

文章编号:1006-0456(2002)02-0051-04

非球面的光学测试技术

张斌¹,王鸣²,马力²

(1. 南昌大学机电学院,江西 南昌 330029;2. 南昌大学数理学院,江西 南昌 330047)

摘要:介绍非球面及其相关知识,讨论了非球面光学检测的研究现状.按照测量原理的不同,对干涉法、阴影法、激光扫描法等几类典型的非球面测试技术进行了分析.通过比较各种方法的优缺点和适用范围,提出了在线检测小型非球面的研究方向.

关键词:非球面;光学测试;干涉测试法

中图分类号:433.1 **文献标识码:**A

非球面元件本身的特性决定了它对面形精度要求很高,在生产和科研中对其进行精确的加工、检验就显得十分重要.非球面的制造经历了玻璃研磨法、玻璃模压法、复合型法,今天已发展到大量采用塑料模压法.伴随着计算机、机械、电子技术的进步,又出现了离子束加工法、电子束加工法、数控磨削研磨抛光法等特种加工工艺.满足人们特殊需要的非球面镜片的设计与加工已不再是任何问题,其测试问题倒日益成为非球面推广应用需要很好研究解决的一大难题.

1 非球面及其相关知识

非球面是相对于标准球面来定义的.球面是指具有无数个对称轴的光学表面,它由一个参数,即球面半径决定其形状.非球面理论上可以由多个参数决定其面形,并能从中心到边缘连续发生变化.非球面按照有无回转轴可以分为两类:一类是具有一个回转轴,例如抛物面、椭球面等;另一类没有回转轴,如离轴抛物面等.非球面度是指某一非球面和一个比较球面在沿光轴方向的偏差.一般总希望非球面度尽量小,因此要选择一个“最佳参考球面”,这是与非球面在顶点及边缘接触的一个球面.“最佳参考球面”对于非球面有很重要的意义:它可以用于非球面加工的初级坯形;检测时,也要参照它确定被测面的非球面度.

球面镜具有加工简单、成品率高、易于批量生产等优点.但球面镜在光学性能上存在缺陷,单独成像时往往伴随有无法克服的各种光学相差,它是由于成像体系中焦点不一致而造成系统误差,这就大大降低了成像质量.采用一系列的透镜组可以使上述问题得以解决,但同时增加了系统的体积和造价,使结构变得复杂.于是,非球面镜就成为一个理想的选择,将非球面放在系统中合适的地方,就能把球面的像差做完全的校正,使平行入射的光成像在一点,提高分辨率和反差.由此看来,非球面相对于球面具有光学系统设计灵活、像质更高、系统结构更加简洁等优点,促使其应用日益广泛.

2 非球面测试技术

在非球面光学元件的加工和实验中,对其表面面形的精确测量是非常重要的:从某种意义上说,没有与加工精度相适应的高精度检测方法及仪器,非球面的精密和超精密加工就难以实现.因此,实际操作中往往要求测量方法达到 ~ 10 nm的精度.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.由于非球面不同于球面,其面形千变万化,以上各种检测方法都有各自的优缺点,都有其局限的测量对象.因此,开发精确、简单、适用性广的测试方法仍是科研工作者不断努力的目标.

2.1 干涉法

干涉法是一种短时间测定整个非球面的方法,它以其灵敏度高,加之补偿器、计算全息、移相、销相、外差、条纹扫描等先进技术^[1]的出现,一直是检测非球面的主要途径.

收稿日期:2002-07-05

作者简介:张斌,男,1978年生,硕士研究生.

2.1.1 传统干涉仪法^[1]

传统干涉仪法的测量装置一般采用泰曼——格林干涉仪,通过用非球面镜代替原干涉仪一臂上的平面反射镜,来达到反映非球面面形并产生干涉条纹的目的.使用传统干涉仪法往往要加装补偿镜,这是由几个特定透镜排列而成的透镜组.补偿镜置于待测面前,把一平面波或球面波转化为非球面波前,使之与被检非球面的理论形状重合.入射光线反射后,全部按原路返回.但由于非球面存在面形误差,所以事实上再次由补偿器出射的会聚光波是带有非球面表面偏差信息的波前,这样的检测光与由平面镜反射的参考光发生干涉.用三干涉图法处理,由公式(1)可求出干涉图上任意一点的波差,它即对应于非球面上该点处的面形误差.

$$\omega_0 = \frac{\omega}{2} = \frac{1}{2k} \arctan(2c - 1) \quad (1)$$

其中 ω 为参考光与物光间的波差, ω_0 为被检面的实际波差, $k = 2\pi/\lambda$, $c = \frac{1 + \tan k\omega}{2}$.

