

激光全息法检验反射棱镜光学不均匀性

王桐华 肖明海

(军械工程学院)

采用激光全息技术对棱镜的不均匀性进行检验是一种新的尝试。本文研究了这种检验的方法,同时对直角屋脊棱镜和直角棱镜进行了实测,表明方法的可靠性和具有良好的精度。

Inspection method of reflecting prism
in homogeneity using laser holography

Wang Guohua, Xiao Minghai

(Institute of Ordnance Engineering)

Abstract

This is a new inspection method of reflecting prism inhomogeneity using laser holography interference method. The method is studied in this paper. Right angled roof prism and right angled prism are measured practically the results show that the method is of reliability and accuracy.

一、引言

在光学系统中棱镜占有重要的地位,许多光学系统离不开它,但是,光学零件成品检验受到口径、形状等条件限制,无法用星点法、阴影法给出定性的结果,甚至于采用泰曼干涉仪也难以胜任定量的计量。从目前现有国内资料尚未见到对反射棱镜光学均匀性检验的方法。本文是研究如何用激光全息技术对各种反射棱镜的光学不均匀性进行检验。由于用激光全息方法进行检验,用微计算机进行数据处理,其结果快,计算方便,精度高,可达到 10^{-6} 数量级。同时,这个方法经过一定光路变换也可适用检验光学材料、晶体等光学元件。

二、激光全息干涉测量原理

1. 激光全息的二次曝光法

二次曝光法是将初始物光波面与变化后的物光波面相比较,在记录过程中对一张全息干

板作二次曝光。

本实验第一次曝光是指在物光路中，没有放入被测屋脊棱镜时进行一次曝光(见图4)。在全息干板上，记录初始物光波的全息图(作为干涉中的标准波面)，第二次曝光是将被测屋脊棱镜放入光路中，进行曝光，在同一干板上记录了变化以后的物光波(相当于被测试波面)的全息图。两张全息图记录在同一张干板上，所得到的一组条纹称透射条纹。

在全息干板上同时记录的由于棱镜入射面到出射面之间有光程差而产生光的一组干涉条纹称为反射纹。

透射纹与反射纹这两组干涉条纹直接反映了棱镜本身的光学均匀性的优劣。

2. 公式导出与计算

令反射条纹与透射条纹光程差分别为，

$$\Delta r = 2nh \quad (1)$$

$$\Delta t = 2(n-1)h \quad (2)$$

对(1)、(2)式分别求梯度为：

$$\text{grad} \Delta r = 2n \text{ grad } h + 2h \text{ grad } n \quad (3)$$

$$\text{grad} \Delta t = 2(n-1) \text{ grad } h + 2h \text{ grad } n \quad (4)$$

相干场的条纹间距可表示为：

$$e = \frac{\lambda}{|\text{grad } \Delta|} \quad (5)$$

条纹的空间频率(即沿条纹法线方向的单位长度条纹数目)表示为：

$$v_N = \frac{\text{grad } \Delta}{\lambda} \quad (6)$$

将(3)、(4)式代入(6)式，分别得：

$$v_r N_r \lambda = 2n \text{ grad } h + 2h \text{ grad } n \quad (7)$$

$$v_t N_t \lambda = 2(n-1) \text{ grad } h + 2h \text{ grad } n \quad (8)$$

(7)、(8)两式联立得：

$$\text{grad } n = \frac{\lambda}{2h} (1-n)v_r N_r + n v_t N_t + n v_r N_r \quad (9)$$

$$\text{grad } h = \frac{\lambda}{2} (v_r N_r - v_t N_t) \quad (10)$$

从式中不难看出，实验测出 v_r 和 v_t 就可求出折射率沿 N_r (法线方向)变化和厚度变化的梯度。

测任一点P的折射率相对于基准点O点的变化量(如图1所示)，可按下式对 l 求积分。

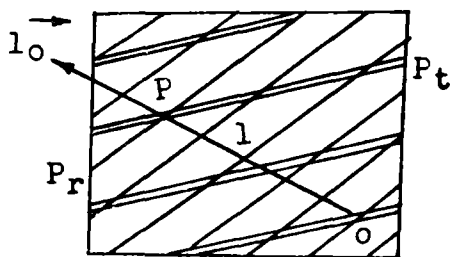


图 1

$$\int_0^l |\text{grad } n| \cos(\text{grad } n, l_0) dl$$

$$= \frac{\lambda}{2h} [(1-n) \int_0^l v_r \cos(n_r, l_0) dl$$

$$+ n \int_0^l v_t \cos(n_t, l_0) dl]$$
(11)

