

一种测量高质量光学玻璃均匀性的新方法

——合干涉图法

朱慧敏 袁行君 沈元华 李 莉

(成都光明器材厂)

提要: 本文介绍的是能够定量测出高质量光学玻璃均匀性的合干涉图法。该方法能够同时测量出均匀性的线性及非线性变化量,且操作过程比全息法大大简化。测量精度为 $\pm 1 \times 10^{-9}$ 。

一、概 述

随着光学技术的发展,在许多条件下,对光学玻璃均匀性的要求越来越高。当今玻璃制造业虽已能生产出高质量的光学玻璃。但是,如何准确、客观、方便地测量出这些玻璃的均匀性值(即同一块玻璃内折射率的最大差值),至今仍未能满意的解决。目前国内外除了对普通光学玻璃使用鉴别率法、星点法和刀口仪法等作定性测量外,大多采用各种干涉方法去定量测定高质量光学玻璃。例如泰曼干涉仪、菲索干涉系统、马赫干涉系统及其他一些基于这些基本干涉原理制造的各种平面干涉仪等^[1]。用上述方法测定光学均匀性都有较高的精度,但这些方法都是根据干涉线性条纹的变形来测定折射率的非均匀性,因而都有一个致命的弱点,不能测出均匀性的误差部分。但事实上均匀性的线性误差在很多情况下都是不能忽略的^[2],有时线性误差与非线性误差相比较,还占有较大的比例。

如图1所示,在通常情况下我们可以将折射率的不均匀分为线性和非线性变化两部分^[3]。图中 Δn_1 为折射率的线性误差, Δn 为样品的实际折射率的最大差值。从图中可以看出,即使是理想情况下对称分布的均匀性值也会因测量条件等各种因素的限制,带来测试中的线性误差,即实际上折射率完全对称分布的情况是没有的。

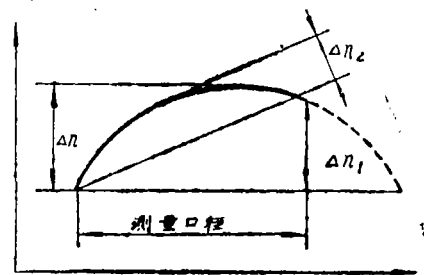


图 1

由于在平行的测试光路中,被测样品的线性不均匀性的作用相当于一个光学楔形,只能产生平行的等厚条纹而不引起干涉条纹的弯曲,因而不能被测出。而仅以其非线性误差代替 Δn 显然不能客观地反映被测样品的实际最大折射率差值。特别是当被测玻璃是用来做非平面光学元件时,这种忽略线性误差的测试方法是不完善的。这个问题已经引起了测试人员的重视。随着全息术的发展和推广应用,现已有了以全息干涉测定光学均匀性的方法^[4]。这种

法弥补了上述普通干涉法的缺陷，能够直接测出包括线性误差在内的均匀性值。但由于其操作和处理过程比较繁琐，因而很难用于生产线上的测试。

为了解决上述问题，我们从实验及理论上进行了探讨，企图得到既能测出包括线性误差在内的均匀性值，又能使测试过程相对简化，适用于生产测试的方法。也就是本文介绍的合干涉图法。

二、测量原理

这种测试方法的基本原理是在同一张照片上同时摄下三组干涉条纹。这三组干涉条纹中包括了样品的折射率变化及厚度变化对光程差的影响。通过对这三组干涉条纹进行分析、计算，可以解出厚度误差 Δh 和折射率差值 Δn 。并排除了被测样品的厚度误差对测量结果的影响。所测得的 Δn 包括了折射率的线性变化量和非线性变化量两部分。

如图 2 所示，一束平行光垂直入射在一标准的透射板 (TF) 上，该平板的标准表面产生一反射波面 1，另一部分光穿过 TF 分别在被测样品的两个表面产生两束反射光 2 和 3，同时入射光的一部分 (中心部分) 透过样品在标准反射面 RF 上反射光 4 并再次穿过样品，光束的边缘部分则因样品小于系统口径而不通过样品直接由 RF 反射 5。这样，我们一共获得了 5 束反射波面 (多次反射不考虑)。在这 5 束波面中，1 与 5 干涉形成背景纹 M_B ；1 和 4 产生透射纹 m_T ；2 和 3 产生反射纹 m_R 。通过一次曝光，将这三组干涉纹同时记录在一张照片上，就获得了我们所需要的合干涉图，如图 3 所示。再通过分析计算，就可获得要测的折射率差 Δn 。

