

温度对高精度光学玻璃折射率均匀性检测的影响

张建锋^{1,2} 曹学东¹ 吴时彬¹ 景洪伟¹ 阴旭¹

(¹中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209)
(²中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要 为了实现光学玻璃折射率均匀性的高精度(0.2×10^{-6})检测,测量环境温度引入的测量不确定度应小于 0.05×10^{-6} 。对测量过程中温度引入的不确定度进行了详细分析,总结了温度引起的5种误差源,对各种误差源进行了不确定度分析。结果表明,当测量腔中空气、贴置板、折射率液及被测件的径向温差不超过 ± 0.01 °C时,温度引起的测量不确定度为 0.031×10^{-6} ,满足精度要求。为实验室环境的改造提出了建议,并为高精度玻璃折射率均匀性测量提供了分析数据。

关键词 光学检测;折射率均匀性检测;温度;不确定度分析

中图分类号 TH741 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP49.011203

Temperature Effect on High Precision Measurement of Refractive Index Homogeneity of Optical Glass

Zhang Jianfeng^{1,2} Cao Xuedong¹ Wu Shibin¹ Jing Hongwei¹ Yin Xu¹

(¹Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China)
(²Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract To meet the requirement of high precision measurement (0.2×10^{-6}) of refractive index homogeneity of optical glass, the uncertainty caused by temperature of measurement environment should be less than 0.05×10^{-6} . Uncertainty analysis caused by temperature is taken for five error sources. The result shows that when the radial temperature difference of air, flats, oil, and component in the measurement cavity is ± 0.01 °C, the uncertainty caused by temperature is 0.031×10^{-6} , which can satisfy the precision. Important data are offered for high precision measurement of refractive index homogeneity of optical glass, and useful advices are given for the improvement of laboratory environment.

Key words optical test; measurement of refractive index homogeneity; temperature; uncertainty analysis

OCIS codes 120.3180; 120.4800; 120.6780

1 引言

光学玻璃的折射率均匀性是光学材料的重要参数之一,它的大小直接影响着系统的成像质量,因此,在精密光学仪器(如光刻镜头)的研制过程中,必须对所用的光学玻璃材料检测折射率均匀性。目前在中国科学院光电技术研究所承担的项目中使用的光学材料,其折射率均匀性检测的精度要求达到 0.2×10^{-6} 。传统的折射率均匀性检测方法,如平行光管法等,测量精度均无法达到要求。贴置板法和单件干涉法的测量精度通常可以达到 0.5×10^{-6} ,但单件干涉法要求被测件必须经过精抛光处理^[1~3],其面形精度要求高,不能满足批量快速检测的需求。项目的检测对象是毛坯玻璃,只能采用贴置板法。要将此方法的精度进一步提高,必须考虑温度变化给检测带来的误差。本文结合项目的需求,分析了温度变化对折射率均匀性测量的影响。

收稿日期: 2011-09-03; 收到修改稿日期: 2011-09-18; 网络出版日期: 2011-10-25

基金项目: 国家重大科技专项(2009ZX02204-003)资助课题。

作者简介: 张建锋(1985—),女,硕士研究生,主要从事光学测量方面的研究。E-mail: phility999@yahoo.cn

导师简介: 曹学东(1970—),男,硕士,研究员级高级工程师,主要从事光学及几何量精密测试技术等方面的研究。

E-mail: zkb@ioe.ac.cn

2 折射率均匀性测量原理

光学玻璃折射率均匀性是指同一块光学玻璃内部折射率的一致性,通常用其内部折射率的最大差值表示。贴置板法检测折射率均匀性原理如图 1 所示。第一步,将两贴置板用折射率液粘合,放置在干涉仪测量腔中,进行透射检测,得出检测结果 ω_1 ;第二步,将被测件夹在贴置板之间,接触面用折射率液粘合,得到干涉仪检测结果 ω_2 ,由被测件折射率不均匀性带来的波相差为 $\omega_2 - \omega_1$ 。

