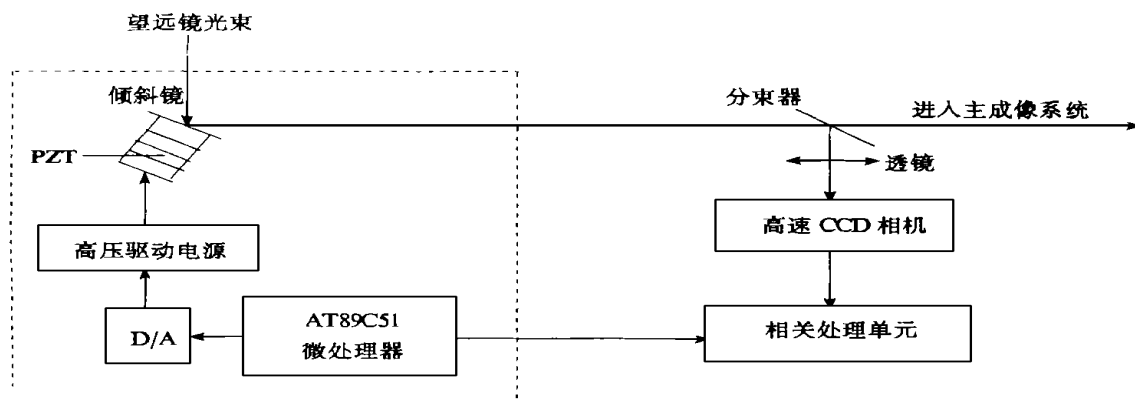


图 1 恒星光干涉仪波前校正系统

Fig. 1 Wavefront correction system of stellar interferometer

* 通讯联系人。

望远镜的光束经倾斜镜反射后通过分束器,一路进主成像系统产生干涉条纹,另一路经过会聚透镜由位于透镜焦面上的高速 CCD 相机采集,将数字化的图像信号送相关处理单元,计算出实测图像相对于参考图像的偏移量^[1]. 计算结果经串行口送给 AT89C51 微处理器,进一步计算与修正后送十位 D/A 变换为电压控制信号,该控制信号经高压驱动电源放大后,驱动压电陶瓷微位移装置(PZT)伸缩,从而驱动倾斜镜在 X、Z 方向的微小位移,矫正波前

误差,保证两相干光束的平行性.

图 1 中虚线框内部分为倾斜镜系统,它主要由 AT89C51 控制单元、高压驱动电源、倾斜镜及 PZT 四部分组成,下面详细介绍各部分的原理及设计.

1. 1 AT89C51 控制单元

AT89C51 控制单元实际上是一个单片机应用系统,它由 AT89C51 单片机、74LS373 锁存器、8255 和 D/A 转换芯片组成,如图 2.