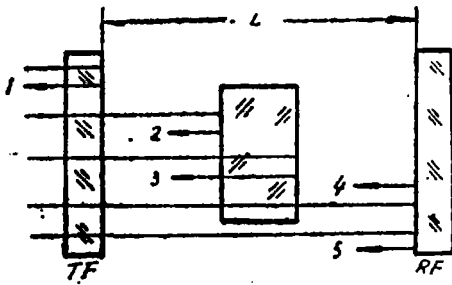


图 2 测量原理示意图

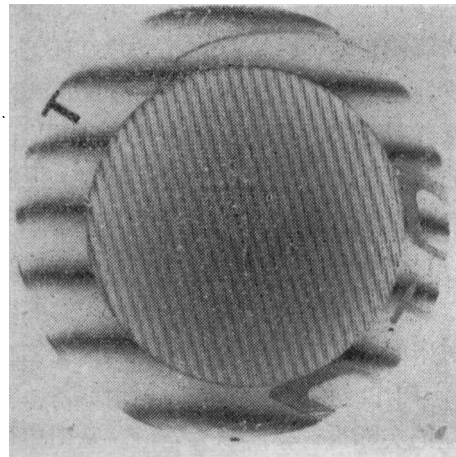


图 3 合干涉图

三、计算公式的推导及误差分析

1. 公式推导:

如图 2 所示，我们可以分别写出反射纹 m_R 和透射纹 m_T 所对应的光程差公式。对于反射纹有：

$$\Delta \lambda_R = 2nh + \frac{\lambda}{2} \tag{1}$$

式中: h ——被测试样厚度
 n ——被测试样折射率
 λ ——测量光波长

同理, 可以得到透射纹所对应的光程差:

$$\Delta\lambda_T = 2[(L - h) + nh] \quad (2)$$

式中: L 为两标准平面间的距离。

这相当于两组薄板干涉, 其极值条件分别为 (极小):

$$\Delta\lambda_R = 2nh + \frac{\lambda}{2} = (m_R + \frac{1}{2})\lambda \quad (3)$$

$$\Delta\lambda_T = 2[(L - h) + nh] = m_T\lambda \quad (4)$$

由于测量时是平行光正入射, 所以干涉条纹是样品的厚度误差 Δh 和折射率差 Δn 所引起。分别对以上两式求微分, 则:

$$\lambda \cdot \Delta m_R = 2(n \cdot \Delta h + h \cdot \Delta n) \quad (5)$$

$$\text{及 } \lambda \cdot \Delta m_T = 2(\Delta L - \Delta h + n \cdot \Delta h + h \cdot \Delta n) \quad (6)$$

这里: Δm_R 和 Δm_T 分别表示任意两点间的反射纹和透射纹的干涉级序差, 此时的 Δn 和 Δh 就是这两点相应的折射率差和厚度差。 ΔL 表示两标准反射面之间的厚度差。由于标准平面的加工精度很高 ($\lambda/20$), 其面形误差可以忽略不计, 故将 ΔL 看成为线性的楔形差, 该楔形差产生平行等距的等厚干涉条纹, 即背景条纹 Δm_B 。

$$\Delta m_B = 2\Delta L/\lambda \quad (7)$$

这里, ΔL 是可以调节的。当 ΔL 为零时, Δm_B 也为零。此时整个背景是一片均匀的视场。

由 (6) 式可知, ΔL 的大小直接影响到透射纹的干涉级序 Δm_T 。

若将上述 (5) 式和 (6) 式相减, 则:

$$(\Delta m_R - \Delta m_T)\lambda = 2(\Delta h - \Delta L)$$

将其代入 (7) 式, 可求得:

$$\Delta h = (\Delta m_R - \Delta m_T + \Delta m_B) \cdot \lambda/2 \quad (8)$$

再将 (8) 式代入 (5) 式, 同时考虑到背景纹的方面透射纹的影响, 最终得到计算任意两点间折射率差 Δn 的公式:

