数字化技术在玻璃表面检测系统中的应用

莫卫东[1]，　高伯龙[2]
(1. 空军工程大学 工程学院，陕西 西安　710038;2. 国防科技大学 应用物理系，湖南 长沙　410073)

摘　要:通过把传统光学方法与现代数字化图像技术相结合,运用先进的数字化图像处理手段和Zernike多项式拟合干涉波面方法进行干涉图像的计算,并应用自己在理论研究上的突破,从而可快速准确测量出光学平面玻璃表面的平整度以及对其它技术指标的定量评定。利用本研究所架构的光学平面玻璃表面检测系统的精度达到了λ/100,灵敏度为λ/1000。

关键词:干涉仪;数字图像处理;Zernike多项式拟合;平面玻璃表面
中图分类号:O436.1　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1009-3516(2000)05-0001-04

在研制激光陀螺中,环型激光器里的反射镜是一个至关重要的器件。它的质量高低从根本上决定了激光陀螺的性能。因此,为了全面深入地研究激光反射镜片的制造工艺、方法、材料以及反射镜的玻璃基片的高质量加工手段,建立一套严格的高精度检测系统是十分必要的,本文所研究并建立的用干涉方法对光学平面玻璃表面检测系统是其中的一部分。近年来,数字化图象技术在干涉分析中的应用,使干涉方法在光学表面的精密测量的精度以及自动化程度大大提高,我们正是利用这一技术,发挥现有仪器的潜力,实现了对激光陀螺用反射镜玻璃基片平整度的高精度测量以及表面局部误差的检测分析。

1　数字化玻璃表面检测系统

1.1　光学干涉方法对玻璃表面检测技术的现状

在很多高新技术的应用中,对光学元件的加工精度要求越来越高,传统的人工判读干涉条纹变化的方法的最高精度也只能达到λ/10,因而人工判读方法已远远不能满足精密光学加工精度的要求,必须寻求一种客观性好精确度高的光学表面质量检测手段。目前国际上所推崇的方法之一,就是通过计算机数字化技术来解析传统方法所得到的标准面与被测面的光干涉条纹图象,从中获得被测表面信息,达到快速高精度自动化测量光学元件表面质量的目的。这类仪器的最大特点就是在计算机的控制之下,对干涉图象实现光、电、机自动化的混合处理,做到精度高且速度快。根据产品说明书介绍,这类仪器对光学平面的测量精确度可以达到λ/50左右,加上后期的一些处理,理论上精度可以达到λ/100,而实际上作者在调研中所看到的最高精度为λ/40。我们的目标是在现有仪器设备的条件下,研制一套精度在λ/100的数字化光学玻璃表面检测系统。

1.2　数字化玻璃表面测量系统的集成

数字化玻璃表面测量系统由四个部分构成:干涉系统、数字化图象处理系统、计算机系统、输出系统。

干涉系统:它是整个测量系统的核心。采用的是上海光机所研制的PGB－J4型激光平面干涉仪,它是目前国际上普遍使用的一种用于玻璃平面高精度测量的干涉仪器。

数字化图象处理系统:该系统的功能就是把干涉仪所产生的光学干涉图象的数字化,其核心是插在计算机中的图象采集卡以及相应的控制分析软件。它负责将摄象机送来的光学干涉图象视频模拟信号,经过A/D转换,使干涉图像数字化。在该系统中还包括摄像机和图像监视其器。

计算机系统:计算机系统是整个检测系统的控制中枢,除了用于完成对干涉图象进行分析与计算的工作外,还担负着对整个检测系统实时控制任务,如摄像机的控制和图像采集动作等。

收稿日期:2000-08-30
基金项目:国家"863"激光陀螺研制项目
作者简介:莫卫东(1959-),男,广西合浦人,副教授,主要从事应用光学研究.
高伯龙(1928-),男,广西岑溪人,中国工程院院士,主要从事激光陀螺研究.

