

文章编号:1004-4213(2010)04-0723-5

波带板干涉法检测双曲面^{*}

权贵秦¹, 王刚², 聂亮²

(1 西安电子科技大学 技术物理学院, 西安 710071)

(2 西安工业大学 光电工程学院, 西安 710032)

摘要:针对非球面高准确度检测的难题,设计了基于波带板干涉法的共光路干涉系统.阐述了干涉仪的测量原理,实验中针对曲率半径 $R=103.26\text{ mm}$,口径 $D=40\text{ mm}$ 的被测双曲面,设计并制作了波带板,编制了基于坐标变换的条纹中心法的干涉条纹处理程序,并将测量数据与泰勒-霍普森轮廓仪进行了比对,实验结果证明了该系统的可行性和先进性.

关键词:非球面检测;波带板;干涉

中图分类号: TN247

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20103904.0723

0 引言

长期以来,非球面的制造和检测技术一直是制约其得到广泛应用的两大难题.迄今为止,各种非球面的光学检测方法可以分为三类:干涉法、阴影法、激光束平移旋转法.干涉法是一种短时间测定整个非球面的方法,它灵敏度高,一直是检测非球面的主要途径.干涉法一般分为传统干涉仪法、计算全息法、散射板和波带板干涉法、剪切干涉法^[1].

传统干涉仪法需要设计和装备复杂的补偿镜,而且不易实现对深度非球面的测量;计算全息法可以模拟任意一种波前,很容易测量任意面面形的光学元件,但由于剪切干涉法不需要标准参考波面,灵敏度可调,有利于测量与球面像差较大的非球面,但剪切干涉图的判读和分析需要复杂的数学处理.全息法缺点是一种全息片只能测量一种非球面,而且制作过程非常烦琐^[2].

本文使用波带板共光路法检测非球面.在干涉仪光路中,波带板的零级光提供参考光束,第一级的衍射光则作为检测光束,由于每级光在两次通过波带板时分别只衍射了一次,因此衍射波前具有大体相等的振幅.同时由于检测光和参考光在同一光路中,干涉条纹可以免受振动和空气的影响,因此,这种共光路波带板干涉法能够实现现场检测.

在实际的加工检测中,对于同一类型的被测元件,光路和波带板都是固定的,只需要将被测原件置于测量位置,通过干涉的方法,CCD接收并用计算

机处理.检测工作简单并能达到要求的检验准确度.由于波带板的设计制作成本低,光路实现简单,而且干涉图能很好的反映被测面的面形,所以此方法很适用于实际的加工检测中.对于批量生产的非球面元件具有很高的实用意义^[3].

1 测量原理

如图1,波带板(Modified Zone-Plate, MZP)是整个干涉系统的中心元件.波带板具有类似透镜的性质,有成像功能,并具有多组共轭成实像和虚像的焦点.在干涉仪光路中,波带板位于被测面曲率中心之前.

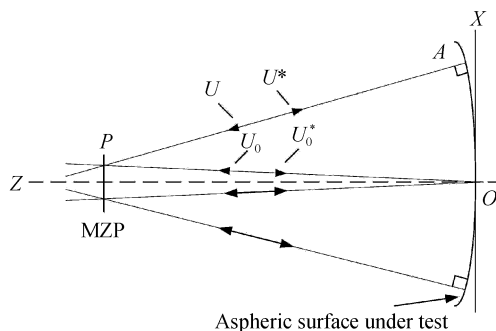


图1 波带板干涉原理
Fig.1 Schematic diagram of Zone plate interferometer

设振幅透过率为 $H(p)$,如图1,用式(1)给出

$$H(p) = |U(p) + U_0(p)|^2 \quad (1)$$

式中 P 为 MZP 上任意一点, U 是完好非球面上的等位相面,用 $A \rightarrow P$ 表示进行的光波, U_0 从 O 点出发,用 $O \rightarrow P$ 表示球面波, $U_0^*(p)$ 表示复共轭.如果 $U(p)$ 及 $U_0(p)$ 的振幅大小一定

