

文章编号 1004-924X(2007)02-0206-06

压电陶瓷精密转动平台的转角精度测量

高亮^{1,2}, 阚珊珊^{1,2}, 李敏^{1,2}, 尼启良¹, 陈波¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘要:提出了一种亚角秒精度的转角测量方法。利用 ZYGO 数字干涉仪测量压电陶瓷转动平台驱动待测标准平面镜偏转前后镜子面形精度的 PV(Peak Valley)值, 二者的差值除以待测标准平面镜的直径, 其结果近似等于压电陶瓷转动平台转动的角度。通过测量与误差分析, 验证了压电陶瓷转动平台的转角精度小于 $1 \mu\text{rad}(0.2'')$, 而测量的总误差和压电陶瓷转动平台移动的角度大小有关, 移动距离越大, 产生的误差越大, 但其相对误差小于 1%。本测量方法证明压电陶瓷精密转动平台转角精度达到了极紫外太阳望远镜(EUT) $0.8''$ 的角分辨率的要求。

关键词:极紫外太阳望远镜; ZYGO 干涉仪; 压电陶瓷转动平台; 转角精度

中图分类号:TH751;TB92 **文献标识码:**A

Rotation-angle-accuracy measurement of piezo tilt platform

GAO Liang^{1,2}, KAN Shan-shan^{1,2}, LI Min^{1,2}, NI Qi-liang¹, CHEN Bo¹

(1. *State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine*

Mechanics and Physics, Chinese Academy of Science, Changchun 130033, China; 2. Graduate school of the Chinese Academy of Science, Beijing 100039, China)

Abstract: A sub-arc-second-accuracy method for measuring rotation-angle was proposed. The tiny rotation-angle of the PZT was obtained using the diameter of the reference flat mirror divide the difference between the PVs when PZT move and don't move. By measuring and analyzing, the rotation angle accuracy of the PZT is less than $1 \mu\text{rad}(0.2'')$. The total error changes with the rotation angle of the PZT, but its relative error was smaller than 1%. The result indicates that the measuring technique can meet the resolution of the EUT to $0.8''$.

Key words: extra ultraviolet solar telescope (EUT); ZYGO interferometer; piezo tilt platforms (PZT); rotation-angle-accuracy

1 引言

极紫外太阳望远镜(EUT)具有 $0.8''$ 的角分

辨率, 而卫星平台所能提供的指向稳定性无法满足 EUT 观测要求, 为此, 需要在 EUT 上附加自己的图像稳定装置, 弥补由于卫星指向变化所造成的图像模糊^[1]。EUT 采用指向望远镜提供指

向偏差信号,将指向偏差信号处理后,驱动次镜转动机构,最终达到 EUT 的像移补偿的需要,实现 $0.8''$ 高分辨率的要求。在设计上 EUT 要求对次镜进行开环控制,角度转动范围 $\pm 30''$ 。为了实现对次镜控制的精度,引进了德国公司的压电陶瓷精密转动平台,在应用之前对其转角精度进行了测量。

目前,常用的光学测角方法主要有光电编码法、光学内反射法、圆光栅法、激光干涉法以及环形激光法等^[2]。光电轴角编码器采用光电技术将轴角信息转换成数字代码,与计算机和显示装置连接后可实现对角度的动态测量和实时控制,其优点是结构紧凑,分辨率和测角精度高,响应频率高,但对光栅制作水平和电路集成工艺要求很高^[3-5]。光学内反射法是利用全反射条件下入射光变化时反射率的变化关系,通过反射率的变化来测量入射角的变化。用该方法制成的测角仪体积可以做得很小,而且结构简单,成本低,但其测量范围也很小,因此只能用于小角度测量^[6,7]。圆光栅测角测量原理是将圆光栅与转台同轴安装,二者同时转动,测得光栅转过的栅距数就是测得转角。它的优点是静态测量准确度高、稳定可靠,缺点是对光栅与转台的同心准确度要求较高,高精度光栅的制作加工困难,动态测量时分辨力很难保证^[8-10]。激光干涉测角大多是以迈克耳逊干涉仪为基本原理,将角度的变化转换为长度变化来进行测量,主要用来测量平面角,灵敏度较高^[11-13]。环形激光法用于动态角度测量是目前转速测量准确度最高的方法,该技术测角的最大优点是容易实现自校,缺点是只能实现动态测量,加工工艺难以保证,成本高^[14]。