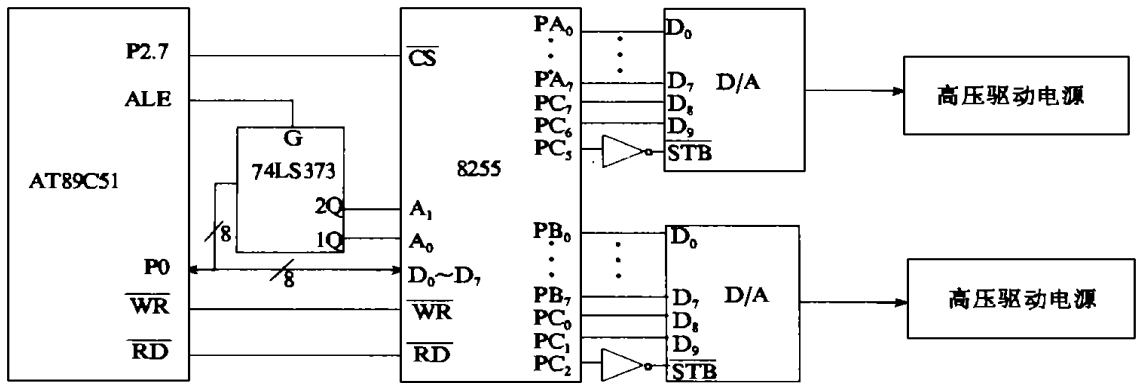


图 2 8255 与 AT89C51 单片机及 D/A 转换器的连接

Fig. 2 Connections of 8255, microcontroller AT89C51 and transformer D/A

图 2 为 AT89C51 控制单元中 8255 与 AT89C51 单片机及 D/A 转换芯片的连接线路. 从图中可知,8255 各口地址为 7FFC ~ 7FFF,其中 A 口为 7FFC, B 口为 7FFD, C 口为 7FFE,控制口为 7FFF. 8255 的输出有两组,一组为 A 口和 C 口的 PC₆ 和 PC₇,这一组 8255 与 D/A 转换器的握手信号为 PC₅,该组的输出数码经 D/A 转换后与高压驱动电源相连用来驱动倾斜镜 X 轴方向的转动;另一组为 B 口和 C 口的 PC₀ 和 PC₁,这一组 8255 与 D/A 的握手信号为 PC₂,该组的输出数码经 D/A 转换后与高压驱动电源相连用来驱动倾斜镜 Z 轴方向的转动.

为了实现 8255 向 D/A 转换器传送数据, A 口、B 口和 C 口均初始化为输出,若工作方式选为方式 0,则控制寄存器的控制字应为 10 000 000B,即 80H. 为启动 D/A 转换器,实现倾斜镜绕 X 轴方向的转动,应从 PC₅ 输出一正脉冲. 因此在初始化时应将 PC₅ 置为 0,当要启动 D/A 变换器时,再将 PC₅ 置为 1;以同样原理可启动另一组 D/A 转换器,实

现倾斜镜绕 Z 轴方向的转动.

1. 2 高压驱动电源

由控制单元输出的电压信号为 0 ~ 10V,必须把它放大,才能驱动 PZT 伸缩,根据倾斜镜系统的使用要求,应把它放大到 30 ~ 350 V. 倾斜镜驱动电源采用直流放大电路,其特点是动态范围大,响应速度快,信号失真度小.

图 3 为高压驱动电源原理框图,在电路中采用了反馈电路,及时反馈输出电压以实现闭环控制. 直流电压放大电路由运算放大器(如 LF357)和大功率管构成,由控制器提供的 0 ~ 10 V 控制电压信号,经放大电路后变成 30 ~ 350 V 高压.

在电路中采用过载保护电路,以保证工作的可靠性. 输出电路由复合管接成发射集输出形式,具有电流放大和缓冲作用,提高了电路的驱动能力,同时也隔断了后级电路对前级电路的影响. 放电回路是由运算放大器构成的比较器,当输出电路电压下降时使三极管导通, PZT 上的电压迅速通过放电回路卸压,以使 PZT 迅速复位.

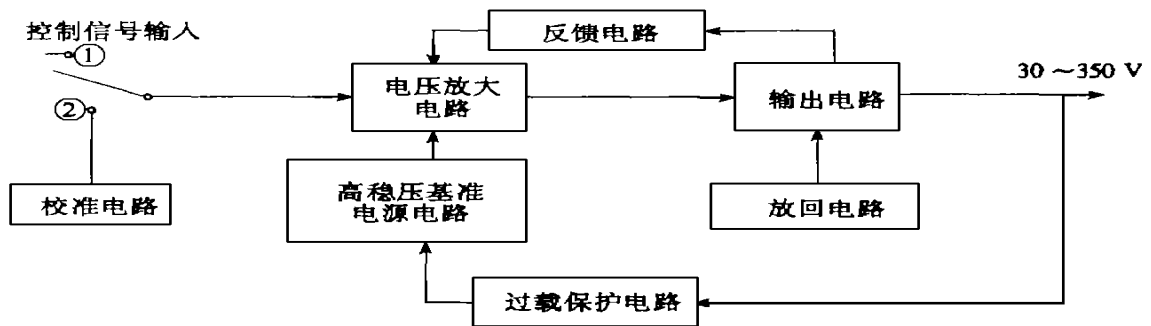


图3 高压驱动电源原理框图

Fig. 3 Block diagram of the high voltage driver

1.3 压电陶瓷微位移装置(PZT)

倾斜镜系统的执行机构应充分考虑大气扰动的影响,而大气扰动的频率可达 $100 \sim 1\,000\text{ Hz}$,如此高的频率,如用传统望远镜的伺服机构,由于其传动机构响应时间较长而无法胜任。而压电陶瓷堆(PZT)的响应频率最高可达 $1\,000\text{ Hz}$ 以上(其机械结构惯量和摩擦力矩均要尽可能减小),与大气扰动频率相匹配^[2],因此,我们选择 PZT 作伺服执行机构。