$$\Delta n = [n(\Delta m_T \pm \Delta m_B) - (n-1)m_R]\lambda/2h \quad (9)$$

由 (8) 式和 (9) 式我们可以求出任意两点间的厚度误差 Δh 和均匀性 Δn 。 Δn 包含了所有的折射率差 (即线性和非线性差)。

这里值得提出的是: 式中 Δm_B 前的正负号与背景纹的方向有关, 也即取决于背景条纹相对于选定参考点的变化趋势。这个变化趋势除了使透射纹发生偏转外, 同时还会使透射纹数量增加或减少。在通常情况下, 为了使干涉图片便于阅读、计算, 人为地使反射纹与透射纹有一定的交角。为此, 我们将背景纹与反射纹调到一定的交角 (不为 90°)。

利用第 (9) 式我们可求出任意两点间的折射率差。为了分析计算方便, 先取一共同的参考点作为零点。认为该点的 m_R 和 m_T 及 m_B 都为零。这样, 被测样品上的任意一点相对零点的 Δm_B 、 Δm_T 和 Δm_R 就为 m_R 、 m_T 和 m_B , 然后按需要在样品上选点 (可以将 m_R 、 m_T 都选成整数)。读出其干涉级序 m_R 、 m_T 、 m_B , 代入 (9) 式进行计算, 得到各选定点相对于零点的折射率差值, 取其中的最大值与最小值之差, 即得到整块样品的均匀性值。

2. 误差分析

由于在测量过程中采用一次拍摄干涉图，所以由温度微小变化所引起的条纹漂移不影响测量的精度。

此外，如前所述，因为系统本身的调整有一定的楔角，致使反射纹和透射纹有一交角。若将各级待测点选择在反射纹和透射纹都为整数的点上（即恰在交点上），这样读数十分容易，因此能使反射纹和透射纹的干涉级序 m_R 和 m_T 读数非常准确。干涉纹的判读精度主要取决于背景纹的读出精度。在测量过程中，通常取背景纹为3到4条为好。因为有较宽的条纹间隔，再采用测微显微镜读数，使背景纹的读数准确性能够达到1/20条。这对折射率差的测定带来的误差为：

$$d(\Delta n) = \frac{n\lambda}{2h} d(\Delta m_B)$$

若取 $n = 1.5$, $\lambda = 6.328 \times 10^{-6} \text{cm}$, $d(\Delta m_B) = 0.05$

则： $d(\Delta n) = 1.5 \times 6.328 \times 10^{-6} / 2h = 2.3 \times 10^{-6} / h$

显然，最终测量精度与样品的厚度有关。

若取 $h = 40 \text{mm}$ ，则由背景纹的判读所带入的测量误差为 6×10^{-7} 左右。因此，只要被测样品的通光厚度大于 40mm ，均匀性的测量精度就会高于 6×10^{-7} 。可以满足对均匀性为 2×10^{-6} 的玻璃的测试要求。事实上，样品的通光长度越长，背景纹的判读误差对测量结果的影响就越小。

四、测量特点

上面介绍的这种合干涉图法测定光学玻璃的均匀性，具有很多独特的优点。

1. 能够测量出光学玻璃均匀性的线性误差

前面已经提到，一般的干涉方法不能测量出折射率差的线性误差。而全息法虽然能测量出线性误差，但因其操作过程非常繁琐，同时，要获得一张好的全息图片也十分不易。故不适用于生产测量而合干涉图法采用的是一张照片一次曝光（用一次性成像照片可不必暗室处理），大大简化了操作过程。若注意杂散光的消除，甚至可以不要暗室条件进行测量。另外，由于测量时间短，减少了测量误差出现的机会，且光路调整也较容易。所有这一切都使这种测量方法更适用于生产。

2. 消除了干扰纹的影响，提高了测量精度

如图2所示，系统的中心部分共有4束反射波面。它们每两两发生干涉共形成六组干涉条纹。除了2和3，1和4分别形成的反射纹和透射纹是测量所需的外，其余四组都是干扰纹。为了消除这些干扰纹，我们将样品调节成与两标准表面间形成一定的夹角，使样品的两个面和标准面之间产生的反射波不发生干涉。这样就只获得了反射纹和透射纹，消除了干扰纹的影响，从而获得高质量的干涉图片。

