

文章编号: 1002-2082(2006)05-0450-05

移相式干涉仪在锥体棱镜角度测试中的应用

郭仁慧, 何 勇, 朱日宏, 高志山

(南京理工大学 电光学院, 南京 210094)

摘 要: 为了实时、高精度地测试光学零件, 对移相式数字波面干涉仪在锥体棱镜角度测试中的应用进行了研究。通过锥体棱镜二面角偏差计算方法得到了二面角偏差和干涉波面之间的关系, 分析了干涉波面的形状与锥体棱镜综合误差的关系, 编写了锥体棱镜角度和综合误差测试程序, 并且在移相式数字波面干涉仪和 ZYGO 干涉仪上分别对锥体棱镜进行测试, 给出了 2 者的比较测试结果。结果表明, 移相式数字波面干涉仪测量锥体棱镜二面角偏差的误差在 $0.3''$ 范围内, RMS 值的测量误差在 $\lambda/50$ 内; 提出的方法可实现检测过程的自动化。

关键词: 移相式干涉仪; 锥体棱镜; 角度误差

中图分类号: TN274

文献标志码: A

Application of phase-shifting interferometer for angle test of CCRs

GUO Ren-hui, HE Yong, ZHU Ri-hong, GAO Zhi-shan

(Institute of Electronic Engineering & Photo-electric Technology,
Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: The application of phase-shifting interferometers for measuring angles of the cone cube reflectors (CCR) is studied so as to realize the real-time and high accuracy test for optical elements. The relationship between the dihedral angle errors of CCRs and the interference pattern is obtained by calculating the dihedral angle errors of CCRs. The relationship between the shape of interference wavefront and the synthetic errors of CCRs is analyzed. A program to test the dihedral angle errors and the synthetic errors of CCRs is designed. After lots of experiments and comparison of the results by the digital phase-shifting interferometer and the ZYGO interferometer, it is proved that, in the program of CCR test, the measurement error of the dihedral angular difference is less than $0.3''$ and the measurement error of RMS is in $\lambda/50$ with the application of digital phase-shifting interferometer.

Key words: phase-shifting interferometer; cone cube reflector (CCR); angle error

引言

干涉仪可以高速、非接触地传输被测信息, 是高精度光学测量中常用的重要仪器。80 年代后, 国际上将激光技术、图像处理技术、电子技术与计算机技术引入光干涉计量测试领域, 用于光学系统及

零部件波像差与成像质量的评价, 实现了实时、快速、高精度、多参数、自动化计量测试。国外在这方面的工作起步早、发展快, 已推出了大量应用于各种检测范围和适于各种用途的数字波面干涉仪, 如 ZYGO 公司 90 年代生产的干涉仪。近年来, 随着国

收稿日期: 2006-04-29; 修回日期: 2006-07-03

基金项目: 江苏省现代光学技术重点实验室开放课题 (T8108030)

作者简介: 郭仁慧 (1979-), 女, 江苏宝应人, 硕士, 南京理工大学电光学院教师, 主要从事光学检测方面的研究。E-mail: grhjj@163.com

内外光学加工工业的不断发展,对高精度数字波面干涉仪的大量需求推动了这方面研制工作的进程,如浙江大学、长春光机所、上海光机所、南京理工大学等都在这方面做了大量的工作,向市场推出了多种具有自主知识产权的仪器^[1]。

锥体棱镜(CCR)广泛用于远距离测距、高精度的长度测量、速度测量、角度测量、平面度测量等激光测量仪器,这些激光仪器被广泛地用于激光精确制导、卫星监控系统等,在民用及国防上起着越来越大的作用。到上世纪末期,国内对CCR角度的测试还处于目视阶段,即根据干涉图判读、计算,国外ZYGO干涉仪则已将CCR测试部分软件化。近几年来,国内也发表了很多关于CCR角度、面形计算方法以及测试方面的文章^[2-6],但是都没有将CCR参数的测试与数字波面干涉仪相结合,没有实现CCR测试的自动化。

南京理工大学已经研制出移相式数字波面干涉仪,并编制了测试软件——PSI软件。本文在已知测试波面的基础上,对波面与CCR的二面角偏差、综合误差的关系进行研究,编写CCR测试程序,还将其嵌入PSI软件,最后利用该软件对CCR的参数进行测试,得到了较好的结果。

