

文章编号:1004-4213(2010)06-1111-5

恒星光干涉仪主动镜偏转角的检测^{*}

陆艺, 范伟军, 孔明

(中国计量学院 计量测试工程学院, 杭州 310018)

摘要:采用激光干涉检测的方法, 综合应用计算机控制、数字图像处理等技术对高精密仪器主动镜的偏转角进行了检测. 设计了主动镜的光干涉 CCD 数字图像检测系统, 推导出了干涉条纹与主动镜偏转角之间的对应数学关系式, 对条纹图像进行了噪音分析和相应的预处理, 在干涉条纹细化的基础上对每条干涉条纹采用最小二乘法进行直线拟合, 得到条纹间的间距以及条纹的方向角, 最终检测出主动镜 X 轴方向的偏转分辨率为 $0''.113$, 最大偏转角为 $56''.872$, Y 轴方向的偏转分辨率为 $0''.112$, 最大偏转角为 $49''.835$, 完成了主动镜偏转角的检测.

关键词:主动镜; 偏转角; 干涉条纹

中图分类号: TH741.13

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20103906.1111

0 引言

恒星光干涉技术是高分辨率天文观测研究最主要的技术方法之一. 天文观测时由于大气的高频随机扰动, 使两干涉光束相干时不再平行, 这给条纹可视度造成损失, 使恒星角距的测量准确度受到影响^[1]. 为了得到高准确度测量结果, 要求两相干光束的平行性好于 $0''.2$. 干涉光束高准确度平行性的保持依赖主动镜镜面在 X 轴、Y 轴方向的偏转来实现. 作为保持光束平行的主要执行器件, 主动镜的偏转分辨率要好于 $0''.1$, 方能保证恒星角距的测量准确度. 本文采用等厚干涉原理, 利用激光干涉测量和数字图像处理技术实现主动镜偏转角的高准确度测量.

1 主动镜转角检测方案

1.1 主动镜结构

为了实现高频响、高分辨率, 主动镜镜面的偏转采用压电陶瓷 (PZT) 作为驱动器. 主动镜镜子和镜室由球头轴拖住和承重, 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连接, 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. 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^[2]. 主动镜结构

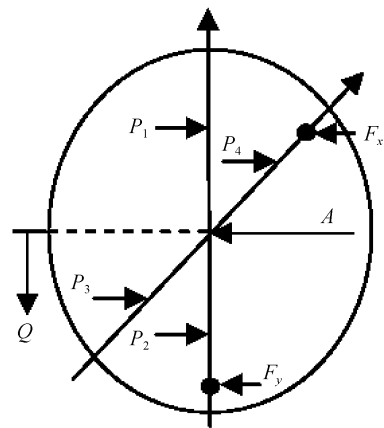


图 1 主动镜结构力系图

Fig. 1 The static chart of the active mirror structure

力系图如图 1, P_1 、 P_2 、 P_3 、 P_4 代表板簧片产生的压力, A 代表轴向球头与 P_1 、 P_2 、 P_3 、 P_4 相抗衡时产生的压力, F_x 和 F_y 分别代表 X 方向、Y 方向 PZT 对镜框产生的压力, Q 代表主动镜运动部件的重量.

1.2 主动镜干涉检测系统

主动镜的偏转分辨率要求高达 $0''.1$, 在测试系统中采用激光干涉法进行检测, 伺服测试系统如图 2, 由微机发出指令给 8098 控制器, 8098 控制器输出信号经 D/A 转换器变成低压信号, 低压信号经高压

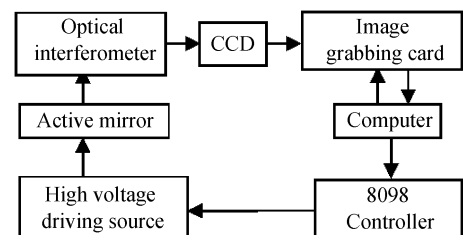


图 2 主动镜检测系统框图

Fig. 2 The measure system of the active mirror

^{*} 国家自然科学基金 (60908039/F0513) 资助

Tel: 0571-86914563

Email: luyi9798@cjlu.edu.cn

收稿日期: 2009-11-11

修回日期: 2009-12-05

驱动电源放大后驱动 PZT 伸缩,使主动镜偏转, CCD采集的干涉条纹疏密、方向都发生变化,由计算机软件对干涉条纹进行处理,归算出倾斜镜的偏转角并存入硬盘完成检测。