$$U(p) = \exp\{i\varphi(p)\}, \varphi(p) = k[AP] \quad (2)$$

$$U_0(p) = \exp\{i\gamma(p)\}, \gamma(p) = k[OP]$$

式中, $k = 2\pi/\lambda$, λ 为中空中波长, $[\]$ 表示光程.对于

^{*} 陕西省教育厅专项科研计划(08JK314)和西安工业大学校长科研基金(XAGDXJJ0991)资助

Tel: 029-86173143

Email: quanguiqin@sina.com

收稿日期: 2010-01-12

修回日期: 2010-01-12

完好的非球面上任意点 A , $\varphi(A) = 0$, 即 $U(A) = U^*(A) = 1$; $U^*(r)$ 与 $U(r)$ 具有同一面形.

检测波为

$$\begin{aligned} U^*(p) \rightarrow U^*(A) &\equiv U(A) \rightarrow U(p) \\ U^*(A') &\equiv U^*(A) \exp(-ik\Delta) \end{aligned} \quad (3)$$

带有被检测面形误差的检测波

$$U_t(A) = U(A) \exp(-i2k\Delta) \quad (4)$$

U_r 作为参考波, 则干涉条纹可以表示为

$$I(A) = |U_t(A) + U_r(A)|^2 \quad (5)$$

图 2 为波带板干涉法干涉系统结构图, 如图, 激光点光源通过透镜 L_2 成像于被检测面中心. 入射光中由 MZP 产生的 -1 次衍射成分再现所要求的非球

面波, 扩大到全部的被检测面. 也就是说当被检测面完好时这个再现波面和被检测面重合. 因此, 反射波和入射时有同一的波面形状, 沿原来的光路逆行, 返回到 MZP 处, 它的零次衍射成分被取出, 这个 $(-1, 0)$ 成分提供了检测波面. 另一方面, 会聚在被检测面中心的 0 次成分, 不受表面面形的影响而反射, 通过 MZP 后取出它的 $+1$ 次衍射成分, 这一 $(0, +1)$ 成分再现了与完好检测波相同的非球面波, 用来作为标准的参考波. 检测波面和参考波面发生干涉后, 通过透镜 L_1 会聚, 经过空间滤波器后, CCD 可以采集到带有被检测面形误差的干涉条纹.