本文检测的压电陶瓷转动平台的转角精度为 $1 \mu\text{rad}$,而上述方法或者结构复杂、测量条件要求太高难于实现,或者精度无法满足要求。因此本文利用 ZYGO 数字干涉仪测量压电陶瓷转动平台驱动待测平面镜偏转前后镜子面形的 PV 值,二者的差值除以待测镜的直径,结果近似等于压电陶瓷转动平台转动的角度。

2 干涉仪小角度测量原理

一般小角度测量的原理如图 1 所示,其测量方程可表示为:

$$\tan \alpha = h/l \text{ 或 } \sin \alpha = h/L,$$

由于角度很小,上式可近似写为:

$$\alpha = h/l \text{ 或 } \alpha = h/L,$$

这样在 L 或 l 确定的情况下,通过测量 h 即可以得到角度 α 。

本文即利用上述原理。压电陶瓷转动平台 S330 有两个相互垂直的工作轴^[15],使两个轴分别对应待测镜子的水平和垂直方向,在测量时保证水平轴不动,只动垂直轴。首先给定一个初位置,利用 ZYGO 干涉仪测量镜子面形的 PV 值 1,然后用压电陶瓷转动平台驱动镜子偏转,测出 PV 值 2,求出两次测量值之差 ΔPV 。 ΔPV 是由压电陶瓷转动平台垂直轴驱动镜子倾斜引起的,代表着两次测量波面在垂直方向倾斜量的差值。

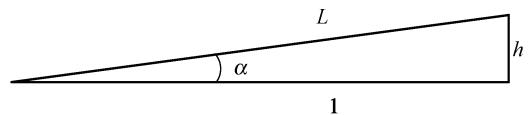


图 1 小角度测量原理图

Fig. 1 Small angle measurement principle

如图 2 所示, AB 面代表初位置 1, CD 面代表偏转后的位置 2, DE 是二者垂直方向的差值,即 $DE = \text{PV} \cdot \lambda$ 。因此,当 θ 足够小时可得公式 $\theta \approx \sin \theta \approx \Delta\text{PV} \cdot \lambda / D$,其中 θ 是镜子偏转的角度, $D = 44.5 \text{ mm}$ 是镜子的直径, $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ 为干涉仪的工作波长。

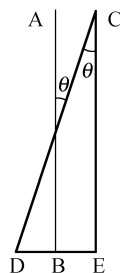


图 2 测量方法示意图

Fig. 2 Schematic diagram of measurement method

3 测量结果与分析

采用上述高精度转角测量方法,对 EUT 次

镜转动平台转角精度进行了测量。其中图 3 为测量装置示意图,图 4~6 是一次测量实例。我们测量了压电陶瓷转动平台移动不同角度时的精确度和其在工作范围 0~150 μrad (即 0~30'')的线性并绘制了线性图。