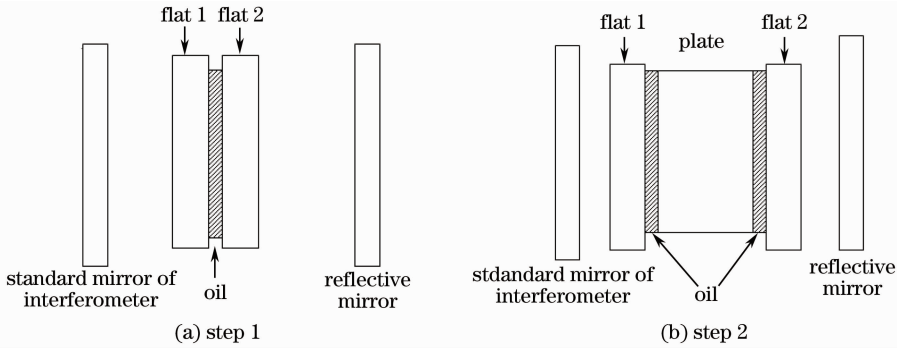


图 1 贴置板法检测示意图

Fig. 1 Sketch of oil-on-flat method

假设贴置板 1 的前后表面面形误差分别为 T_1, T_2 , 折射率为 n_1 , 折射率均匀性分布为 Δn_1 , 厚度为 L_1 ; 贴置板 2 的前后表面面形误差为 T_3, T_4 , 折射率为 n_2 , 折射率均匀性分布为 Δn_2 , 厚度为 L_2 ; 被测件的前后表面面形误差为 S_1, S_2 , 折射率为 n_3 , 折射率均匀性分布为 Δn_3 , 厚度为 L_3 ; 折射率液的折射率为 n_4 。当测量腔中温度均匀分布时,有

$$\omega_1 = T_1 + T_2(n_1 - n_4) + \Delta n_1 L_1 + T_3 + T_4(n_4 - n_1) + \Delta n_2 L_2, \quad (1)$$

$$\omega_2 = T_1 + T_2(n_1 - n_4) + \Delta n_1 L_1 + T_3 + T_4(n_4 - n_1) + \Delta n_2 L_2 + S_1(n_4 - n_3) + S_2(n_3 - n_4) + \Delta n_3 L_3. \quad (2)$$

(2)式减去(1)式得

$$\omega_2 - \omega_1 = \Delta n_3 L_3 + S_2(n_3 - n_4) - S_1(n_3 - n_4). \quad (3)$$

由以上推导可以看出,贴置板的面形误差、贴置板材料的折射率均匀性以及贴置板与折射率液的折射率匹配所带来的误差,经过两步测量相减后全部抵消,当折射率液与被测件折射率完全匹配,即 $n_3 = n_4$ 时,

$$\Delta n_3 = (\omega_1 - \omega_2) / L_3. \quad (4)$$

利用(4)式可以精确地求出被测件的折射率均匀性分布 Δn_3 。当测量腔中存在温度差时,不仅导致了折射率 n_1, n_2, n_3 的不均匀分布,还将使贴置板和被测件的面形发生变化,从而引入波相差,为测量带来误差。

通过以上分析可以总结出,影响该测量方法精度的因素有以下几个:1)干涉仪的测量精度;2)折射率液与被测件的折射率匹配程度;3)被测件厚度;4)实验环境影响(主要为温度)。

折射率均匀性检测的精度要达到 0.2×10^{-6} , 必须综合考虑以上 4 个因素的影响。以光刻投影曝光镜头常用到的光学材料为检测对象,在对以上 4 个误差源进行分析计算后,得出对于厚度为 50 mm 的被测件,温度所带来的不确定度[均方根(RMS)值]不大于 0.05×10^{-6} 。

3 温度对折射率均匀性检测的影响

高精度折射率均匀性测量通常在恒温环境下进行,而恒温环境往往存在温控误差及温度均匀性误差。测量光路中温度整体变化或轴向(z 轴方向)温差将引起空气、贴置板、折射率液及被测件折射率的 $x-y$ 平面内的整体变化,不影响测量结果 ω_1, ω_2 ; 而 $x-y$ 平面内的温度不均匀性,使空气、贴置板、折射率液及被测件的折射率在 $x-y$ 切面内变化不一致,从而影响 ω_1, ω_2 的测量结果。

除此之外,温度发生变化,还将导致被测件与贴置板发生热变形。热变形是指当环境温度发生变化时,镜子内部也产生温度变化,由于玻璃的热传导系数较小,热交换不均匀,致使镜子内部产生热应力,导致不均匀热膨胀,使镜面变形^[4~6]。热变形直接导致被测件和贴置板的面形变化,由于时间原因两步测量的温度分