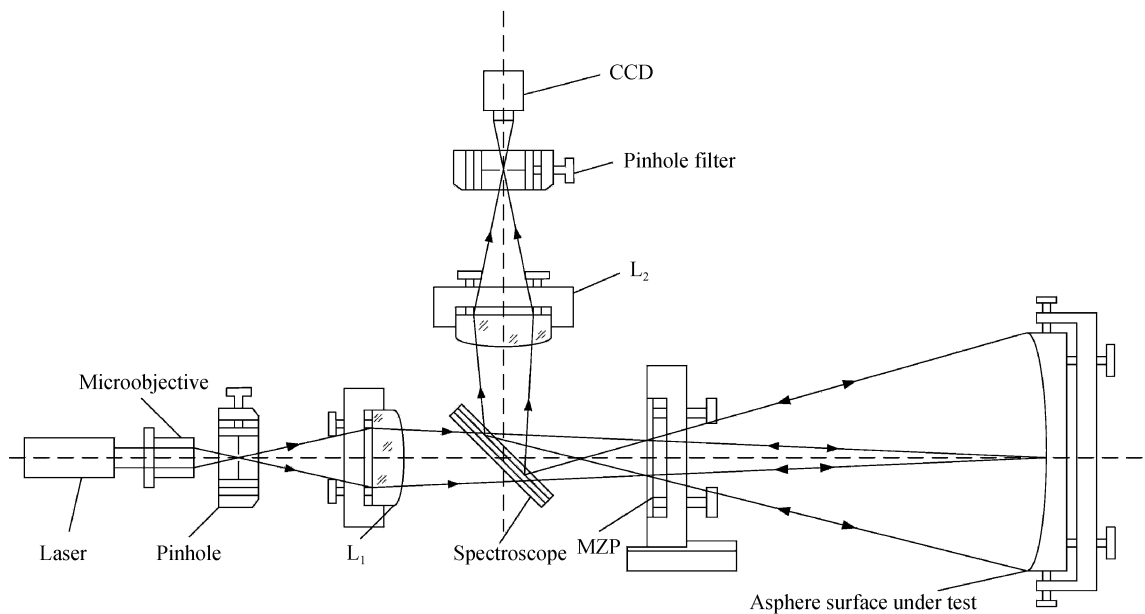


图 2 波带板干涉法干涉系统结构

Fig. 2 Architecture diagram of MZP interference system

采集的干涉条纹如图 5, 用基于坐标变换的条纹中心法对其进行处理, 得到面形误差 PV 值和 RMS 值^[4].

实验步骤: 1) 根据被测双曲面的面形参量, 计算波带板参量值. 2) 按照波带板参量加工波带板. 3) 构建干涉系统, 采集干涉条纹. 4) 经条纹处理, 得到面形误差值. 5) 误差结果分析.

2 波带板的设计与制作

波带板的制造采用计算全息术. 用计算机算出波带板的参量, 然后控制绘图仪将其放大一定的倍数后再绘出, 再经照相、精缩后, 即可得所需的波带板. 在实际制作过程中, 采用了电子束直写技术, 在铬版玻璃上一次将波带板直接刻出.

图 3 给出了检测二次曲面时检测波和参考波的光路图. 以被检测面的中心 O 作为 x - y - z 坐标系的原点, 以 Z 轴作为光轴, MZP 放在点 $Q(0, z)$ 处, 与光

轴垂直相交的面内, 由于全系统对 z 轴回转对称, 所以只需讨论 x - z 平面即可. 图中只给出了 $x \geq 0$ 的范围. 表示物体面和 MZP 面的坐标分别设定为 (ξ, ζ) 和 (x, z) .

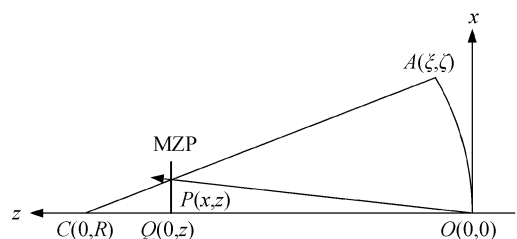


图 3 检测二次曲面时检测波与参考波光路

Fig. 3 Examines when the quadratic surface examines the wave and the reference wave optical configurations

设被检测面的顶点曲率中心为 $C(0, R)$, 面上一点 $A(\xi, \zeta)$ 的法线和 MZP 面的交点为 $P(x, y)$. 经推导可得, 用于回转对称的二次曲面的 MZP 的计算公式为

$$x_n = \frac{R-z}{R} h \sqrt{V_n} + \frac{R-ez}{2R^3} h^3 V_n \sqrt{V_n} \quad (6)$$

$$\begin{cases} V_n = (b/2a) [\sqrt{1 \pm (4a/b^2)n} - 1] \\ a = \frac{4R^2 - (2+3e)Rz + z^2}{8z\lambda} (h/R)^4 \\ b = \frac{R(R-z)}{2z\lambda} (h/R)^2 \end{cases} \quad (7)$$

式中, x_n 为 MZP 第 n 带的中心半径, 式中的正负号, $R > z$ 时取正, $R < z$ 时取负, h 为被测面口径的一半.

