

超光滑光学非球面面形检测

沈 勇 男

摘要: 本文介绍了一种利用激光自准原理通过对被测表面斜率积分的方法测量非球面面形的方法,并设计了测量系统,对系统的误差及实验数据进行了处理和分析。

一、引 言

超光滑光学非球面主要应用于软X射线(3 Å~100 Å)光学领域。目前这种非球面主要应用于X光显微镜和X光望远镜的非球面主镜的制作上。

在非球面的加工过程中,非球面的检测是十分重要的。要想制造出高精度的非球面元件,高精度的检测手段是不可缺少的。

1981年英国研制了测量精度为5nm的激光自准高精度面形检测仪,所用的检测元件为四象限探测器。同时,美国研制出另一种测量设备,他们把被检光学元件放在气浮导轨上,气浮导轨带着被检件移动,使自准光束始终垂直于被检面的测量点,其检测精度为nm级。他们的仪器均以平行玻璃板读出加工误差,并且是全自动测量。除检测非球面外,也可用于大曲率半径的球面反射镜的检测以及高能离子束轰击陶瓷材料所引起的损伤的研究上。

本文所采用的测量方法有以下几个优点: 1. 不破坏被检面,没有探头变歪而带来的误差。 2. 可以测量被检面面形的绝对值。 3. 不需要参考理想波面,不需要对干涉图进行解析。 4. 利用计算机可以使这种测法成为在线实时测量系统。

二、测量原理及仪器设计

如图1所示。当一束激光垂直地入射到被检面时,由于被检面有面形误差,因此在不同的被测点反射光线具有不同的反射角,用CCD接收器测得这个角度。假设在一个光斑所覆盖的面积内斜率是相等的,则对于任意点 n 处的矢高 h_n 可由下式求得:

$$h_n = \int_0^{s_n} \frac{\theta}{2} dx = \frac{d}{2} \sum_{i=0}^{n-1} \theta_i$$

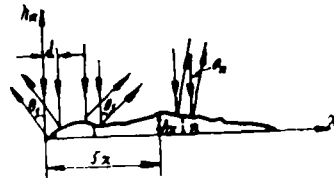


图 1

整个测量系统如图2所示

从激光器1发出的激光一部分被半反半透镜2反射到柱面镜8上然后被反射到CCD接

收器 7 上, 这个光路是用来修正激光束的漂移的。另一部分直接透过半反半透镜, 然后经五棱镜到被检面上, 经被检面反射后按原光路返回, 然后经半反半透镜后入射到 CCD 接收器上。

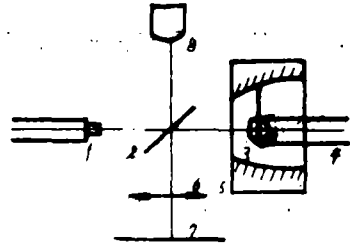


图 2

三、误差分析

1. 精度分析

面形的测量精度与能够被测得的从被检面反射回来的光束的角度变化的精度有关。

如果用一焦距为 f 的透镜将一束直径为 D 的激光束聚焦到 CCD 上, 则这束光在 CCD 上的光斑直径 σ 为:

$$\sigma \approx f\lambda/D$$

因为测量精度与 CCD 所能分辨的角度变化有关, 因此需要对 CCD 进行电子学细分。如果细分的份数为 α , CCD 每个象元的宽度为 L , 则 CCD 所能分辨的最小位移量为:

$$\delta\sigma = L/\alpha$$

可测得最小角度变化为:

$$\delta\theta = \delta\sigma/f = L/f\alpha$$

假设经透镜聚焦后的光斑覆盖了 N 个象元则有: $\sigma = NL$

$$\therefore \delta\theta = L/f\alpha = \sigma/f\alpha N = \lambda/\alpha ND$$

因此可测得的最小矢高变化量为:

$$\delta h = \delta\theta \cdot \frac{d}{2} = \frac{\lambda d}{2\alpha ND} \quad (1)$$