传统干涉仪法的不足是需要设计和装配复杂的补偿镜,而且不易实现对深度非球面的测量.一种新颖的测量中、大倾角偏差的方法^[2-3]在传统干涉仪的基础上发展起来,它的特点是将被测元件浸入液体或液晶中进行补偿.液体补偿容器由 5 块玻璃平板组成,其中的两块工作面平板通过磨光和抛光而具有很高的光学质量,它们的平行误差和表面误差可以被忽略.容器中的液体通常是由两种易混合的化合物混合而成,被测面的折射率介于两种混合液体的折射率之间.实验时将测试元件浸入液体容器中,并使其处于泰曼——格林干涉仪一臂的中间.调整两臂上的反射镜,直到恰好可以看到干涉条纹,这时的条纹可能在测试元件边缘处非常密集.向容器中加入其中一种液体,当混合液体的折射率达到一个合适的值时,就可以获得容易清楚分辨的干涉条纹.

2.1.2 全息干涉法

计算机生成全息图(CGH)干涉原理^[4]是用 CGH 作为全息样板,可再现各种标准非球面波面,与被测非球面波面进行比较干涉获得带有被测面面形偏差信息的干涉图,对之进行处理即可实现对各种非球面面形偏差的高精度 CGH 干涉测量.通过对 CGH 干涉系统进行理论和实验分析可知,CGH 干涉场为不定域干涉场且对其进行处理可与处理一般干涉场相似,因此可以把 CGH 干涉技术与相位探测技术结合起来,再加之数据采集和处理系统,实现对非球面自动、实时的高精度测量.为了应用 CGH 代替非球面标准波面,实际测量中采用干涉型纯相位计算全息图,它实际上为包含有一个倾斜平面波和一个非球面理想标准波前干涉信息的二元全息干涉图.若被测面存在面形偏差,则将反映在干涉条纹的弯曲程度上.由于全息图的质量很容易达到 $\lambda/100$,所以应用全息技术测得的结果精度也较高.

2.1.3 散射板和波带板干涉法

这两种方法都是通过共路干涉仪实现的零测试方法,系统结构简单,充分保留和利用了波带板和散射板的特点.由于干涉条纹不受空气和振动的影响,因此可以实现现场检测.

散射板分束器是一种利用特种工艺制作的弱散射体,会聚入射光束经散射板后呈透射和散射两种成分,它们经被测镜反射,第二次经过散射板后就会出现 4 种成分的光:透射——透射光(DD 光),散射——散射光(SS 光),透射——散射光(DS 光),散射——透射光(SD 光).满足干涉条件的参考光 DS 光和测量光 SD 光在屏上迭加,呈现干涉条纹.

一个波带板具有类似透镜的性质,有成像的功能,并具有多组共轭成实像和虚像的焦点,这就是波带板应用于双焦点干涉仪中的理论基础^[6].实验装置的光路如图 1 所示.点光源经透镜 L_1 成像在被测面的中心,标准波带板放在光轴上被测面曲率中心的前面.入射光中的 MZP 产生的 -1 次衍射成分再现所要求的非球面波,扩大到全部的被测面.反射波沿原来的光路逆行,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,会聚在被测面中心的零次成分,不受表面形状的影响而反射,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

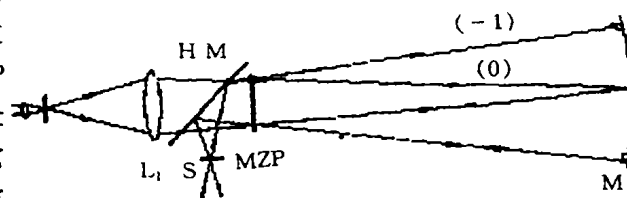


图 1 波带板干涉法原理

面波,用来作为标准的参考波.通过空间滤波器后,可以观察到包含了被测面面形误差的干涉条纹.随后进行条纹处理和面形拟合.