MZP 各带的内外周半径, 用 $n-q, n+q$ 带入可求, MZP 波带数以及最小带间距为

MZP 的波带数 N 为

$$N = |a+b| \approx \left| \frac{R-z}{32F^2\lambda} + \frac{3(1-e)h}{8(4F)^3\lambda} \right| \quad (8)$$

式中

$$F = R/4h \quad (9)$$

最小带间距 d_n 为

$$d_n = |x_n - x_{n-1}| \approx 4F\lambda/R \approx 4F\lambda \quad (10)$$

可以看出, d_n 与非球面的种类无关, 仅取决于 F 值.

如图 4, 这是加工后的波带板, 它是由一组半径为: $\rho_k = \sqrt{k\lambda r}$ 的同心圆构成的明暗相间的环带, 其中 k 为正整数, λ 为光的波长, r 为焦距, 各半波带的半径正比于序数 k 的平方根. 波带板能使点光源成一实像, 具有类似透镜成像的性质, 其物距和像距所遵从的关系和透镜的物像公式相仿^[3].

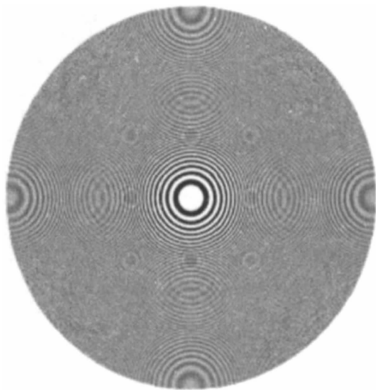


图 4 加工成型的波带板
Fig. 4 Machine-shaping MZP

3 实验及结果分析

实验中, 使用一块双曲面, 参量为: $R=103.26$ mm, 口径 $D=40$ mm, MZP 放在被测面曲率中心后面, 取 $R-Z=13$ mm. 根据式(6~10), 编写计算机程序得到 MZP 的参量为: 波带数 $N=220$, 直径 $R=3.66$ mm, 最小带间距 $d_N=5.227 \times 10^{-3}$ mm.

按图 1 安放各元件, 先调整被测面使光轴垂直于其中心, 再调整成像透镜 L_1 , 使入射光汇聚于被

测面中心, 为了便于检测不同的非球面, 成像透镜 L_1 应放置于三维调整的光具座上. 完成这一步骤后, 放置 MZP, MZP 也应放置于三维调整的光具座上. 然后在三维方向上调整 MZP, 直到出现干涉条纹或亮斑为止. 调整好 MZP 后, 在透镜 L_2 前方找到光束会聚点, 并在此处放置滤波器.

如图 5, W_I 为测量得到的干涉条纹, W_{II} 为滤波、二值化后的干涉条纹, 分别对应于图 5 中(a)和(b).

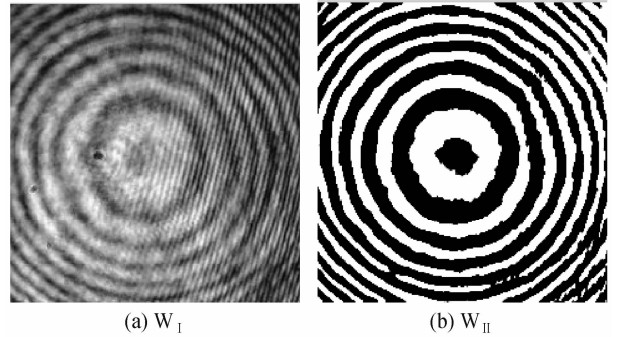


图 5 测量得到的干涉条纹以及滤波二值化后的条纹
Fig. 5 Interference fringe for measurement, filtered and binarization

本文采用基于坐标变换的条纹中心法对采集的干涉条纹进行处理, 对干涉条纹进行中心选取、坐标变换、细化、赋值、采点和泽尼克波面拟合, 如图 6, W_{III} 为被测面的真实相位, W_{IV} 为去离焦、倾斜后的