1.3.1 压电陶瓷的驱动机理及陶瓷片的检测

当压电陶瓷置于外电场中时,由于电场力作用引起压电体内部的正负电荷中心产生相对位移,该位移导致压电体形变,使压电体呈现出伸缩现象。对于沿极化方向施加电场且沿电场方向伸缩形变的压电体,其位移方程式为:

$$s = f\sigma + dV \quad (1)$$

式中: s —压电陶瓷的伸缩量

σ —应力

f —压电陶瓷弹性柔顺系数

d —压电应变系数

V —施加于压电陶瓷上的电压

为了获得高性能的压电陶瓷片,必须有陶瓷片的测试系统,非接触式电容传感器和接触式干涉仪均可胜任这一工作。现以非接触式电容传感器为例进行分析。测试时,将被测陶瓷片上下表面镀银浆作为电极,并将其置于特制的尼龙卡具上,其上表面电极接地,下表面电极接激励电压。由于其下表面相对卡具静止不动,因而上表面随激励电压的变化而上下移动。将电容传感器瞄准于样片上,则电容探头极板与被测样片上表面间形成电容器(如图4),当样片在激励电压作用下使上表面发生位移时,样片与探头间形成的电容器的电容值(设为 C_x)将发生变化,将这一电容值可变的电容器接于运算放大器的反馈回路中,如图5,则存在下面的关系式:

$$V_0 = -V_s \cdot \frac{C_s}{C_x} \quad (2)$$

上式中: V_0 —电路输出电压值

V_s —幅值稳定的交流信号电压

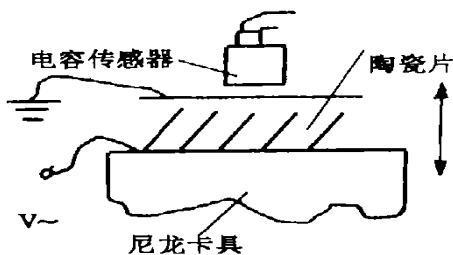


图4 陶瓷片测试简图

Fig. 4 The piezoelectric test diagram

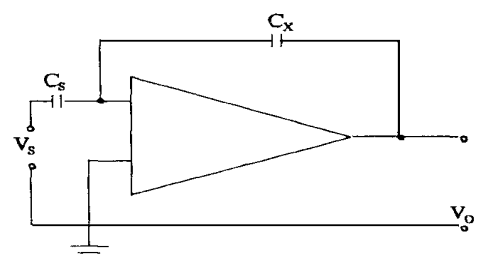


图5 陶瓷片测试电路简图

Fig. 5 The piezoelectric test circuit

将 $C_x = \epsilon \frac{S}{\delta}$ 代入(2)式,得:

$$V_0 = - \frac{1}{\epsilon S} V_s \cdot C_s \cdot \delta \quad (3)$$

上式中: ϵ —介电系数,常数

S —探头与样片间相互覆盖的面积,常数

C_s —参考电容器电容值

δ —在激励电压作用下,探头与样片间的间隙值

其中, $\delta = h - s$, h 为没有施加激励电压时探头与样片间的距离, s 为在激励电压作用下陶瓷片微小位移,将 $\delta = h - s$ 代入(3)式得:

$$V_0 = \frac{V_s C_s}{\epsilon S} s - \frac{V_s C_s}{\epsilon S} h = Ks - Kh \quad (4)$$

上式中: $K = \frac{V_s C_s}{\epsilon S}$

由(4)式可看出,输出电压 V_0 与被测样片位移 s 呈线性关系。

1.3.2 压电陶瓷堆的制作及性能指标 为了获得大位移、高灵敏度的 PZT,通常将多片压电陶瓷片粘贴在一起,做成叠层式压电陶瓷堆(图 6),粘

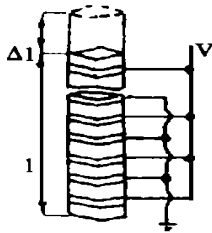


图 6 叠层式压电陶瓷堆

Fig. 6 The piezoelectric of laminated construction

贴时采用机械串联电路并联形式,在极化方向施加电场,则 PZT 的位移方程为:

$$\Delta l = ns = n(f\sigma + dV) \quad (5)$$

上式中: n 为压电陶瓷片数, PZT 的主要性能指标如下:

(1) PZT 的最大伸长量

根据恒星光干涉仪的设计要求,倾斜镜矫正星光方向的总动程需达 50 " (当超过该范围时,则由微机系统发出指令驱动定天镜转动以执行矫正),因此 PZT 的伸长量可定为 6 μm (设 PZT 装在距镜中心 40 mm 处)。

(2) PZT 的分辨率

恒星光干涉仪中,一般要求两相干光束的平行性不低于 0. "2。若将设计指标定为 0. "1,则倾斜镜的转角分辨灵敏度为 0. "05,换算成 PZT 的伸缩分辨率为 0.01 μm 。