2.1.4 剪切干涉法

在各种干涉方法中,剪切干涉技术由于不需要标准参考波面,并且灵敏度可调,因此特别有利于测量与球面相差较大的非球面.但剪切干涉图体现的不是被测波面的形状,而是波面形状差分,因此在判读和分析剪切干涉图时不如其他干涉法那样简单直观,需要复杂的数学处理.按剪切方向来分类,现存的剪切法可以分为横向剪切、径向剪切、旋转剪切、反转剪切.剪切干涉法的核心部件是剪切发生装置,它的作用是利用双折射晶体或波带片等元件的特性产生相干光.以横向剪切干涉原理^[7]为例,入射光线被非球面反射,带有被测面形信息的光波经过冰洲石晶体横向剪切分开成距离为 s 的两束光 B_1 和 B_2 ,这两束光将在重叠区产生干涉,如图 2 所示.设原始光波即 B_1 波前为 $\omega(x, y)$, B_2 波前为 $\omega(x - s, y)$, $P(x, y)$ 是波面上任意点,重叠区干涉强度为

$$I(x, y) = I_0(x, y) + I_1(x, y) \cos(k\Delta\omega(x, y) + d) \quad (2)$$

式中, $\Delta\omega(x, y) = \omega(x, y) - \omega(x - s, y)$; $k = 4\pi/\lambda$; d 为剪切过程引起两束光的光程差; $I_0(x, y)$ 和 $I_1(x, y)$ 分别是平均光强和调制光强.再利用移相技术得到干涉图进行分析处理.

2.2 阴影法

阴影法主要观察阴影分布的图形和阴影图的明暗对比.这种方法设备简单,对于某些二次曲面测量方便,适于现场检验.但存在主观、定量困难、灵敏度欠高等缺点.

2.2.1 刀口法

刀口法是被较早使用的非球面检测方法,它通过用刀口切割光源得到阴影图.阴影图决定了波面形变类型,明暗对比决定了波面形变的大小.刀口切割中半明半暗的交界部位,标志着波面的最高处和最低处,或者说是峰点和谷点.刀口检验的光源形状,可以用点孔,也可以用狭缝.用点孔检验精度较低,用狭缝则较高.灵敏度在刀口切割方向最高,在平行刀口方向为零.根据亮度分布判断波面高低部位,特别有效,尤其是有浮雕感觉,显得很直观.

2.2.2 光阑法^[8]

将一个小的圆形光阑放在最佳比较球面的曲率中心,利用正透镜从曲率中心点出发散光束,那些从非球面中心部分射出的光线将被阻挡,而那些从与球面有明显偏移部分出射的光将会通过.这里的中心部分叫做球面部分,它的实际大小取决于圆盘的直径,而偏移的部分叫做非球面部分.用这种方法可以得到一幅测试表面的图像.图像中的暗区域代表测试表面的球面区域,明区域表示非球面部分.通过几何关系推导出反射光线与测试表面面形的关系式,由此便能够预先得到一幅具有亮暗区域的图像,并认为它反映了一个完全理想的表面形.对于测试得到的图像,与预期图像的任何偏差都表明测试表面上有误差.

2.3 激光扫描法

这是一种用激光束对非球面进行逐点测量进而拟合面形的方法.它通用性强,可以测量各种非球面,而且是对被测面进行绝对测量,精度高;缺点是相应的数据处理比较复杂.激光扫描的方式有平移法、旋转法,以及平移旋转法.图 3 为平移旋转法测量原理^[9],测量时,先将被测件顶点调到测角仪转轴 O 上,使激光束通过其光轴,然后按一定步长转动 θ 角;再移动安装在一维读数工作台上的激光器(即平移激光束),直至光线通过非球面某一点法线沿原路返回为止,移动距离为 s .用解析几何和积分原理推导出非球面上的点坐标与 θ 和 s 之间的关系式:

$$\begin{aligned} x_i &= s_i \cos\theta_i + \sin\theta_i \int s_i d\theta \\ y_i &= -s_i \sin\theta_i + \cos\theta_i \int s_i d\theta \end{aligned} \quad (3)$$