布不可能一致,由此带来的贴置板的面形误差就不能互相抵消,从而带来测量误差。

在测量环境中,测量腔用独立密封的罩子与实验室环境隔离开,因此,气流扰动的影响很小,垂直(或水平)温差几乎可以忽略。受干涉仪光源的影响,测量腔中最容易出现径向温差(中心温度高于边缘温度)。实际测量前,各部件在测量腔中稳定几小时,可以认为贴置板、被测件和折射率液内部与测量腔的温度分布一致。下面以某投影光刻镜头所用材料作为检测对象,对测量腔中径向温度场带来的测量不确定度进行定量分析。各部件参数如表 1 所示(被测件和贴置板均为平板玻璃),温度场分布如图 2 所示。

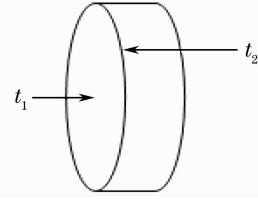


图 2 温度分布示意图

Fig. 2 Sketch of temperature distribution

表 1 各部件参数表

Table 1 Index of all the parts

Plate	Diameter $\phi=300$ mm, thickness $L_3=50$ mm, $n=1.4570$ ($\lambda=632.8$ nm)
Flats	Diameter $\phi=300$ mm, thickness $L_1=L_2=30$ mm, the same material with plate $n=1.4570$ ($\lambda=632.8$ nm)
Oil	Thickness $L_4=10$ μm , refractive index difference with plat (flats) is 10^{-4} , $\delta n=n_3-n_4=n_2-n_4=10^{-4}$
Measurement cavity	Total length $L=200$ mm (length between standard mirror and reflective mirror), working temperature $t=22$ $^{\circ}\text{C}$, $\lambda=632.8$ nm

4 温度引起的折射率均匀性检测不确定度

4.1 空气折射率变化引起的不确定度

空气折射率随温度非线性变化,由经验公式给出^[7]:

$$n(t) = 1 + \frac{n_0 - 1}{1 + \sigma t}, \quad (5)$$

式中 n_0 是 0 $^{\circ}\text{C}$ 时空气的折射率, $n_0=1.0003$; $n(t)$ 是温度为 t $^{\circ}\text{C}$ 时的空气折射率; $\sigma=0.00368$ $^{\circ}\text{C}^{-1}$ 。当温差为 Δt 时,空气折射率的变化 Δn 为

$$\Delta n = \frac{dn(t)}{dt} \Delta t = \frac{-\sigma(n_0 - 1)}{(1 + \sigma t)^2} \Delta t. \quad (6)$$

由第 2 节分析可得空气的厚度为 $L-L_1-L_2-L_3$, 那么由空气折射率变化引入的波相差为

$$\Delta \tau_1 = \Delta n(L - L_1 - L_2 - L_3). \quad (7)$$

由(4)式,(7)式可得由此引入的折射率均匀性测量不确定度 μ_1 为

$$\mu_1 = \frac{\Delta \tau_1}{L_3} = \frac{\Delta n(L - L_1 - L_2 - L_3)}{L_3}. \quad (8)$$

根据(8)式,用 Matlab 仿真不同温差下空气折射率变化对测量带来的不确定度,结果如表 2 所示,表中 PV 表示峰谷值。

表 2 空气折射率变化带来的不确定度

Table 2 Uncertainty caused by change of air's refractive index

Temperature margin $\Delta t / ^{\circ}\text{C}$	0.5	0.1	0.05	0.02	0.01	0.005
PV / 10^{-6}	0.850	0.170	0.085	3.40×10^{-2}	1.70×10^{-2}	8.50×10^{-3}
RMS / 10^{-6}	0.2	0.04	0.02	2.00×10^{-3}	4.00×10^{-3}	2.00×10^{-3}

4.2 贴置板折射率变化引起的不确定度

贴置板的材料是熔石英,对于波长为 632.8 nm 的入射光,折射率随温度变化的系数 k_2 (适用温度 20 $^{\circ}\text{C} \sim 25$ $^{\circ}\text{C}$) 为

$$k_2 = \frac{\Delta n}{\Delta t} = 9.97 \times 10^{-6} (\text{K}^{-1}). \quad (9)$$

由(9)式得,当两块贴置板内部温差为 Δt 时,折射率改变引入的波相差为

$$\Delta\omega_2 = k_2 \Delta t \sqrt{L_1^2 + L_2^2}. \quad (10)$$

由(4)式,(10)式可得贴置板折射率变化引入的不确定度 μ_2 为

$$\mu_2 = \frac{\Delta\omega_2}{L_3} = \frac{k_2 \Delta t}{L_3} \sqrt{L_1^2 + L_2^2}. \quad (11)$$