1.4 倾斜镜的机械结构设计

倾斜镜的结构设计方案有多种,图 7(a)为一般常用方案,该方案寿命长但结构复杂且占空比大,而且频率响应低还兼有轴承摩擦和材料内摩擦。图 7(b)为德国 PI 公司生产的倾斜镜轴系结构,该方案结构简单、紧凑、频响高,无外摩擦,仅有材料变形时的内摩擦,但它存在不合理的受力环节,该环节受高频应力应变作用容易产生疲劳破坏,寿命低,而且由于其回转中心与镜子中心存在误差而在矫正方向时会引起光程差。

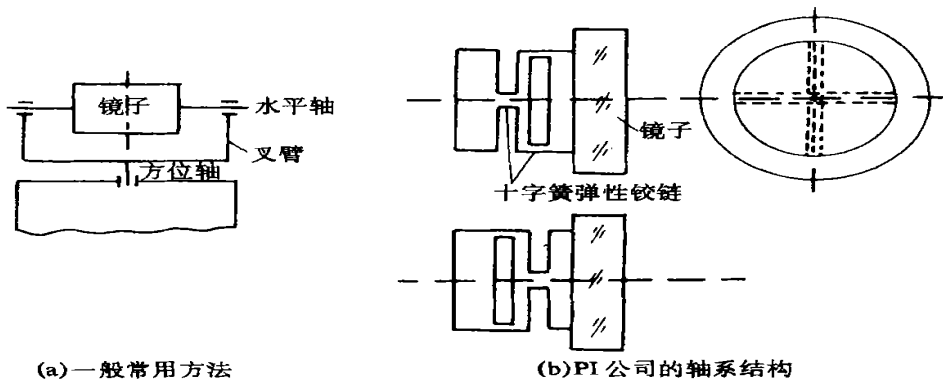


图 7 倾斜镜结构设计方案

Fig. 7 The plan of the structure design of tip/tilt mirror

为了获得高频率响应、高分辨率、长寿命的倾斜镜,我们设计了一种新的方案,其基本思路是用球头轴将镜室托住并承受其重量,再用一种特殊的结构将作用距离很短的板簧在四点压紧镜框,使镜子稳定地与球头轴连起来构成二维扰性轴系,两只 PZT 分别预压紧镜框背面的下方一点和右侧一点(设分别为 PZT1 和 PZT2)。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。这种结构的优点是摩擦阻尼小、频响高、分辨率高、装调方便、寿命长,无特殊材料和工艺要求,结构简单、紧凑、工作可靠。图 8 为该结

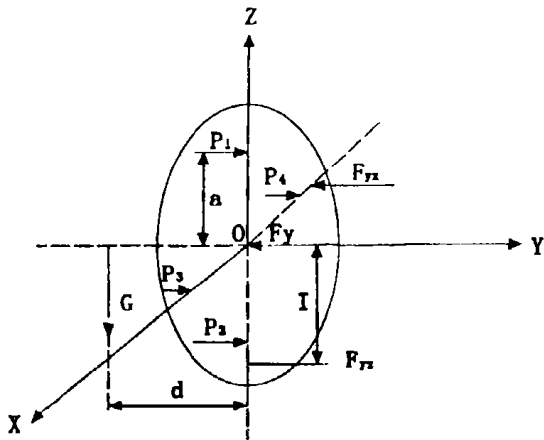


图 8 倾斜镜结构力系图

Fig. 8 Composite fore of tip-tilt mirror system structure

构方案的力系图。图中, P_1 、 P_2 、 P_3 、 P_4 为板簧片产生的压力, a 为球心到 P_1 、 P_2 、 P_3 及 P_4 各力作用线的距离, F_y 为轴向球头与 P_1 、 P_2 、 P_3 和 P_4 相平衡的压力, G 表示倾斜镜运动部分的重量, d 为运动部件重心至球心的距离, F_{yz} 为 PZT1 产生的力, 该力使镜框绕水平轴 (X 轴) 微转, F_{yx} 为 PZT2 产生的力, 该力使镜框绕垂直轴 (Z 轴) 微转, I 为 PZT 到对应球轴的距离, 上述系列作用力有如下平衡关系:

$$\begin{cases} P_1 + P_2 + P_3 + P_4 = F_y + F_{yz} + F_{yx} \\ P_1 \cdot a + F_{yz} \cdot l = P_2 \cdot a + Gd \\ P_3 \cdot a + F_{yx} \cdot l = P_4 \cdot a \end{cases} \quad (6)$$