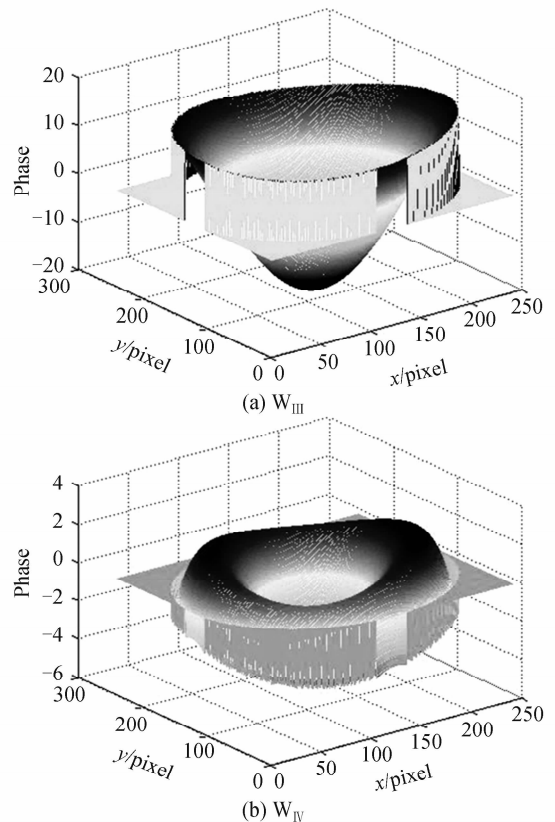


图 6 泽尼克拟合相位图及去离焦、倾斜后的相位图
Fig. 6 Phase scheme of Zernike polynomial fitting

相位图,分别对应图6(a)和(b).由此可得到被测双曲面的PV值为 0.4036λ ,RMS值为 0.06243λ .

为了证明该方法的正确性,用泰勒-霍普森轮廓仪对同一双曲面进行检测,由于被测双曲面由精密车床旋转车出,该双曲面旋转对称,轮廓仪触针从任意方向划过双曲面中心就能实现准确检测.如图7为轮廓仪对被测双曲面检测的结果.

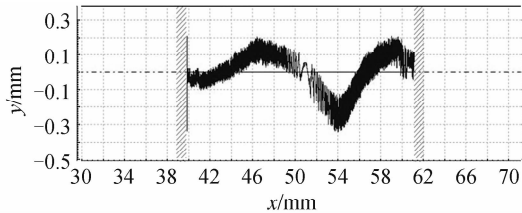


图7 轮廓仪对被测双曲面检测

Fig. 7 Measurement of aspheric surfaces by Taylor-Hobson

表1 波带板干涉法与轮廓仪结果比较

Table 1 Measurements comparison of Zone plate interferometer and Taylor-Hobson

	Zone plate	Taylor-Hobson
PV/ λ	0.403 6	0.389 2
PV bias/(%)	3.7	
RMS/ λ	0.062 43	0.054 68
RMS bias/(%)	1.4	

由表1可知,波带板干涉法与轮廓仪测量结果接近,PV、RMS相差分别仅为3.7%和1.4%.

表2 CCD分辨率对调解结果的影响

Table 2 Influence of CCD resolution to the result

CCD resolution	PV/ λ	RMS/ λ
320×240	0.494 5	0.701 2
512×512	0.403 6	0.062 43

由表2可以看到,随着CCD分辨率的增大,相位解调后的误差也随之减小.在实际的测量过程中,可以选择分辨率合适的CCD进行测试,以满足测量需要.

表3 空间滤波器针孔大小对调解结果的影响

Table 3 Influence of pinhole to the result

Pinhole/ μm	PV/ λ	RMS/ λ
20	1.246 5	0.346 5
10	0.934 8	0.103 4
5	0.403 6	0.062 43

由表3可知,空间滤波器针孔越小,扩束后的激光越均匀,干涉条纹越清晰.采用合适的滤波器,对采集清晰的干涉条纹、降低系统误差有很大帮助.