通过 Matlab 仿真计算,可以求出贴置板内部不同温差所带来的不确定度,如表 3 所示。

表 3 贴置板折射率变化带来的不确定度

Table 3 Uncertainty caused by change of flats' refractive index

Temperature margin $\Delta t / ^\circ\text{C}$	0.5	0.1	0.05	0.02	0.01	0.005
PV / 10^{-6}	4.32	0.846	0.423	0.17	0.085	0.042
RMS / 10^{-6}	0.997	0.199	0.099	0.039	0.02	0.009

4.3 折射率液折射率变化引起的不确定度

折射率液的折射率随温度变化的系数 k_3 为

$$k_3 = \Delta n / \Delta t = -4 \times 10^{-4} (\text{K}^{-1}).$$

当折射率液内部温差为 Δt 时,对测量引入的波相差为

$$\Delta\omega_3 = \sqrt{2} k_3 \Delta t L_4. \quad (12)$$

由(4)式,(12)式可得折射率液内部温差引入的不确定度 μ_3 为

$$\mu_3 = \frac{\Delta\omega_3}{L_3} = \frac{\sqrt{2} k_3 \Delta t L_4}{L_3}. \quad (13)$$

通过 Matlab 可计算出在不同温差下的 μ_3 ,如表 4 所示。

表 4 折射率液折射率变化带来的不确定度

Table 4 Uncertainty caused by change of oil's refractive index

Temperature margin $\Delta t / ^\circ\text{C}$	0.5	0.1	0.05	0.02	0.01	0.005
PV / 10^{-6}	5.66×10^{-5}	1.13×10^{-5}	5.66×10^{-6}	2.26×10^{-6}	1.13×10^{-6}	5.66×10^{-7}
RMS / 10^{-6}	1.33×10^{-5}	2.67×10^{-6}	1.33×10^{-6}	5.34×10^{-7}	2.67×10^{-7}	1.33×10^{-7}

4.4 被测件折射率变化引起的不确定度

被测件的材料与贴置板相同,折射率的温度系数 $k_2 = 9.97 \times 10^{-6} (\text{K}^{-1})$,被测件折射率的变化将直接影响检测结果,由此带来的不确定度 μ_4 为

$$\mu_4 = k_2 \Delta t. \quad (14)$$

由(14)式可计算得被测件内部在不同径向温差下折射率变化所引入的不确定度,如表 5 所示。

表 5 被测件折射率变化带来的不确定度

Table 5 Uncertainty caused by change of plate's refractive index

Temperature margin $\Delta t / ^\circ\text{C}$	0.5	0.1	0.05	0.02	0.01	0.005
PV / 10^{-6}	4.99	1.00	0.499	0.2	0.1	0.05
RMS / 10^{-6}	1.17	0.23	0.117	0.047	0.023	0.012

4.5 贴置板和被测件热变形带来的不确定度

贴置板和被测件内部温差将导致面形变化,变形量可通过 Ansys 软件进行有限元分析求解。材料参数如表 6 所示。

表 6 材料性能参数

Table 6 Material properties

Parameter	Density / ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	Young's modulus /GPa	Poisson ratio	Thermal expansion coefficient / [$10^{-6} (\text{K}^{-1})$]	Thermal conductivity / [$\text{W}/\text{m}^1 \cdot \text{K}^1$]
Value	2.201	72.2	0.16	0.52	1.3

有限元分析流程如下:添加稳态热系统,导入几何模型,划分网格;加载温度载荷进行热分析;将热分析的结果作为载荷导入到静力学分析系统中,建立静力学分析模型,施加支撑约束条件,求解轴向变形量;将结

果导出,用自编 Matlab 程序对数据进行处理。

设贴置板 1 的前后表面变形量分别为 $\Delta T_1, \Delta T_2$ (贴置板 2 与贴置板 1 情况相同),那么由两块贴置板热变形带来的不确定度 e_1 为

$$e_1 = \frac{2(\Delta T_1 - \delta n \Delta T_2)}{L_3} \quad (15)$$

设被测件前后表面变形量分别为 $\Delta S_1, \Delta S_2$,被测件热变形带来的不确定度 e_2 为

$$e_2 = \frac{\delta n (\Delta S_2 - \Delta S_1)}{L_3} \quad (16)$$

被测件和贴置板热变形给测量带来的合成不确定度 μ_5 为

$$\mu_2 = \sqrt{e_1^2 + e_2^2} \quad (17)$$

由(15)~(17)式可计算得到不同温差下被测件和贴置板热变形所带来的不确定度,如表 7 所示。

表 7 贴置板和被测件热变形带来的不确定度

Table 7 Uncertainty caused by thermal deformation of flats and plate

Temperature margin $\Delta t / ^\circ\text{C}$	0.5	0.1	0.05	0.02	0.01	0.005
PV / 10^{-6}	0.036	7.23×10^{-3}	3.61×10^{-3}	1.45×10^{-3}	7.23×10^{-4}	3.61×10^{-4}
RMS / 10^{-6}	0.008	1.61×10^{-3}	8.02×10^{-4}	3.11×10^{-4}	1.78×10^{-4}	8.89×10^{-5}