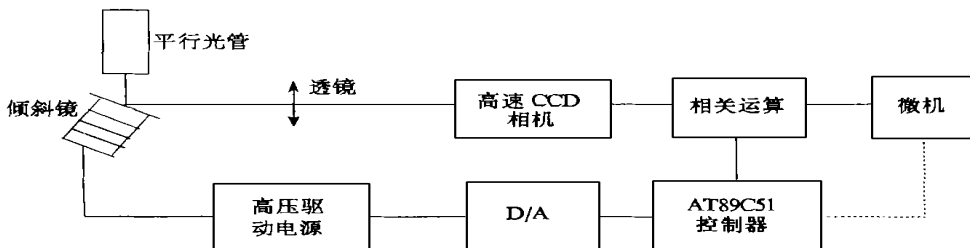


图 9 倾斜镜系统闭环实验调试平台

Fig. 9 The feedback test plan of tip-tilt mirror system

2 倾斜镜系统闭环实验调试平台

图 9 为倾斜镜系统闭环实验调试平台,主要用于对倾斜镜响应频率的测试。调试时,首先由微机启动 AT89C51 微处理器,产生一定频率的三角波,经 10 bit D/A 转换器和高压驱动电源后驱动倾斜镜高频转动。经倾斜镜调制的平行光会聚于透镜焦面上的高速 CCD 相机上,经 CCD 采集到的数字图像与直接从 AT89C51 控制器传送过来的图像由相关处理单元进行互相关运算,相关函数的极值点应是两幅图像匹配最好的点,极值点相对于零延迟点(两幅图像完全重合处)的位移差就指出了两幅图像的相对时间滞后量,该滞后量的倒数即为倾斜镜系统的响应频率。

由于直接作相关分析的计算量很大,因此实际检测中多运用相关定理采用快速傅立叶算法,具体处理过程如下:

令 $f(m, n)$ 为 CCD 的实测图像, $g(m, n)$ 为 AT89C51 直接输出的数字图像(参考图像), $r(\Delta x, \Delta y)$ 为 $f(m, n)$ 与 $g(m, n)$ 的互相关函数,则

$$\begin{aligned} r(\Delta X, \Delta Y) &= f(m, n) * g(m, n) \\ &= IFFT[FFT(f) \cdot FFT^*(g)] \quad (7) \end{aligned}$$

上式中:

$FFT(f)$ 表示对 $f(m, n)$ 作快速傅立叶变换

$FFT^*(g)$ 表示 $g(m, n)$ 快速傅立叶变换 $FFT(g)$ 的复共轭

$IFFT$ 表示作傅立叶反变换

严格地说,由(7)式计算的相关函数 $r(\Delta x, \Delta y)$ 是一离散函数,不存在极值点,但存在最大值点,为提高运算精度,可对最大值周围 $N \times N$ 的子面阵作抛物面拟合^[1],以求取精确的极值点坐标。

3 应用与成果

以上讨论的倾斜镜系统已在中国科学院“八·五”重点项目“光学天文学中高空间分辨率成像技术和应用研究课题”中得到应用。将它用于恒星光干涉仪中两束光方向平行性探测与精确控制,使两束光平行性约达 $0.1''$,并获得了500 Å带宽人造白光光源的干涉条纹,具有很好的条纹可见度。

参考文献:

- [1] 孙后环. 相关分析及其在波前校正中的应用[J]. 南京建筑工程学院学报, 2000, (1) 42~47.
- [2] Close L M, McCarthy DW. High-resolution imaging with a tip-tilt cassegrain secondary[J]. Astronomical Society of the Pacific, 1994, (106) 77~86.

Research on Tip-Tilt Mirror System Used in Stellar Interferometer

SUN Hou-huan¹, ZHOU Bi-fang², JIANG Xiao-ru²

(1. Department of Urban Construction Engineering, Nanjing Architectural and Civil Engineering Institute, Nanjing 210009, China; 2. Nanjing Astronomical Instruments Research Center, the Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210042, China)

Abstract: The function in stellar interferometer, the constitution and principle of tip-tilt mirror system are described at first. Furthermore, the AT89C51 control unit, the high voltage driver, the piezoelectric transducer of displacement PZT and the structure design of tip-tilt mirror system are thoroughly discussed. At last, the feedback test method of tip-tilt mirror system is given.

Key words: tip-tilt mirror system; piezoelectric transducer of displacement; the structure design

Classifying number: TP391.41