4 结论

1) 实验结果与轮廓仪对同一被测面的检测结果接近,证实了本方法的可行性. 2) 检测光和参考光在同一光路中,干涉条纹可以免受振动和空气的影响,因此,这种共光路波带板干涉法能够实现现场检测. 3) 波带板的设计制作成本低,光路实现简单,而且干涉图能很好的反映被测面的面形,所以此方法很适用于实际的加工检测中.对于批量生产的非球面元件具有很高的实用意义.

参考文献

- [1] CHENG Hao-bo, WANG Ying-wei. Research on testing technology for aspheric[J]. *Aviation Precision Manufacturing Technology*, 2004, **40**(4): 8-10.
程颖波,王英伟.非球面零件光学检测技术研究[J]. *航空精密制造技术*, 2004, **40**(4): 8-10.
- [2] ZHANG Bin, WANG Ming, MA Li. Optical testing technique for aspherical surface[J]. *Journal of Nanchang University*, 2003, **25**(2): 51-54.
张斌,王鸣,马力.非球面的光学测试技术[J]. *南昌大学学报*, 2003, **25**(2): 51-54.
- [3] QUAN Feng-xian, XIN Qi-ming. Zone plate interometer for testing aspheric surfaces[J]. *Optical Technology*, 1998, **3**(3): 34-37.
全奉先,辛启明.波带板法检测非球面技术[J]. *光学技术*, 1998, **3**(3): 34-37.
- [4] LIU Zhong-ben, QUAN Gui-qin, TIAN Ai-ling. Optical interference measurement technique [M]. Xi'an: Shaanxi People's Publishing House, 2002.
刘中本,权贵秦,田爱玲.光干涉测试技术[M].西安:陕西人民出版社, 2002.
- [5] KAN Shan-shan, WANG Shu-rong. Methodological disquisition of spherical fine metrical precision [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(2): 195-198.
阚姗姗,王叔荣.高准确度检测球面面形的方法研究[J]. *光学学报*, 2005, **25**(2): 195-198.
- [6] MIAO Run-cai, SHI Jian, ZHAO Xiao-feng. Determination of the attenuation coefficient of surface acoustic wave by means of the light interference[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(3): 382-385.
苗润才,时坚,赵晓凤.干涉法测量低频表面波的衰减系数[J]. *光子学报*, 2005, **34**(3): 382-385.
- [7] WEI Zi-hua, SHEN Wei-xing. A new method for calculating asphericity of optical aspheric surface [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **36**(4): 730-732.
韦资华,沈卫星.一种新的光学非球面度计算方法[J]. *光子学报*, 2005, **34**(3): 382-385.
- [8] WANG Xiao-kun, WANG Li-hui, ZHANG Xue-jun. Test of weak aspheric surface by real-time interferometry[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, **16**(2): 184-189.
王孝坤,王丽辉,张学军.干涉法实时测量浅度非球面技术[J]. *光学精密工程*, 2008, **16**(2): 184-189.

Zone Plate Interferometer for Testing Hyperboloid

QUAN Gui-qin¹, WANG Gang², NIE Liang²

(1 School of Technical Physics, Xidian University, Xi'an 710071, China)

(2 School of Optoelectronic Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710032, China)

Abstract: An interferometer is designed based on the schematic of zone-plate with a total optical path to test aspheric surfaces. The MZP is designed and manufactured through testing a hyperboloid, of which radius of curvature R is 103.26 mm and caliber D is 40 mm, writing program based on coordinate transformation stripe center method to process the interference fringe. Compared with results of identical hyperboloid tested by Taylor-Hobson, the method is confirmed feasible and advanced.

Key words: Aspheric surface testing; Zone plate; Interference



QUAN Gui-qin was born in 1958. He is a professor, and his research interests focus on optical measurement.