除上述两个特点外，我们还采用背景纹迭加的方法，使反射纹和透射纹形成一交角，使得干涉纹的判读准确，提高了测量精度。

五、测量实例

我们以一测量实例进一步说明用合干涉图法进行测试的步骤，并列出现测量数据及计算

结果。

1. 待测样品的要求

实验中我们用尺寸为 $\Phi 220 \times 40\text{mm}$ 的贴置板玻璃 K 作为样品。在采用合干涉图法测定玻璃毛坯的均匀性时,要求将被测试样的两通光表面抛光,同时要求面形误差 $N < 1$, $\Delta N < 0.2$, 平行差 $\theta < 20''$ 。若具备与被测试样牌号相同的贴置玻璃,可不对试样抛光,对样品的平行差的要求也可降低(具体要求应视贴置板玻璃本身的楔形角大小而定)。

2. 测试系统

整个测试过程是在一台口径为12in的ZYGO干涉仪上进行。为了提高干涉图片的分辨率,我们附加了一套摄影系统。图4所示为测试系统的光路示意图。

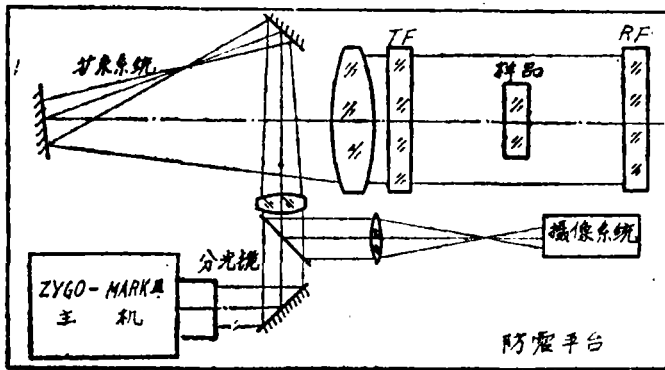


图4 光学系统示意图

整个测试系统被置于一充气防震平台上,测试过程中室内温度变化不大于 0.5°C 。

3. 操作步骤

测试前先将被测试样放在仪器室内恒温24小时以上。在进行测试时,首先,将光路中的半反半透镜取出,让光束返回主机系统,通过ZYGO干涉仪本身所带的监视器进行观察,并将仪器置于调整状态。

(1) 调整样品,将由样品反射的光准直返回主机,在监视器上即可看到由样品两个表面产生的反射纹。

(2) 调整 TF 和 RF ,使这两个标准板产生的两束反射光在样品的边缘以外部分产生3~4条背景纹,在中心通过样品的部分产生透射纹。要求透射纹与反射纹之间有一交角,以便于判读。同时,要使两标准面与样品通光面间有一楔角,以消除干扰纹,提高干涉图片的质量。

(3) 待光路调好后,放入半反半透镜,将干涉图像成像于摄影胶片的位置上,拍摄干涉图(实验中采用一次成像胶片)。

4. 计算

在干涉图片上选择一参考点(通常使该点的反射纹、透射纹、背景纹的干涉级序都为整数,即在三种干涉纹的交点上),我们把这一点作为零点。其余的各被测点均选在反射纹与透射纹的交点上。读出相对于参考点的各干涉级序 Δm_R 、 Δm_T 、 Δm_B 将其代入(9)式,计算出对应的折射率之差(见图5及表1)。我们在实验中共选出被测点37个,实际上可按具体要求增加或减少被测点。

计算完毕后，从所列表格中选出折射率最大点（第16点）与最小点（第36点）。求两者之差，最后求得这块玻璃被测试样的均匀性值为：

$$\Delta n = 1.44 - (-1.38) = 2.8 \times 10^{-6}$$

四川省计量测试研究所也对该块样品用全息法进行过测量。其测量结果为 $\Delta n = 2.6 \times 10^{-6}$ 。显然这两种方法测出的结果是非常接近的，这表明，合干涉图法的测试数据是可靠的。