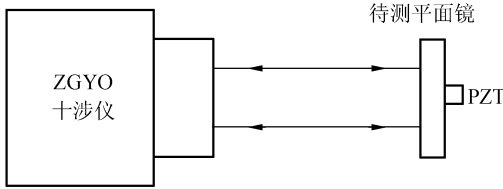


图 3 测量装置示意图

Fig. 3 Schematic diagram of measurement device

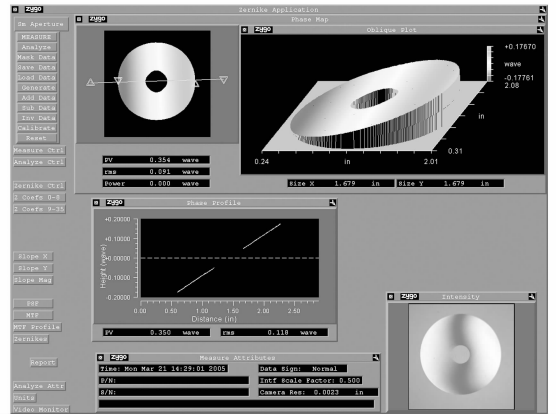


图 6 两次测量结果 ΔPV 的图形

Fig. 6 Plane mirror's wavefront map of two measurement result ΔPV

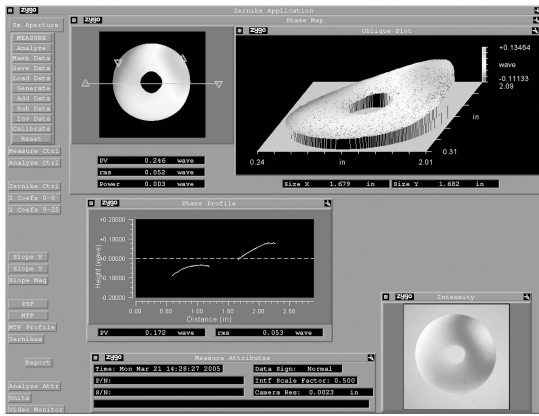


图 4 压电陶瓷转动平台未移动时平面镜的面形图

Fig. 4 Plane mirror's wavefront map when the PZT was not moved

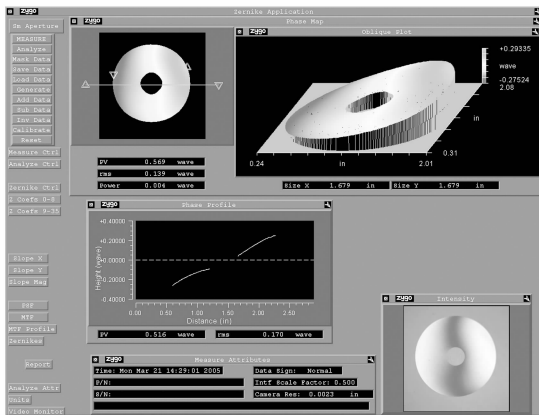


图 5 压电陶瓷转动平台移动 5 μrad 后平面镜的面形图

Fig. 5 Plane mirror's wavefront map when the PZT was moved 5 μrad

测量是在温度 18 $^{\circ}\text{C}$, 湿度 40% 环境下完成的。其中表 1 的数据代表压电陶瓷转动平台移动不同角度时的转角精度。测量时压电陶瓷转动平台每次移动后先归零位然后进行测量,每个角度测量五次。从表 1 可以看出,压电陶瓷转动平台在小角度移动时有很高的精度。随着移动距离的加大,误差在逐渐增大,压电陶瓷转动平台的转角精度在降低,但其相对误差很小。

表 2 的数据是压电陶瓷转动平台连续移动 0~150 μrad 的测量结果,测量中没有归零的过程,压电陶瓷连续移动。从表 2 可以看出,其初始值有较大的误差,存在 1 μrad 左右的系统误差。另外,由于压电陶瓷连续移动使误差累积,导致测量结果偏大。图 7 是压电陶瓷转动平台移动 0~150 μrad 的线性图,从图中可以看出,压电陶瓷在 0~150 μrad 工作时其线性很好,满足望远镜次镜的要求。