输出系统:指把测量结果进行输出的设备,如计算机显示器和打印机等。

2 系统核心技术——干涉波面的Zernike多项式拟合

当把上述各个子系统搭建组合成一个整体系统之后,随后主要的工作有两项:一是通过计算机实现对系统中各个设备的控制;二是对得到的干涉条纹图像进行数字化处理和数学计算,以得到想要得到的信息与结果。虽然,整个的程序设计相当复杂,而系统的核心部分——干涉条纹图像的数字化处理以及拟合分析不是仅仅掌握程序设计方法可以完成任务的,这部分工作是本研究的重点内容与关键部分。

2.1 Zernike多项式拟合干涉波面原理

计算机控制下的数字化图象技术对干涉图象的处理不仅可以做到大量多点采样,而且准确性,可靠性也可以达到较高的水平。然而,只有对采样到的大量离散数据点进行有效的数学处理,才能得出所想得到的结果并进行更加深入的分析。所谓对干涉条纹离散数据点的数学处理,就是要把着这些代表着被测表面信息的离散点拟合成一个与实际的干涉波面尽可能一致的数学上的波面函数,这正是数字化技术中最为关键的部分,否则,随后的各种检测与分析都将无法进行。

在光学表面检测的绝大多数情况中,被测光学玻璃表面或光学系统的出射光波面总是趋于平滑和连续的。因此,这样的波面函数一定可以表达成为一个完备的基底函数的线性组合。在众多类似的研究中,许多研究者曾选择过许多不同类型的基底函数拟合光学干涉波面[1]。不过,在光学测量问题中最终都选择了Zernike多项式作为对被测光学波面拟合的基底函数系,原因是Zernike多项式对光学波面的拟合精度最高,并具有以下特点:

(1) Zernike多项式在单位圆上正交,即

$$\int_0^l\int_0^{2\pi} Z_n^l(\rho,\theta)Z_m^k(\rho,\theta)\rho\mathrm{d}\rho\mathrm{d}\theta=\begin{cases}\dfrac{\pi}{n+1} & (n=m, l=k)\\ 0 & (n\neq m, l=k)\end{cases} \tag{1}$$

式中,$Z_n^l(\rho,\theta)$和$Z_m{}^l(\rho,\theta)$为Zernike圆多项式 。当$l=0$时,$\delta=1$;当$l\neq 0$时,$\delta=0.5$ 。

由于一般被测光学器件或光学系统都具有圆形光瞳或圆形的通光孔,经过归一化后正好为单位圆,因此Zernike多项式所具有的这种单位圆上的正交性恰好满足圆形光瞳的特点,而且Zernike多项式的正交性使拟合多项式的系数能相互独立,从而避免了系数之间的偶合造成其物理意义的混淆不清。

(2)Zernike多项式自身所特有的旋转对称性,使之对光学问题的求解过程中一般均具有良好的收敛性。

(3)Zernike多项式与初级象差有着一定的对应关系,并且与光学设计中的惯用的Seidel象差[2~3]函数很容易建立起联系,这也是以前为什么光学象差分析中常用到Zernike多项式的原因。

Zernike多项式用极坐标的具体表达为

$$Z_n^l(\rho)=R_n^l(\rho)\cdot\Theta_n^l(\theta) \tag{2}$$

式中,n为多项式的"阶",取值为0,1,2,…;l为与阶数n相关的序号,l的值恒与n同奇偶性,且绝对值小于或等于阶数n。令$l=n-2m$ ($m=1,2,3,\cdots,n$),则

$$R_n^l=R_n^{2-2m(\rho)}=\begin{cases}\displaystyle\sum_{s=0}^{m}(-1)^s\frac{(n-s)!}{s!(m-s)!(n-m-s)!}\cdot\rho^{n-2m} & (n-2m>0)\\ R_n^{|n-2m|} & (n-2m<0)\end{cases} \tag{3}$$

$$\Theta_n^l(\theta)=\Theta_n^{n-2m}(\theta)=\begin{cases}\cos[(n-2m)\theta] & (n-2m>0)\\ -\sin[(n-2m)] & (n-2m<0)\end{cases} \tag{4}$$

这样,被测光学干涉波面的数学表述函数用Zernike多项式拟合表达为

$$F(\rho,\theta)=\sum_{k=0}^{\infty}a_kZ_n^{n-2m}(\rho,\theta)\quad 或\quad F(\rho,\theta)=\sum_{k=0}^{\infty}a_kZ_k(\rho,\theta) \tag{5}$$

式中,a_k为Zernike多项式的拟合系数。如何求出拟合系数a_k——也就是完成对光学干涉波面的拟合是整个系统设计工作的核心。

2.2 Zernike多项式拟合中一些关键技术问题的解决

原则上讲,对光学干涉波面的拟合——求解Zernike多项式拟合系数是一个数学问题。只要正确地对干涉图像进行数字化后,剩下的问题就是采用基本的数学理论和方法将干涉波面"完全"数学化,通过对直接代表了被测表面信息的被"数学化"干涉波面的研究,从而测量并分析被测玻璃表面的状况。不过,在对干涉波