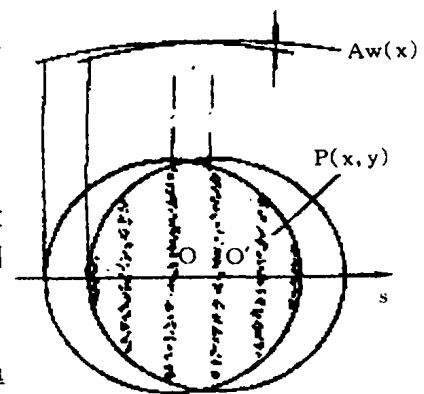


图 2 剪切干涉原理

只要用测角仪和位移计测出待测点的 θ 和 s 值,即可由(3)式计算出 x 和 y 值,进而可拟合出被测面形并求出面形误差。

3 总结与讨论

非球面的检测是一项复杂的精密测试技术,它需要结合并运用光学、电子、机械、计算机等许多领域的知识和技术。已知的测量方法并不完善,每种方法都有优缺点,都有其适用的测量对象。阴影法对环境的亮暗条件要求较高,而且测量结果受主观影响大,所以一般适用于对面形误差的定性判断,用于定量计算则精度低;激光扫描法虽然可以达到高精度,但数学处理复杂,而且对机械部分有较高的要求;相比较而言,干涉法的理论、技术最为完善,测试范围最广。

传统干涉法需要加装补偿器,这使得光学设计和系统结构变得复杂,并且由于分光路干涉理论的限制,此法只适合在实验室里使用;波带板法和 CGH 法虽然结构新颖,精度较高,但对于不同的测试对象需要设计制作不同的波带板和全息模板,使得这两种方法不具备通用性。因此,不需要参考波面的共光路剪切干涉法就成为离开实验室、走向现场检测的最佳方法。剪切装置^[10]由前后平行放置的两片波带片组成,通过他们使相干光的一个波前相对于另一波前进行缩限或扩展,进而在成像的中心区域相互重叠干涉,得到干涉图后通过图像处理 and 傅立叶变换拟合面形。由于波带片同时起到透镜和分光器的作用,所以,带有波带片的干涉仪可以做到足够小,以便加装到机器上。

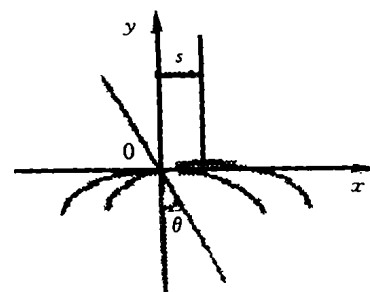


图3 平移旋转法

参考文献:

- [1] 王文先. 泰曼——电视——微机系统非球面面形测试[J]. 长春光学精密机械学院学报, 1997, 20(4).
- [2] Zhisheng Yun, Zhongben Liu, Yulin Li. Aspheric Surface Testing With a Liquid Compensatory Interferometer[J]. Opt. Eng, 1998, 37(4).
- [3] Zhisheng Yun, Yee Loy Lam, Yan Zhou, Yulin Li, et al. Simple Technique For Testing Deep Aspherical Surfaces[J]. 1999, 38(4).
- [4] 戴晓芳. 提高计算全息检测非球面精度的研究[J]. 中国激光, 1996, 23(1).
- [5] 李月强, 杜玲, 施涌潮. 双波长全息干涉术在非球面测量中的应用[J]. 光电子激光, 1996, 7(4).
- [6] 全奉先, 辛企明. 波带板法检测非球面技术[J]. 光学技术, 1998, (3).
- [7] 刘晓军, 章明, 李柱. 共路移相剪切干涉仪的研制[J]. 华中理工大学学报, 1999, 27(3).
- [8] Andrianto Handojo and Hans J. Frankena. Testin Aspheric Surfaces: Simple Method With a Circular Stop[J]. APPLIED OPTICS, 1998, 37(25).
- [9] 张晓青, 祝连庆, 董明利. 一种测量非球面光学零件面形的新方法[J]. 工具技术, 2001, 35(4).
- [10] Tsuguo Kohno, Daiji Matsumoto, Takanori Yazawa, Yutaka Uda. Radial Shearing Interferometer For in-process Measurement of Damond Turning[J]. Opt. Eng, 2000, 39(10).

Optical Testing Technique For Aspherical Surface

ZHANG Bin¹, WANG Ming², MA Li²

(1. Department of Machine and Electricity, Nanchang University, Nanchang 330029, China

2. Department of Physics and Mathematics, Nanchang University, Nanchang 330047, China)

Abstract: This paper introduces the status of optical testing technology aspherical surface for aspherical surface. Some typical methods are summarized and generalized, including interferometry, shadow method and laser scanning method. The principle of each method is analyzed in detail. On the base of comparing advantages, disadvantages and applying scope of all methods, the project for on-line measurement of small-scale aspherical surface is presented.

Key Words: aspherical surface; optical testing; measure of interferometry