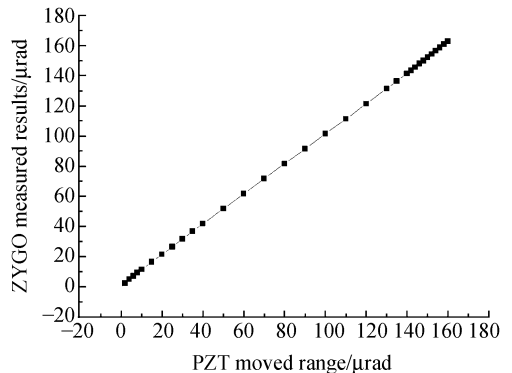


图 7 压电陶瓷转动平台移动 0~150 μrad 的线性图

Fig. 7 Linear map when the PZT moved from 0 to 150 μrad

表 1 压电陶瓷转动平台移动不同角度时的测量结果

Tab.1 Measurement results when the PZT moved in different angles

项目 \ 结果	压电陶瓷转动平台移动量 (μrad)	ZYGO 测量结果 (μrad)	ZYGO 测量结果的平均值 (μrad)	二者误差绝对值 (μrad)	相对误差
测量压电陶瓷转动平台转动 1 μrad 时的转角精度	1	0.953			
	1	1.109			
	1	0.967	1.024	0.024	2.3%
	1	1.009			
	1	1.080			
测量压电陶瓷转动平台转动 5 μrad 时的转角精度	5	5.033			
	5	5.062			
	5	4.878	4.968	0.032	0.6%
	5	4.963			
	5	4.906			
测量压电陶瓷转动平台转动 10 μrad 时的转角精度	10	10.054			
	10	10.124			
	10	9.869	9.960	0.040	0.4%
	10	10.054			
	10	9.700			
测量压电陶瓷转动平台转动 100 μrad 时的转角精度	100	100.170			
	100	99.240			
	100	99.498	99.797	0.203	0.2%
	100	99.980			
	100	100.096			
测量压电陶瓷转动平台转动 500 μrad 时的转角精度	500	504.945			
	500	504.035			
	500	501.334	503.640	3.640	0.7%
	500	504.746			
	500	503.158			

表 2 压电陶瓷转动平台连续移动 0~150 μrad 的测量结果

续表 2

Tab.2 Measurement results when the PZT moved from 0 to 150 μrad continuously

压电陶瓷转动平台连续移动量 (μrad)	ZYGO 测量结果 (μrad)	误差 (μrad)			
2	3.104	1.104	80	81.581	1.581
4	5.105	1.105	90	91.462	1.462
6	7.124	1.124	100	101.333	1.333
8	9.400	1.400	110	111.387	1.387
10	11.476	1.476	120	121.270	1.270
15	16.510	1.510	130	131.253	1.253
20	21.487	1.487	135	136.315	1.315
25	26.492	1.492	140	141.363	1.363
30	31.811	1.811	142	143.425	1.425
35	36.845	1.845	144	145.530	1.530
40	41.807	1.807	146	147.848	1.848
50	51.833	1.833	148	149.910	1.910
60	61.616	1.616	150	152.085	2.085
70	71.684	1.684	152	154.261	2.261
			154	156.465	2.465
			156	158.584	2.584
			158	160.816	2.816
			160	162.807	2.807

4 误差分析

测量中产生的误差主要包含:测量平面镜直径时产生的测量误差;ZYGO 干涉仪测量精度影响带来的误差;测量方法中近似产生的误差;平面镜面形精度影响带来的误差。用 Δ_1 表示测量镜子直径产生的测量误差, Δ_2 表示干涉仪精度造成的误差, Δ_3 表示测量方法中近似产生的误差,用 Δ_4 表示平面镜面形精度影响带来的误差,则合成后的总误差 $\Delta = \sqrt{\Delta_1^2 + \Delta_2^2 + \Delta_3^2 + \Delta_4^2}$ 。从表 1 可以发现测量的总误差和压电陶瓷转动平台移动的角度大小有关,移动距离越大,产生的误差就越大,但其相对误差小于 1%。

5 结 论

利用 ZYGO 数字干涉仪实现了对亚角秒转角的测量,检验了用于 EUT 次镜的高精度转动平台的转角精度以及线性,测量结果表明这一平台的转角精度达到了 $1 \mu\text{rad}(0.2'')$,相对误差 < 1%,完全满足极紫外太阳望远镜次镜的要求。由于该方法简便易行、测量精度高,只需配备数字干涉仪和标准平面镜,将标准平面镜安装在被测转角的物体上,用数字干涉仪测量安装在被测物上的原始状态的标准平面镜的面形精度值,再测待测物体转动后标准平面镜的面形精度值,经过计算就可知道被测物的微小转角,因此对于小角度的高精度测量有重要的实际应用价值。