式中, h 、 n 可近似视为常数。

式中, 设

$$\delta n_{P-O} = \int_0^l |\text{grad } n| \cos(\text{grad } n, l_0) dl$$
(11a)

表示P点和原点O的折射率差。

$$P_r = \int_0^l v_r \cos(n_r, l_0) dl$$
(11b)

表示反射条纹中P点与O点干涉级差。

$$P_t = \int_0^l v_t \cos(n_t, l_0) dl$$
(11c)

则 (11) 式可写成,

$$\delta n_{P-O} = \frac{\lambda}{2h} [(1-n)P_r + nP_t]$$
(12)

上式可改写成,

$$\delta n_{P-O} = \frac{\lambda}{2h} [n(P_t - P_r) + P_r]$$
(13)

从拍摄全息干涉图中, 对反射条纹和透射条纹的序数予以编号, 并代入公式 (13), 在已编制好的微计算机程序上进行数据处理。找出折射率最大和最小差值,

$$\Delta n = \delta n_M - \delta n_m$$
(14)

3. P_r 和 P_t 的确定

首先利用反射条纹判断光程差大小之方向, 用烧热铜棒接触被测棱镜, 棱镜的反射条纹

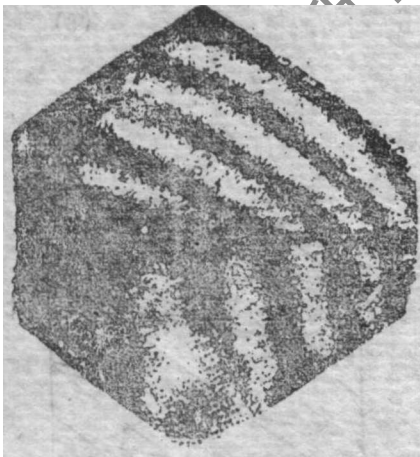
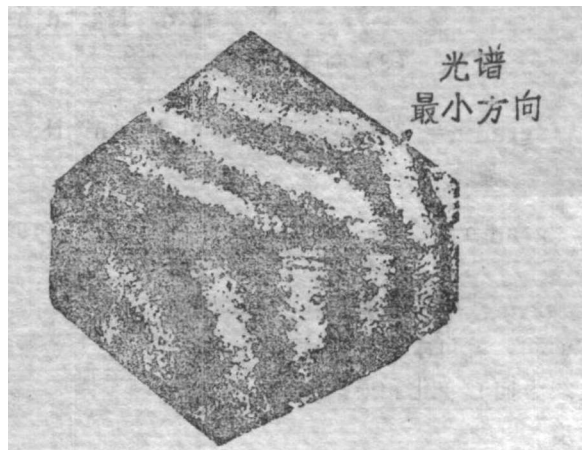


图2 a. 屋脊棱镜的反射条纹



b. 局部受热后屋脊棱镜反射条纹发生变形

发生弯曲, 条纹凸出的方向一端, 对应着试件光程差较小一端 (见图2)。把较小端通过第

一个交点的两组条纹干涉级的序数都定为 0，即 $P_r = P_t = 0$ ，沿光程差增大方向依次增加条纹序数。

从干涉图中可以找出与 δ_{0M} 和 δ_{0m} 对应的位置为 P_M 和 P_m 点。通过实验计算，结果，这种判断是正确的。见图 3 反拍出的屋脊棱镜的合干涉图。