1 移相式数字波面干涉仪测试CCR原理

1.1 移相式数字波面干涉仪工作原理

移相式数字波面干涉仪由计算机和干涉仪主机组成。干涉仪系统框图如图1所示,由5个部分组成:(1)干涉仪主机,(2)移相器——PZT,(3)PZT控制源和驱动电源,(4)计算机及外设,(5)图像采集系统。

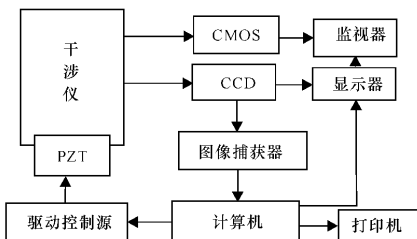


图1 干涉仪系统框图

Fig. 1 The block diagram of the interferometer system
系统工作原理:计算机对PZT驱动控制源发出指令,按设计好的时序和电压信号驱动PZT,PZT推动参考镜移动产生相位位移,干涉条纹在

干涉场中产生位移,同时图像采集系统在计算机控制下利用CCD对动态干涉图进行采样,采样结束后由计算机根据移相干涉术高精度的复原波面^[7]技术,再通过基于区域生长理论的波面解包方法^[8]进行波面解包,最后对得到的波面进行计算,得到被测件的待测参数。软件处理部分由PSI软件完成。

1.2 移相式数字波面干涉仪测试CCR光路

干涉仪测试CCR的光路图和干涉图如图2所示。干涉仪采用斐索型干涉仪,形成的干涉测试光是经过CCR 3个直角面反射的光线,参考光是从参考镜表面反射的光线。本文没有利用CCR大面的反射光作为参考光,主要是为了避免大面的面形误差给整个测试带来的误差,同时也是移相所需。

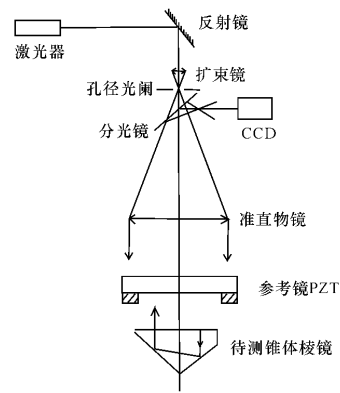


图2 斐索干涉仪测试光路图

Fig. 2 The testing beam path diagram of Fieazu interferometer

1.3 CCR的光学特性

CCR的重要特性在于,如果3个直角均为准确的 90° ,则由大面入射的光线依次经3个直角面反射后,仍由大面按原方向出射。

当CCR的二面角存在偏差时,出射光线将不再与入射光线严格平行,按反射顺序的不同分成6束,并将出射区分成6个部分,如图3所示。设二面

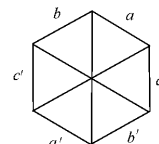


图3 光线出射区

Fig. 3 The area of the emitting rays
角偏差为 $\epsilon_{12}, \epsilon_{13}, \epsilon_{23}$,通过计算可得

$$\begin{cases} \alpha'_{ab} = \alpha'_{a'b'} = 4n(2/3)^{1/2}\epsilon_{12} = 3.265\ 986n\epsilon_{12} \\ \alpha'_{ac} = \alpha'_{a'c'} = 4n(2/3)^{1/2}\epsilon_{23} = 3.265\ 986n\epsilon_{23} \\ \alpha'_{bc} = \alpha'_{b'c'} = 4n(2/3)^{1/2}\epsilon_{13} = 3.265\ 986n\epsilon_{13} \end{cases} \quad (1)$$

式中: α'_{ab} , α'_{ac} 及 α'_{bc} 分别是各出射区之间的夹角。

在使用数字波面干涉仪测量 CCR 时, 干涉波面的形状反映了 CCR 二面角偏差对波面的影响, 根据公式(1), 只要求出 6 个出射区的波面法线之间的夹角 α'_{ab} , α'_{ac} 及 α'_{bc} , 就可以得到二面角偏差 ϵ_{12} , ϵ_{13} 及 ϵ_{23} 。因此, 可以通过将出射区的 6 个部分分别拟合成平面, 得到各平面的法线向量, 即可计算出各个平面之间的夹角, 从而得到二面角偏差。