干涉检测系统如图 3, 激光源①发出的光经扩束器(包括聚光镜②、光阑③)及透镜④后变成一束平行光射到分光板⑤上分成两束光,一束经平面反射镜⑧反射后原路返回,另一束经主动镜⑦反射后原路返回,在分光板上汇合形成相干光束,相干光经成像透镜⑥、衰减片⑨后汇聚于 CCD 靶面上,经图像采集在监视器上便可看到干涉条纹图。

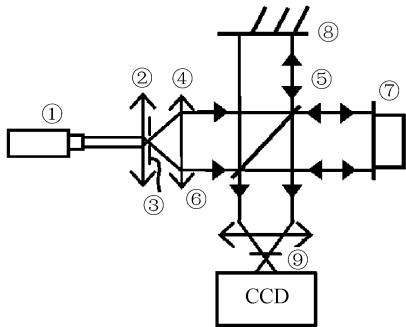


图 3 干涉检测系统光路图

Fig. 3 The optical system for measuring the active mirror

2 偏转角的计算

从上文可知,干涉检测系统是利用等厚干涉原理来检测的.当干涉系统形成干涉条纹时,主动镜与平面参考镜的相互位置可简化成如图 4,其中⑧为平面反射镜,⑦为主动镜, Φ 为两镜面的夹角.当经过主动镜⑦与平面反射镜⑧反射的光束到达成像透镜完全重合时,则主动镜与平面反射镜相互位置可简化成如图 5,令主动镜与平面反射镜这种相互位置的状态为原始状态.令主动镜⑦绕着 X 轴转动方向为主动镜的 Y 轴转动方向,主动镜绕着 Y 轴转动方向为主动镜的 X 轴转动方向.由于在检测主动镜的性能时,主动镜与参考平面镜的相互位置初始状态很难达到如图 5 所示的原始状态,在性能检测时具体表现为主动镜被驱动后干涉条纹疏密及方向都发生变化,这是因为初始状态时主动镜与平面镜不平行,主动镜与平面镜所在平面的交线与 X 轴或 Y 轴有一个交角,如图 6,在此初始状态下,主动镜平面与参考镜平面之间有一初始夹角 Φ ,它决定了在初始状态下干涉条纹的间距;主动镜与平面参考镜的交线与 X 轴有一个初始夹角 θ ,它决定了干涉条纹的方向.可以假设主动镜与平面参考镜所处的初始状态是由原始状态下主动镜绕 X 轴转动 α ,绕 Y 轴转动 β 而形成的.一般情况下,不得不考虑绕 X 轴与绕 Y 轴转动的先后问题,因为先绕 X 轴与先绕