三、全息干涉实验装置

用全息干涉测量棱镜光学均匀性的实验光路如图 4 所示。

对被测件要求：被测棱镜平行差不大于 $20''$ ；面形误差 $N=1.5$ ， $\Delta N=0.5$ 。

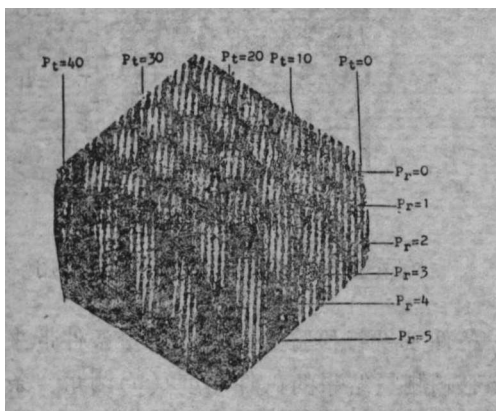


图3 屋脊棱镜合干涉图

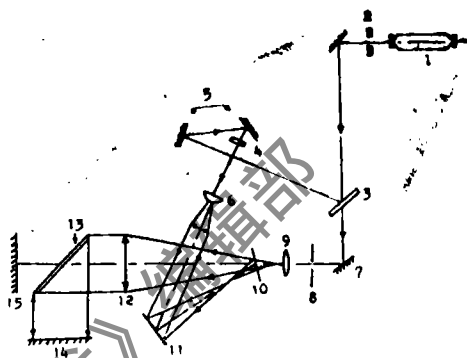


图4 全息干涉装置示意图。

1. He-Ne; 2. 曝光器; 3. BS_1 分光镜;
4. 衰减片; 5. 反射镜; 6. 扩束镜; 7. 反射镜;
8. 光栏; 9. 透镜; 10. BS_2 分光镜;
11. 全息干板; 12. 透镜; 13. 被测棱镜;
14. M, 测试反射镜; 15. 反射镜

全息干涉实验在气浮全息平台各光学元件保持相对稳定，激光束经 BS_1 分束镜分光后，在 BS_1 上反射的光束作为参考光束，为了获得合理的光强比在光路中插入衰减片，经过扩束镜，准直物镜产生平行光到达激光全息干板。而在 BS_1 分光镜透射的一路光束作为物光束，经过全反射镜折光后，通过光栏和扩束镜到达准直物镜变成平行光入射到被测屋脊棱镜出射到 M 测试反射镜，按原路返回到 BS_2 分光镜取出一部分物光信息使其成像到全息干板与参考光相遇。如果光强比能够控制在 $4:1 \sim 10:1$ ，物光和参考光夹角最好不大于 30° ，保证物光束和参考光束等光程，同时使物光束垂直到达干板就会拍摄出较为理想的激光全息图。可以放回原参考光路或者白光再现。可对已拍摄的激光象面全息图做定性分析。

四、实验结果及误差分析

1. 实验结果

本实验对直角屋脊棱镜和直角棱镜分别在图 4 的实验装置中进行了二次曝光，分别拍摄出二个试件的反射条纹和透射条纹同时记录下来的全息干涉图。本文图 2、图 3 记录的是屋脊棱镜；图 5 记录的则是直角棱镜的全息干涉图。

从反拍的全息干涉图中观察，反射条纹与透射条纹有一定角度，并对图中条纹分别编号，经编程在微计算机运算后进行数据处理。具体参数及其结果见表 1，

2. 误差分析

从误差来源分析,不外乎有二个方面:其一,测量条件如测量时的环境温度的变化;对试件装夹时带来的初应力;试验台减震情况等因素也是不容忽视的。本实验是在气浮平台,

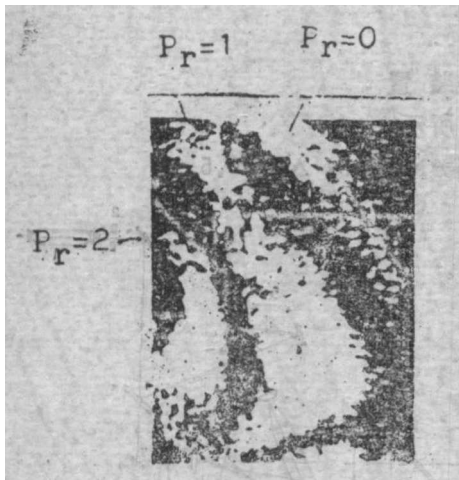
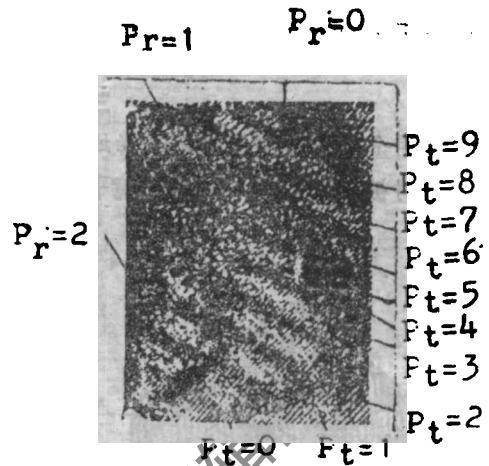


图5 a.直角棱镜反射条纹



b.直角棱镜透、反纹的合干涉图

试件处于自由状态放置,注意室内温度和气流的稳定条件下进行检验的。对于测量条件带来的误差可略而不计。其二,从公式(12)中讨论直接影响测量结果的试件厚度(h)测量、条纹序数的判读、及折射率测量带来的误差,以及He-Ne激光器没有稳频而带来波长的漂移等测量过程中造成的测量误差。其中折射率的测量误差可达 10^{-6} 数量级,因此这项误差可忽略不计,这样折射率(n)值可用名义值作为准确值。