面进行 Zernike 多项式拟合的过程中有许多问题值得研究。

2.2.1　Zernike 多项式拟合干涉波面的阶选择法则

如上所述,Zernike 多项式是一个函数系,原则上讲,选择尽可能高阶的 Zernike 多项式来拟合干涉波面所得到拟合干涉波面函数与实际的光学干涉波面最为接近,即采用较高阶的 Zernike 多项式来拟合干涉波面,将可以使得我们对光学干涉波面的拟合精度尽可能的高。然而,在实践中发现,当把拟合干涉波面的 Zernike 多项式的阶提高到一定程度时,拟合的波面函数的一致性遭到了严重的破坏,其拟合精度反而大大降低。为此我们做了一系列的相关研究,最终得到了在进行 Zernike 多项式拟合干涉波面时应遵守的这样一个法则:Zernike 多项式拟合干涉波面的阶不能大于被测光瞳内干涉条纹的数量。即当被测光瞳内有 6 根干涉条纹,则用 Zernike 多项式拟合该干涉波面时,只能选择 5 阶 Zernike 多项式进行拟合。否则,对干涉波面的拟合将是不正确的!

2.2.2　拟合算法的选择

如何求出 Zernike 多项式拟合光学干涉波面的系数,在数学上有两种方法可选,一是通用而简洁的最小二乘法,二是被认为稳定性更好的 Gram－Schimdt 正交化方法。作者查阅了所能找到的有关 Zernike 多项式拟合干涉波面的文献[4~5],都一致地推荐使用 Gram－Schimdt 正交化方法。然而,实际计算中发现,在相同的 Zernike 多项式阶的条件下,使用该法虽然无最小二乘法方法中所出现的正则方程系数矩阵严重“病态”的情况,但在构造正交归一函数系的过程中却出现严重的相关,同样无法进一步得到一稳定的解。为此,我们在理论和实践中对这两种方法的等价性进行了严格的论证[4]。事实上,最小二乘法和 Gram－Schimdt 正交化方法在求解 Zernike 多项式拟合系数解的稳定性上是一致的。即当对一干涉波面进行拟合计算时,用最小二乘法出现了正则方程的严重病态,用 Gram－Schimdt 正交方法也将在相同的阶构造正交归一化函数系时出现相关。相反,如果用最小二乘法不能求出正确的 Zernike 多项式拟合干涉波面的拟合系数,则用 Gram－Schimdt 正交化方法也同样做不到。所以,我们在实际的应用中采用的是算法相对简洁的最小二乘法。

那么,怎样才能保证用 Zernike 多项式拟合干涉波面时不会出现“病态”或“相关”? 绝对地保证检测数据的真实性和准确性,Zernike 多项式对干涉波面的拟合精度成为整个系统检测可靠性的关键一环! 解决的唯一方案就是遵守前述的“Zernike 多项式拟合干涉波面的阶选择法则”。

3　系统的精度分析

由于没有更高一级仪器或更好的标准样品来标定我们所研制系统的精度,为此,只能采用在理论和实践上均比较合理,并且也十分客观的确定系统精度的全新方法——在“Zernike 像差空间”来论证系统的精度。具体的方法如下:取一被测样品,检测时改变光瞳内的干涉条纹数量 N 和 Zernike 多项式拟合的阶 k 重复测量样品若干次,则被测样品的表面上一点(x,y)的局部误差 $W(x,y)$的平均值为

$$\overline{W_{N,k}(x,y)} = \frac{1}{M}\sum_{N,k}^{M}\Big[\sum_{n=4}^{\infty}a_n(N,k)Z_n(x,y)\Big] = \sum_{n=4}^{\infty}\Big[\frac{1}{M}\sum_{N,k}^{M}a_n(N,k)\Big]Z_n(x,y) = \sum_{n=4}^{\infty}\overline{a_n}Z_n(x,y) \tag{6}$$

式中 $\overline{a_n} = \frac{1}{M}\sum_{N\ k}^{M}a_n(N,k)$,M 为 N,k 变化重复测量的总次数,$a_n(N,k)$表示在 N,k 时的 Zernike 多项式归一化拟合系数,$\overline{a_n}$为重复测量 M 次 $a_n(N,k)$的平均值。则被测表面的误差与真实被测表面的误差 $W_z(x_j,y_j)$的误差——也就是系统的精度为

$$\Delta^2(N,k) = \frac{1}{M}\sum_{j=1}^{M}[W(x_j,y_j) - W_z(x_j,y_j)]^2 \tag{7}$$

当采样点数取无穷多时,上式变为

$$\Delta^2(N,k) = \frac{1}{\pi}\iint[W(x,y) - W_z(x,y)]^2\mathrm{d}x\mathrm{d}y \tag{8}$$