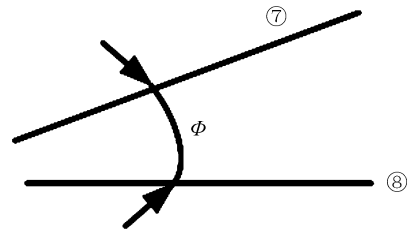


图 4 主动镜与参考镜相互位置示意图

Fig. 4 The sketch of the active mirror and the plane mirror

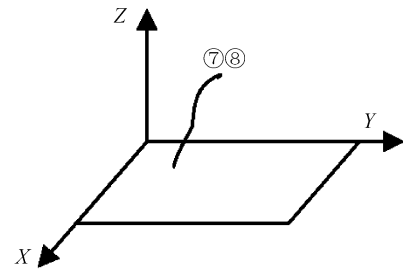


图 5 主动镜与参考镜的原始状态

Fig. 5 The primitive state between the active mirror and the plane mirror

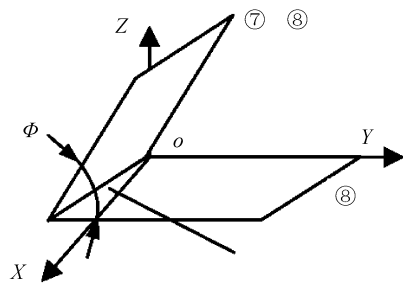


图 6 主动镜与参考镜的初始状态

Fig. 6 The initial state of the active mirror and the plane mirror

Y 轴转动会达到两种不同的状态.令原始状态主动镜⑦的单位法向量 \mathbf{n} 为 $(0,0,1)$,主动镜先绕 X 轴顺时针转动 α 再绕 Y 轴顺时针转动 β 达到初始状态时,向量 \mathbf{n} 达到一个新的位置,新向量可表示如式(1)。

$$(\cos \alpha', \cos \beta', \cos \gamma') = (0, 0, 1) \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix} = (-\cos \alpha \sin \beta, \sin \alpha, \cos \alpha \cos \beta) \quad (1)$$

同理,在原始状态下,主动镜平面先绕 Y 轴顺时针转动 β 再绕 X 轴顺时针转动 α 角时,新的位置向量如式(2)。

$$(\cos \alpha'', \cos \beta'', \cos \gamma'') = (-\sin \beta, \sin \alpha \cos \beta, \cos \alpha \cos \beta) \quad (2)$$

由于主动镜转动的偏转角 α, β 非常小,则有 $\cos \alpha \sin \beta \approx \sin \beta; \sin \alpha \cos \beta \approx \sin \alpha$ (3)

由式(1)、式(2)、式(3)则有

$$(\cos \alpha', \cos \beta', \cos \gamma') = (\cos \alpha'', \cos \beta'', \cos \gamma'') = (-\sin \beta, \sin \alpha, \cos \alpha \cos \beta) \quad (4)$$

因此在偏转角非常小的情况下,可以不考虑主动镜绕 X 轴或绕 Y 轴偏转的先后次序. 令初始状态主动镜⑦的单位法向量的位置向量为 $(\cos \alpha_0, \cos \beta_0, \cos \gamma_0)$, 则有

$$\begin{aligned} (\cos \alpha_0, \cos \beta_0, \cos \gamma_0) &= (-\sin \beta, \\ &\sin \alpha, \cos \alpha \cos \beta) \end{aligned} \quad (5)$$

即

$$\begin{cases} \cos \alpha_0 = -\sin \beta \approx -\beta \\ \cos \beta_0 = \sin \alpha \approx \alpha \\ \cos \gamma_0 = \cos \alpha \cos \beta \approx 1 - \alpha^2/2 - \beta^2/2 \end{cases} \quad (6)$$

主动镜绕 X, Y 轴转动后, 主动镜平面初始状态下的法线式方程如式(7).

$$x \cos \alpha_0 + y \cos \beta_0 + z \cos \gamma_0 = 0 \quad (7)$$

在主动镜的转角检测中, 只需讨论干涉条纹的间距和方向的变化. 主动镜平面和 $z=0$ 平面交线方向(与 X 轴的夹角 θ)决定了干涉条纹的方向, 而二平面之间的夹角 Φ 决定了条纹的间距宽度. 由主动镜平面的法线式方程可得, 主动镜平面与参考平面镜平面的交线方程如式(8)

$$\begin{cases} y = -(\cos \alpha_0 / \cos \beta_0)x \\ z = 0 \end{cases} \quad (8)$$

而此时干涉条纹与 X 轴交角 θ 满足式(9).

$$\tan \theta = -(\cos \alpha_0 / \cos \beta_0) \quad (9)$$

主动镜与参考平面镜平面的夹角 Φ 满足式(10)

$$\cos \Phi = \frac{0 \cdot \cos \alpha_0 + 0 \cdot \cos \beta_0 + 1 \cdot \cos \gamma_0}{\sqrt{\cos^2 \alpha_0 + \cos^2 \beta_0 + \cos^2 \gamma_0}} = \cos \gamma_0 \quad (10)$$

即 $\Phi = \gamma_0$.