表1 直角屋脊棱镜与直角棱镜参数及测量结果

项 目	数 据	
	试 件	参 数
平 行 差	$\theta_1 = 5''$	$\theta_1 < 5''$
轴 向 厚 度(h)	55.46mm	53.22mm
折 射 率(n)	1.5163	1.5163
记录激光波长(λ)	0.0006328mm	0.0006328mm
折射率最大差值(δn_M)	3.485×10^{-4}	8.113×10^{-5}
折射率最小差值(δn_m)	-1.454×10^{-5}	-1.515×10^{-5}
折射率差值(Δn)	3.631×10^{-4}	9.629×10^{-5}

测量时用光源为He-Ne激光器,其波长在空气中标准状态下为 $0.63281976 \times 10^{-3}$ (mm),在计算中取 $\lambda = 0.6328 \times 10^{-3}$ (mm)可视为准确值。

试件厚度(h)是反射棱镜沿着光轴展开的厚度,用卡尺测量可准确到三位数,从式中可见此项误差影响也很小,所以,计算时可把(h)值看成常数。

P_r 、 P_t 是反射条纹和透射条纹的序数。当测量时,两组条纹均较稀时,其交点不一定是

折射率变化最大的点,要确定这一点,可采取在两条反射条纹和透射条纹之间分别做辅助条纹的方法。这样就导入条纹序数的测量误差,对此,一般用钢板尺度量,故误差较大,从而不难看出均匀性测量影响精度的主要因素是 P_r 、 P_t 的测量误差。

见上述讨论,公式(12)中 λ 、 n 、 h 均可视为常量。仅对反射条纹序数 P_r 和透射条纹序数 P_t 求偏微分,代入间接测量误差传递公式,得到测量均匀性的中误差表达式为:

$$\begin{aligned}\sigma_{\delta n_{P-O}} &= \pm \frac{\lambda}{2h} \sqrt{\left(\frac{\partial \delta n_{P-O}}{\partial P_r}\right)^2 \sigma_{P_r}^2 + \left(\frac{\partial \delta n_{P-O}}{\partial P_t}\right)^2 \sigma_{P_t}^2} \\ &= \pm \frac{\lambda}{2h} \sqrt{(1-n)^2 \sigma_{P_r}^2 + n^2 \sigma_{P_t}^2}\end{aligned}\quad (15)$$

如果对 P_r 、 P_t 用钢板尺测量,故 $\sigma_{P_r} = \sigma_{P_t} = \pm 0.1(\text{mm})$,并将 $\lambda = 0.6328 \times 10^{-6}(\text{mm})$, $n = 1.5163$, $h = 53.22(\text{mm})$ 代入上式得:

$$\sigma_{\delta n_{P-O}} = \pm 9.5 \times 10^{-7} \approx 1 \times 10^{-6}$$

可见,全息法测量棱镜光学均匀性的精度至少可达 1×10^{-6} 数量级。

至于棱镜的平行差将影响 P_r 、 P_t 的数目、棱镜的面形误差将带来干涉条纹的复杂性,但对 P_r 和 P_t 影响是等价的。因此,上述两个问题对均匀性测量没有实质性影响。

综上所述,激光全息干涉法检验棱镜光学均匀性是可行的。对直角屋脊棱镜和直角棱镜实测结果初步判定一致。这种方法可提供对反射棱镜的选择依据,其方法是可靠的。

同时,这种方法可以推广,凡被测件能满足入射光波面和出射光波面相干、同时到达测试反射镜可以返回原光路满足激光全息干涉条件的,就可以测出被测件的光学均匀性。

学员胡向军、刘福军参加了实验的具体工作,在此表示感谢。

参 考 文 献

- [1] 北工光测组,《光学测量与象质鉴定》,1980年9月,北工,第147页。
- [2] 第五机械工业部综合所,《工业技术通讯》,1978年,北京,第80页。
- [3] 于美文,《光学全息及信息处理》,1983年8月,国防工业出版社。

作者简介:王桐华,女,1939年元月出生。工程师。现从事激光专业工作。

肖明海,男,1955年5月出生。助工。

收稿日期,1987年6月26日。

• 本文于1986年选为“全国光学测量学术会议”宣读文章,并在会议上进行了交流。