干涉波面的形状不仅受二面角偏差的影响, 而且还受到 CCR 其它参数的影响, 如 CCR 各面的面形误差、材料的均匀性等, 这些因素都影响干涉波面的形状。它们对波面的影响程度不能区分开来, 所以在测量 CCR 时, 除了需要测量角度偏差, 还要测量其综合误差。综合误差是指被测件在光路方向上各个面形误差 Δh_i 、光路中光学玻璃折射率不均匀误差 Δn 以及二面角偏差等共同引起的测试光程的变化量 Δ 值。 $\Delta \rightarrow 0$ 时说明被测棱镜综合误差小, 入射波面没有变形, 像质较好。当干涉图处于目视判读阶段时, 可根据干涉条纹的整体弯曲程度和局部弯曲程度给出表示综合误差的光圈数, 当干涉仪和计算机联系起来后, 便可通过计算机对波面进行处理, 从而得到表征综合误差的参数。

2 CCR 测试程序的编写

2.1 程序流程图

编写的程序流程图如图 4 所示。首先由 PSI 软件得到相位数据和干涉图有效区识别数组, 由有效区识别数组得到有效区的圆心和半径, 然后将有效区分成 6 个部分, 即 CCR 的 6 个出射区, 对各区分别进行拟合, 求出拟合平面间的夹角, 然后由公式(1)得到二面角偏差。

2.2 分区

首先求出有效区的圆心和半径。有效区的圆心可通过求质心的原理得到, 再根据统计有效区数据的个数 M , 由 $\pi R^2 = M$ 得到半径 R 。

由圆心坐标 (x_0, y_0) 和半径 R 按照要求确定六边形的顶点坐标, 从而可以得到 6 个等边三角形。设有效区判断数组的大小为 64×64 , 将该区域分成 6 个等边三角形, 如图 5(a) 所示。再将各三角形外

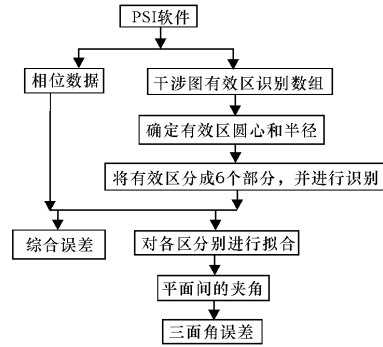


图 4 程序流程图

Fig. 4 Flow chart of the program

接圆的半径缩小到原来的 $1/N$ (缩小的目的是为了去除各区边缘无效点, 使参与运算的数据均为可靠数据), 得到半径 r , $r = \frac{\sqrt{3}}{3} \times R \times N$, 最后根据六边形的顶点坐标及圆心坐标便可得到 6 个缩小后的三角形, 如图 5(b) 所示 ($N=0.9$)。本程序对各个区的识别是通过将识别数组中相应各区赋以不同的值来实现的。

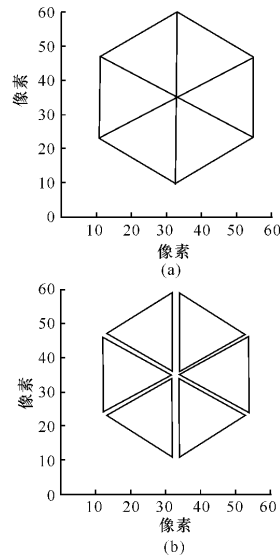


图 5 CCR 的出射区

Fig. 5 The emitting area of CCR

2.3 波面拟合原理

可以由干涉图通过移相干涉术复原波面, 得到一系列干涉相位值。定义最佳参考球面为

$$w_0(x, y) = a_0 + a_1x + a_2y + a_3(x^2 + y^2) \quad (2)$$

式中, a_0 为位移项; a_1 和 a_2 分别为 x 和 y 方向的

倾斜系数; a_3 为离焦系数。当被测波面为平面或要拟合成平面时, $a_3=0$, 利用最小二乘法就可以确定各系数。对于锥体棱镜, 可将其波面拟合成平面。通过干涉图得到一组相位值 $W'(x, y)$, 设参考波面为平面时的方程为 $W_0(x, y) = a_0 + a_1x + a_2y$, 则波像差 $W = W'(x, y) - (a_0 + a_1x + a_2y)$ 。要使波像差达到最小值, 按照最小二乘法原理 $\sum W^2 = \min$ 求得系数 a_0, a_1 及 a_2 , 从而可得到表示波面的参考平面方程。