从式(6)、式(9)、式(10)可得主动镜偏转角 α, β 与干涉条纹的方向(θ)与条纹疏密(Φ)的关系如式(11).

$$\begin{cases} \tan \theta = \alpha / \beta \\ \cos \Phi = 1 - \alpha^2/2 - \beta^2/2 \end{cases} \quad (11)$$

因此从干涉条纹图像中提取出条纹方向角 θ 和表征条纹疏密的角度 Φ 后, 便可以根据式(11)归算出主动镜的偏转角 α, β . 在检测实验中, 主动镜绕 X, Y 轴的转动有可能是顺时针的, 也有可能是逆时针的, 在绕 X, Y 轴的各种不同转向下的位置向量, 与式(11)不同的只是式(11)中 α, β 的正负符号的变化. 在检测主动镜的偏转角时, 先根据初始干涉条纹利用式(11)求出主动镜的初始偏转角 α_0, β_0 , 当驱动电源驱动主动镜转动后, 采集干涉条纹, 根据式(11)便可得到相应的 α_1, β_1 , 那么主动镜的偏转角为 $\alpha_1 - \alpha_0, \beta_1 - \beta_0$.

3 数据处理与检测结果

根据等厚干涉原理, 主动镜与参考镜之间的夹角 Φ 与干涉条纹间距 d 及检测光波波长 λ 满足式(12).

$$\varphi = \lambda / 2d \quad (12)$$

因此从干涉条纹中得到条纹倾角 θ 和条纹间距 d , 便可根据式(12)、式(11)归算出主动镜的偏转角. CCD 采集的条纹图像灰度分布可由式(13)来表示^[3-4].

$$I(x, y) = A(x, y) + B(x, y) \sin(\varphi(x, y)) + n_1(x, y) \quad (13)$$

式(13)中的加性噪声 $n_1(x, y)$ 主要包括信道噪声、空气扰动噪声及光学元件污点引起的衍射噪声等. 信道噪声、空气扰动噪声的均值为零, 采用积分法减少这类噪声对条纹信息的影响; 光学元件污点引起衍射噪声相对于干涉条纹处于较高频段, 采用低通滤波法滤除这类噪声的干扰. 干涉条纹背景光强 $A(x, y)$ 和对比度 $B(x, y)$ 不均产生的低频噪声在条纹图像“二值”化时采用高斯门限法以减少这类噪声对干涉条纹的影响.

为了从条纹间提取有效信息, 必须先把干涉条纹细化, 细化时可以采用重心细化法, 引入亚像素的概念, 提高测量的准确度. 由于从条纹提取的有效信息是指条纹间距(d)及其倾斜角(θ), 因而可以只细化条纹图像的中心部分来减少条纹细化运算量. 条纹细化后, 对条纹细化的点每条条纹采用最小二乘法进行直线拟合^[5], 根据拟合后的直线, 便可得到每条条纹的倾斜角及两两条纹之间的间距, 通过求得平均值得出条纹间距(d)及其倾斜角(θ). 图 7 为采集的干涉条纹图, 图 8 为条纹图像中心的细化点集图.

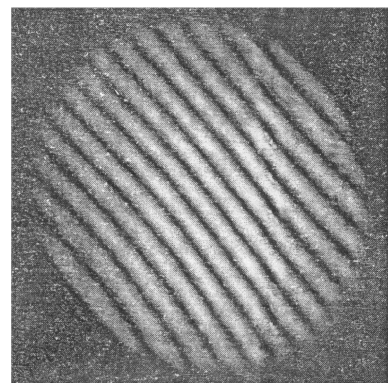


图 7 干涉条纹图

Fig. 7 The interferogram



图8 条纹细化点集图
Fig. 8 The thinning image

在检测主动镜的偏转角时,由计算机数码控制驱动电源驱动主动镜偏转,对主动镜的X轴、Y轴偏转驱动分为512级,数码驱动由0—511—0,完成一个检测周期,每驱动一步,采集干涉条纹,计算出偏转角,由此得到主动镜X轴的偏转角曲线如图9。经检测,主动镜X轴方向的偏转分辨率为 $0''.113$,最大偏转角为 $56''.872$,Y轴方向的偏转分辨率为 $0''.112$,最大偏转角为 $49''.835$,与光斑测量法^[2]测得的主动镜偏转角参量的设计值(如表1)基本相符。