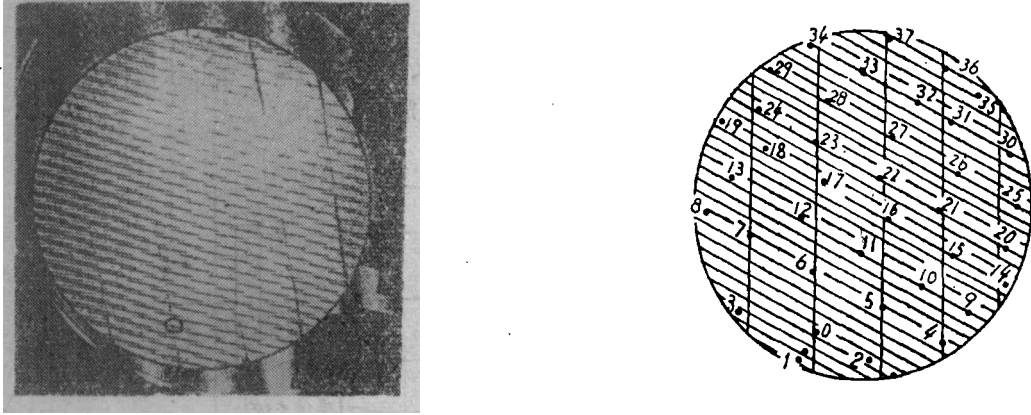


图5 合干涉图的分析

表1 $\phi 220$ 贴置玻璃测量数据表

采点	干涉级序差	折射率差 $\Delta n (\times 10^{-6})$	采点	干涉级序差	折射率差 $\Delta n (\times 10^{-6})$
1	8, -3 + 0.21	0.84	20	35, 15 - 3.13	0.28
2	-5, -1 - 0.78	0.96	21	38, 15 - 2	-0.97
3	1, -1 + 1.26	0.92	22	41, 15 - 1	-0.73
4	6, 4 - 2.05	1.02	23	44, 15 - 0	0.49
5	9, 4 - 1.00	0.72	24	47, 15 + 0.94	0.46
6	12, 4 + 0.94	0.48	25	46, 19 - 3.35	0.13
7	15, 4 + 1.00	1.19	26	49, 19 - 2.21	-1.37
8	17, 4 + 1.69	1.07	27	52, 19 - 1.20	1.31
9	16, 8 - 2.59	1.07	28	52, 19 - 0.31	0.02
10	19, 8 - 1.57	0.35	29	58, 19 + 0.69	0.34
11	22, 8 - 0.48	-0.49	30	58, 23 - 3.25	0.36
12	25, 8 + 0.4	1.19	31	61, 23 - 2.85	-0.92
13	28, 8 + 1.48	0.47	32	63, 23 - 1.53	-0.58
14	26, 12 + 3.16	-0.01	33	66, 23 - 0.57	0.16
15	29, 12 - 2.17	0.35	34	68, 23 + 0.07	0.57
16	32, 12 - 1	1.44	35	68, 26 - 2.84	0.45
17	35, 12 - 0.12	0.29	36	73, 27 - 2.65	-1.38
18	38, 12 + 0.87	0.53	37	76, 27 - 1.10	-0.02
19	40, 12 + 1.52	0.95	38		

$$\Delta n_{\max} = 1.44 - (-1.38) = 2.8 \times 10^{-6}$$

参 考 文 献

- [1] 李锡善等; 硅酸盐学报, 1978.No.3.
[2] F.E.Roterts and P.tangenteck; Apptied Optics, 1969, No.11.
[3] 于美文; 云光技术, 1978, No.1—2.
[4] 贺安之; 工程光学, 1978.

Abstract

In this paper composite interferogram method for measuring the homogeneity of good quality optical glasses is described, by which both linear and nonlinear changes of the homogeneity can be determined and the operation is much easier than that of holographic interference. The measurement accuracy can be $\pm 10^{-5}$.

A New Method for Measuring the Homogeneity of Good Quality Optical Glasses—Composite Interferograms Method

Zhu Huimin Yuan Xingjun Shen yuanhua Li Li

Abstract

In this paper composite interferogram method for measuring the homogeneity of good quality optical glasses is described, by which both linear and nonlinear changes of the homogeneity can be determined and the operation is much easier than that of holographic interference. The measurement accuracy can be $\pm 1 \times 10^{-6}$.