2.4 由平面方程求角度偏差

通过对 6 个部分的波面进行拟合可得到描述波面的 6 个平面方程, 方程形式为 $W_0(x, y) = a_0 + a_1x + a_2y$, 即 $a_0 + a_1x + a_2y - W_0(x, y) = 0$, 法线向量为 $(a_1, a_2, -1)$ 。设相邻平面方程为 $b_0 + b_1x + b_2y - w_0(x, y) = 0$, 法线向量为 $(b_1, b_2, -1)$, 则这 2 个平面的夹角为

$$\alpha = \cos^{-1} \frac{|a_1b_1 + a_2b_2 + 1|}{\sqrt{a_1^2 + a_2^2 + 1} \times \sqrt{b_1^2 + b_2^2 + 1}} \quad (3)$$

在已知 6 个平面方程的情况下, 可分别求出相邻平面之间的夹角, 从而得到二面角的偏差值 $\epsilon_{12}, \epsilon_{23}, \epsilon_{13}$ 。

2.5 综合误差的描述方法

实际波面和理想波面之间的光程差被称为波像差, 综合误差可用波像差函数的标准偏差值 (RMS) 来评价。设波像差函数为 $W(x, y)$, 即

$$W(x, y) = W'(x, y) - W_0(x, y) \quad (4)$$

式中, $W'(x, y)$ 为测得的相位值; $W_0(x, y)$ 为参考相位值。则

$$\text{RMS} = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M (W(x_i - y_i) - \bar{W})^2} \quad (5)$$

式中, $\bar{W} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M W(x_i - y_i)$; M 为采样点数。

3 实验

在确定了程序的可行性和对 CCR 的测试进行仿真后, 将 CCR 测试程序嵌入 PSI 软件中, 在移相式数字波面干涉仪上测量 CCR。这样从干涉采样到相位复原再到 CCR 参数计算均由 PSI 软件完成。测量时的软件界面如图 6 所示, 测试波面的二维和三维立体图如图 7 所示。通过 ZYGO 干涉仪对相同的

CCR 进行测试, 得到的测试波面的二维和三维立体图如图 8 所示。

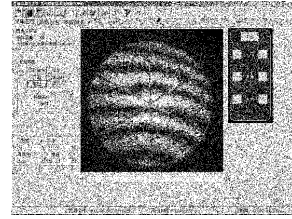


图 6 测量锥体棱镜时的软件界面

Fig. 6 The software interface while CCR is tested

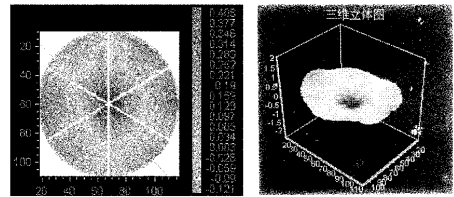


图 7 移相式干涉仪得到的二维和三维波面图

Fig. 7 The planar pattern and three-dimensional pattern of the wavefront achieved by phase-shifting interferometer

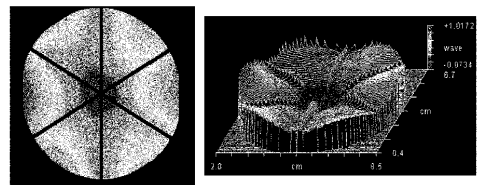


图 8 ZYGO 干涉仪得到的二维和三维波面图

Fig. 8 The planar pattern and three-dimensional pattern of the wavefront achieved by ZYGO interferometer

将经过多次实验得到的测试结果与 ZYGO 干涉仪的测试结果进行比较, 其结果如表 1 所示 ($\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$)。