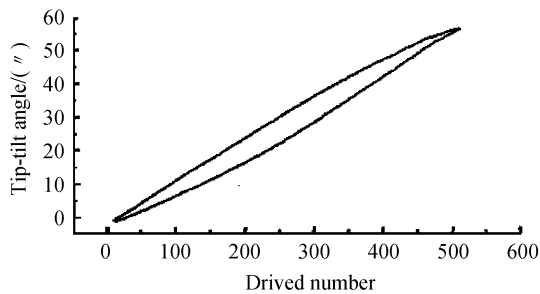


图9 X轴方向偏转角测试曲线
Fig. 9 The test curve of the tip-tilt angle in X direction

表1 测得的主动镜偏转角参量

Table 1 The tip-tilt angle measured with the spot approach

	X Axis	Y Axis
The max angle/ $''$	57.18	50.35
The resolution/ $''$	0.117	0.117

4 结论

采用了激光干涉检测方法,综合应用计算机控制、数字图像处理等技术对高精密仪器主动镜的偏转角进行了检测。在检测过程中,推导出了干涉条纹与主动镜偏转角之间的对应数学关系式;对条纹图像进行了噪音分析和相应的预处理;在干涉条纹细化的基础上对每条干涉条纹采用最小二乘法进行直线拟合,从而最终检测出主动镜的偏转角,从实验结果可知,该检测方法是行之有效的。

参考文献

- [1] WANG Zheng-ming. The astronomical measurement with optical interference[M]. Beijing: Science Press, 1996: 50-56.
王正明. 天文光干涉测量[M]. 北京: 科学出版社, 1996: 50-56.
- [2] WANG Hai-tao, FAN Wei-jun. Research on the active mirror system of the stellar interferometer[J]. *Optical Technology*, 2002, **28**(4): 334-336.
王海涛, 范伟军. 恒星光干涉仪中主动镜的研究[J]. *光学技术*, 2002, **28**(4): 334-336.
- [3] ZHANG Li-xin, HUANG Yu-mei. Errors analysis of interferometry and accuracy measurement for NC machine tools[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(6): 1224-1228.
张立新, 黄玉美. 干涉测量的误差分析与并联机床的准确度测量[J]. *光子学报*, 2008, **37**(6): 1224-1228.
- [4] SU Jun-hong. Research on automatic recognition technology for interference fringes in measurement of length[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(5): 615-617.
苏俊宏. 长度测量中干涉条纹的自动识别技术研究[J]. *光子学报*, 2003, **32**(5): 615-617.
- [5] ZHAO Guang-xing, CHENG Hong-qiu. Data-fitting method of interference stripes[J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(6): 797-800.
赵光兴, 陈洪廖. 干涉条纹的数据拟合方法[J]. *光学学报*, 2000, **20**(6): 797-800.

Measuring the Tip-tilt Angles of the Active Mirror in the Stellar Interferometer

LU Yi, FAN Wei-jun, KONG Ming

(College of Metrological Measurement & Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: Using laser interference technology, computer control technology and data image processing technology, the CCD interferometer measurement system is designed. Then, the mathematical model between the interferogram and the tip-tilt angles is deduced. After preprocessing the interferogram and thinning the fringes, least square method is used to fit the fringes. Based on equal thickness interferometer theory, the tip-tilt angle parameters of the active mirrors are obtained. The X axis's movement range is $56''.872$, and the resolution is $0''.113$. The Y axis's movement range is $49''.835$, and the resolution is $0''.112$.

Key words: Active mirror; Tip-tilt angle; Interference fringes



LU Yi was born in 1979. Now he is a Ph. D. degree candidate and a lecturer at China Jiliang University. His research interests focus on precision measurement technology and photoelectricity signal processing.