当 $\alpha = 50$, $\lambda = 6328 \text{ \AA}$, $d = D = 1\text{mm}$, $N = 17h$

$$\delta h = \lambda/1700.$$

上式表明, 当不考虑其它误差源的情况下, 如果对 (1) 式中的参数取上述的值测量精度为 $\lambda/1700$ 。但是在实际测量过程中还有许多误差源存在。

2. 对五棱镜的误差分析

五棱镜本身的制造误差对测量有影响。其制造误差可分为平行差和棱差。另外, 五棱镜在导轨上移动时, 由于导轨的制造误差使得五棱镜的位置偏离理想位置。而五棱镜位置相对于理想位置的偏离对测量也有影响。

假设导轨的制造误差使得五棱镜在某一位置绕 p 轴转动了一个 α 角。 p 轴在五棱镜的物方坐标系中的投影为 p_x 、 p_y 、 p_z 。在这里我们设定五棱镜的物方坐标系为右手坐标系, xy 平面为光轴截面, x 轴与光轴重合。

假设由于五棱镜的制造误差使得实际的像方坐标系相对于理想的像方坐标系转动了一个 θ 角, k 轴在物方坐标系中的投影为 k_x 、 k_y 、 k_z 。

假设入射光矢量为 \vec{A} , 则经五棱镜折射后的出射光矢量 \vec{A}' 为:

$$\vec{A}' = \begin{pmatrix} k_x\theta & 1 & k_x\theta + (p_x + p_y)\alpha \\ -1 & k_x\theta & -k_x\theta + (p_x - p_y)\alpha \\ -k_x\theta + (p_x - p_y)\alpha & -k_x\theta & -(p_x + p_y)\alpha & 1 \end{pmatrix} \vec{A}$$

对于一般的测量系统光束都是沿着光轴（即 x 轴）入射的。因此在这里我们取 $\vec{A} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$ 。

则

$$\vec{A}' = R\vec{A} + \alpha \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ p_r - p_s \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} k_s \theta \\ 0 \\ -k_s \theta \end{pmatrix} \quad (2)$$

式中 R 为五棱镜的作用矩阵。

在(2)式中等式右边的第一项为五棱镜处于理想状态时的出射光线矢量；第二项为由于导轨的制造误差所产生的误差。当导轨在光轴截面方向的直线度为 $0.1''$ ，在垂直于光轴截面方向的直线度为 $3'$ 时导轨的制造误差所产生的误差可以忽略不计。第三项为五棱镜的制造误差所产生的误差。对于不同的测量点这一项是固定不变的。因此可通过加修正值将这一项误差消除掉。

3. 激光束的漂移误差分析

激光束产生漂移主要有两个原因：第一，由于其自身产生的热使得激光腔内的毛细管发生变形，从而使得从腔内射出的激光的方向发生漂移。第二，由于气流的抖动使激光束的方向发生漂移。

将光路置于封闭系统中可减少气流的影响用柱面镜来修正激光束的漂移。

4. CCD接收器本身的系统误差为 $0.2''$ 。换算成矢高为 $\lambda/1305$ 。

因此整个系统的测量不准确度为：

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^n \sigma_i^2} = \lambda/1305$$

所以测量精度为 $\lambda/100$ 。

四、实验结果

为了验证这种测试方法的可行性，我们用图2所示的系统对一个已知面形为 $0.25\mu\text{m}$ 的平面镜进行了测试。测试的面形为 $0.25\mu\text{m}$ 。因此证明这种测量方法的测量精度是很高的。

五、结束语

本测量方法主要适用于测量柱面和近似柱面的非球面光学元件。而X光望远镜和X光显微镜的主反射镜均采用近似于柱面的非球面光学元件。因此这种测量方法很适用于X光望远镜和X光显微镜的主反射镜的面形检测。

Measurement of Supercalendered Aspherical Surface

Shen Yongnan

Abstract

This paper, a method is discussed in which the surface topography of an aspherical surface can be measured by integrating slope values of this kind of aspherical surface according to the laser autocollimation principle. Meanwhile, a kind of surveying system is designed, and the analysis is done about the system error. At last the testing data are processed and analysed in the paper, and the feasibility experiment is done.