参考文献:

- [1] 陈波, 尼启良, 曹继红, 等. 空间软 X 射线/极紫外波段正入射望远镜研究[J]. 光学 精密工程, 2003, 11(4): 315-319. CHEN B, NI Q L, CAO J H, *et al.*. Development of a space soft X-ray and EUV normal incidence telescope [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2003, 11(4): 315-319. (in Chinese)
- [2] 陶卫, 浦绍邦, 孙运斌. 角度测量技术的发展[J]. 激光杂志, 2002, 23(2): 5-7. TAO W, PU SH B, SUN Y B. The development of angle measurement technique[J]. *Laser J.*, 2002, 23(2): 5-7. (in Chinese)
- [3] 孔志勇, 赵红颖, 熊文卓, 等. 采用衍射、干涉技术提高光电轴角编码器的测角精度和分辨率[J]. 光学 精密工程, 2001, 9(3): 260-264. KONG ZH Y, ZHAO H Y, XIONG W ZH, *et al.*. Improving angle-measuring precision and resolution of photoelectric rotary encoders using diffraction interference technology[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2001, 9(3): 260-264. (in Chinese)
- [4] 余琳, 冯长有, 丁林辉. 两步法测量编码器测角误差[J]. 光学 精密工程, 2004, 12(1): 66-77. SHE L, FENG CH Y, DING L H. Measurement of encoder errors with two-step method[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004, 12(1): 66-77. (in Chinese)
- [5] 孟中, 张涛, 郑秀筠, 等. 正交基函数多项式实时拟合在轴角编码器测速中的应用[J]. 光学 精密工程, 2006, 14(2): 303-307. MENG ZH, ZHANG T, ZHENG X J, *et al.*. Application of real time polynomial fitting based on orthogonal basis function algorithm to encoder rate measurement[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(2): 303-307. (in Chinese)
- [6] CHIU M H, SU D C. Angle measurement using total-internal-reflection heterodyne interferometry[J]. *Opt. Eng.*, 1997, 36(6): 1750-1753.
- [7] SAILER R, STRAUSS W S L, GSCHWEND M H, *et al.*. Total internal reflection fluorescence spectroscopy for probing porphyrin fluorescence in cell membranes[J]. *SPIE*, 1996, 2926: 162-169.
- [8] 张红胜, 冯长有. 光电定角比相法测圆光栅测量精度的提高[J]. 光学 精密工程, 2000, 8(5): 482-486. ZHANG H SH, FENG CH Y. Improvement of measurement precisions of circular raster by photoelectric phase-comparing method for angle positioning[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2000, 8(5): 482-486. (in Chinese)
- [9] PLAMER E W. Goniometer with continuously rotating grating for use as angle standard[J]. *Precision Eng.*, 1988,

10(3):147-152.

- [10] SHANG H M, TOH S L, FU Y, *et al.*. Measurement of angle of rotation using circular optical grating[J]. *SPIE*, 2001, 4317:72-78.
- [11] FOO C, MADAN G, LAI T, *et al.*. Michelson-interferometer-based method for measuring the angle of rotation [J]. *SPIE*, 2002, 4588:320-325.
- [12] APOSTOL D, DAMIAN V S, LOGOFATU P C, *et al.*. Interferometric angular transducers[J]. *SPIE*, 1995, 2461:548-510.
- [13] KIM J W, KIM J A, KANG C S, *et al.*. A novel Michelson interferometer combined with an autocollimator for the simultaneous measurement of linear and angular displacement[J]. *SPIE*, 2005, 5879:1-11.
- [14] 金国藩, 李景镇. 激光测量学[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
JIN G F, LI J ZH. *laser surveying*[M]. Beijing: Science Press, 1998. (in Chinese)
- [15] PI User Manual PZ 107E S-330 Tip/Tilt Platform 2003-09-09[Z].

作者简介:高亮(1980—),男,汉族,吉林长春人,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所博士研究生,主要研究方向为短波段光学技术。E-mail:gao_lianger@126.com