表 1 ZYGO 测试结果与 PSI 测试结果比较

Table 1 Comparison of the results achieved by ZYGO and PSI

序号	口径/mm	RMS(λ)		误差(λ)
		ZYGO	PSI	
1	25	0.193	0.177	-0.016
2	62	0.086	0.089	0.003
3	62	0.292	0.298	0.006
4	64	0.497	0.512	0.005
5	64	0.271	0.262	-0.009

续表 1

序号	直角偏差一/(")		误差 /(")	直角偏差二/(")		误差 /(")	直角偏差三/(")		误差 /(")
	ZYGO	PSI		ZYGO	PSI		ZYGO	PSI	
1	1.26	1.085	-0.175	-0.23	-0.046	0.184	2.19	2.010	-0.180
2	0.02	0.027	0.007	-0.21	-0.384	-0.183	0.37	0.353	-0.017
3	-0.45	-0.469	-0.019	-1.02	-1.126	-0.106	-1.22	-1.313	-0.093
4	-0.24	-0.212	0.088	1.96	1.852	-0.108	0.30	0.324	0.024
5	0.43	0.504	0.074	0.65	0.625	-0.025	1.04	1.142	0.102

注:误差 = PSI 计算结果 - ZYGO 计算结果

从上面的数据可以看出,移相式数字波面干涉仪测量CCR的结果与ZYGO干涉仪的测量结果基本吻合,角度偏差的测量误差在0.3"范围内,RMS值的测量误差在λ/50内,说明用移相式数字波面干涉仪测量CCR的精度较高。

4 结 论

通过编制CCR测试程序,将CCR的测量和移相式数字波面干涉仪结合起来,实现了CCR测量的自动化。实验结果表明,CCR测量的精度较高,二面角角度偏差的测量误差在0.3"范围内,RMS值的测量误差在λ/50内,并且使锥体棱镜的测量更加容易。

参考文献:

[1] 于瀛洁,韦春龙,陈明仪.移相式数字波面干涉仪中的几个技术问题[J].光学精密工程,2001,9(6):584-587.
YU Ying-jie, WEI Chun-long, CHEN Ming-yi. Several technical problems in phase-shifting interferometer [J]. Optics and Precision Engineering, 2001, 9(6):584-587. (in Chinese)

[2] 何勇,顾文礼,陈进榜.CCR角度误差的一种测量方法[J].计量技术,1999(3):13-15.
HE Yong, GU Wen-li, CHEN Jin-bang. A testing method of the dihedral errors of CCR [J]. Measurement Technology. 1999 (3): 13-15. (in Chinese)

[3] 孙桂林,刘中本.角锥棱镜的误差分析[J].西安工业学院学报.1990,10(2):76-81.
SUN Gui-lin, LIU Zhong-ben. Analysis of the errors of CCR[J]. Transaction of Xi'an Institute of Technology. 1990, 10(2): 76-81. (in Chinese)

[4] 么承弼.锥体棱镜的三个直角的快速测量[J].计量技术,1990(6):14-16.
YAO Cheng-bi. Fast testing of the three right-angles of CCR [J]. Measurement Technology, 1990 (6):14-16. (in Chinese)

[5] 翁兴涛,聂辉,何平安,等.角锥棱镜的直角面面形问题[J].光学技术,2002,28(1):71-73.
WENG Xing-tao, NIE Hui, HE Ping-an, et al. The right-angle surface problems of CCR [J]. Optical Technology, 2002, 28(1):71-73. (in Chinese)

[6] 朱日宏,陈磊,王青,等.移相干涉测量术及其应用[J].应用光学,2006,27(2):85-88.
ZHU Ri-hong, CHEN Lei, WANG Qing, et al. Testing technology of phase-shifting and Application [J]. Journal of Applied Optics, 2006, 27(2): 85-88.

[7] ZHU Ri-hong, WANG Zhi-qiang, DING Xu-xing, et al. An improved wave unwrapping algorithm based on the region growing theory[J]. SPIE, 2002, 4929:1-9.

[8] 梁燕熙.光电总体集成技术和光电系统的研发[J].应用光学,2005,26(1):1-3.
LIANG Yan-xi. Integrating technology of photoelectric collectivity and research on the photoelectric system[J]. Journal of Applied Optics, 2005, 26(1):1-3. (in Chinese)