对于表面误差的真值 $W_z(x,y)$我们无从而知,但从误差统计理论可知,当重复测量的次数足够多时,无限趋近于 $W_z(x,y)$,所以式(8)变成

$$\Delta^2(N,k)= \frac{1}{\pi}\iint[W(x,y) - \overline{W(x,y)}]^2\mathrm{d}x\mathrm{d}y = \frac{1}{\pi}\iint\Big\{\sum_{n=4}^{\infty}[a_n(N,k) - \overline{a_N}]Z(x,y)\Big\}^2\mathrm{d}x\mathrm{d}y =$$

$$\frac{1}{\pi}\sum_{n=4}^{\infty}[a_n(N,k) - \overline{a_N}]^2 \tag{9}$$

因此,测量时选择光瞳内条纹数为 N,拟合 Zernike 多项式阶最大为 k,变化 N 和 k 总共测量了 M 次,则

系统测量平均精度为 $$\Delta=\left[\frac{1}{M}\sum_{N,k}^{M}\Delta^{2}(N,k)\right]^{1/2}=\left\{\frac{1}{M}\sum_{N,k}^{M}\frac{1}{\pi}\sum_{n=4}^{\infty}[a_{n}(N,k)-\overline{a_{n}}]^{2}\right\}^{1/2} \tag{10}$$

根据上述系统的精度分析理论和公式,我们对几十个样品进行了检测,并利用检测的数据对本系统的精度进行了评估,所有样品检测的结果没有出现与其它各种精度评估方法的结果相矛盾的情况,而且检测的精度相当稳定。无论质量好的样品,还是质量较差一点的样品,都证明了系统的精度 Δ 在 $3\lambda/1\,000$ 以内。因此,根据测量误差分析理论可知,单次测量的误差范围不超过 3Δ 的概率为 99.7%,故而说明本系统的精度达到了 $\lambda/100(\approx3\Delta)$ 。

4 结论

我们所研究的这套光学平面玻璃表面数字化检测系统,把传统光学方法与现代数字化图像技术相结合,运用先进的数字化图像处理手段和 Zernike 多项式拟合干涉波面方法进行干涉图像的计算,加上所得到的"Zernike 多项式拟合干涉波面的阶选择法则"的突破,从而可快速准确测量出光学平面玻璃表面的平整度以及对其它技术指标的定量评定,系统的精度达到了 $\lambda/100$,灵敏度为 $\lambda/1000$。对于如何把现代先进计算机数字化图像技术应用与经典传统的光学检测领域,提升现有光学检测仪器的检测能力和精度,本系统是一个较为成功的范例。该系统不仅可用于玻璃表面的平整度检测,也可用于检测光学薄膜特别是非线性光子薄膜均匀度的检测[7]。

参考文献:

[1]Bruning J H,Herriott D R,Gallagher J E, et al. Digital Wavefront Measuring Interferometer for Testing Optical Surfaces and Lenses [J]. Appl Oppt, 1974,13(11):2693-2703.

[2]波恩 M,沃耳夫 E. 光学原理[M]. 北京:科学出版社,1979.

[3]余景池. 由干涉图计算波差和传递函数[J]. 光学学报,1984,4(9):814-820.

[4]Schwider J,Burow R,Elssner K E, et al. Digital Wavefront Measuring Interferometer:Some Systematic Error Sources[J]. Alpl Opt,1983,22(21):3421-3431.

[5]朱郁葱,杨国光,董太和. 激光数字波面干涉仪的光学面形绝对检测[J]. 应用激光,1987,7(6):255-258.

[6]莫卫东. Zernike 多项式拟合干涉面方法研究[J]. 北京:高速摄影与光子学,1991,23(4):296-304.

Research of a System to Inspect Surface of Optical Plane Glass With Quantizing Technique

MO Wei-Dong[1], GAO Bo-Long[2]

(1. Engineering Institute,AFEU. , Xi'an 710038, China;

2. National Defense University of Science and Technology,ChangSha 410073, China)

AbstractThe research is to unite the traditional optical method with the modern quantizing image technique ,and to calculate interferogram using the advance quantizing image processing means and fitting interferogram method with Zernike polynomials so that the evenness and other technical parameters of surface of optical plane glass can be quickly and precisely measured. Using the results of the research in the system to inspect the surface of plane glass , the precision of the system is about $\lambda/100$ and sensitivity reaches about $\lambda/1000$.

Keyword:interferometer; processing quantizing image; Zernike polynomials ,plane glass surface.