5 结果分析

通过以上分析,可以计算温度引起的合成不确定度 μ 为

$$\mu = \sqrt{\sum_{i=1}^S \mu_i^2} \quad (18)$$

通过(18)式计算不同径向温差下的合成不确定度,结果如表 8 所示。

表 8 合成不确定度

Table 8 Total uncertainty

Temperature margin $\Delta t / ^\circ\text{C}$	0.5	0.1	0.05	0.02	0.01	0.005
PV / 10^{-6}	6.597	1.319	0.660	0.264	0.132	0.066
RMS / 10^{-6}	1.550	0.310	0.155	0.062	0.031	0.016

由表 8 得出,当测量腔中空气、贴置板、被测件、折射率液的径向最大温差为 $\pm 0.01 ^\circ\text{C}$ 时,合成不确定度 μ 的 RMS 值为 0.031×10^{-6} ,小于 0.05×10^{-6} ,满足检测精度的要求。由表 2~5 及表 7 数据绘制出饼图,如图 3 所示,从中可以直观地看出各个误差源所占比例:被测件和贴置板的折射率变化所带来的误差最大,共占 91%,而被测件和贴置板的热变形和折射率液折射率的变化带来的误差可以忽略不计。因此,可以从以下几个措施入手,减小误差,提高精度:

1) 在贴置板折射率与折射率液、被测件折射率满足一定的匹配程度的前提下,应选择折射率随温度变化系数较小的材料。

2) 在保证正确测量的同时,尽量减小测量腔的长度,以减小空气不稳定性带来的干扰。

3) 严格控制环境温度,减小测量人员及空调送风的影响,使整个实验室环境处在一个较理想的恒温环境中;将测量腔用封闭的罩子单独隔离开,以减小外界气流的影响,营造一个更稳定的小恒温环境;测量前,被测件和贴置板应放置在测量腔中恒温一段时间,测量开始后,应尽快完成测量,以减小光源热辐射对测量精度的影响。

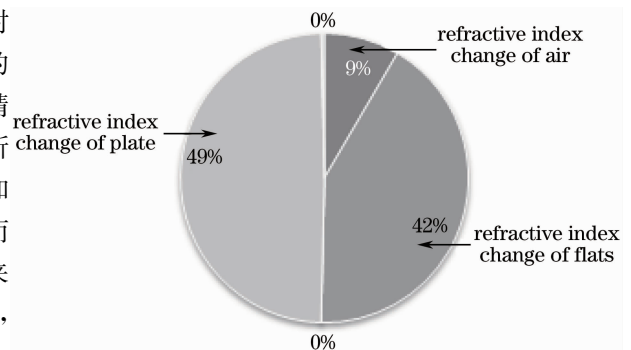


图 3 径向温差为 $0.01 ^\circ\text{C}$ 时各误差源所占比例

Fig. 3 Proportion of all the error sources when radial temperature gradient is $0.01 ^\circ\text{C}$

4) 在相同的测量条件下,被测件越厚,折射率的热稳定性越好,测量误差越小。

6 结 论

分析结果表明,要达到项目精度的要求,测量腔中的空气及各部件的径向温度差不超过 $\pm 0.01\text{ }^{\circ}\text{C}$,此时,温度引起的合成不确定度为 0.03×10^{-6} ,从而使整个测量的精度达到 0.2×10^{-6} 。针对高精度光学玻璃材料折射率均匀性检测,对温度引起的不确定度分析进行了详细分析,为实验室改造提出了参考性意见,并且对提高精度给出了多种可行性措施。

参 考 文 献

- 1 Guo Peiji, Yu Jingchi, Yu Zezhao *et al.*. High accuracy testing method of the homogeneity of optical glass[J]. *Optical Technique*, 2011, **27**(6): 528~531
郭培基, 余景池, 于泽钊 等. 光学玻璃光学均匀性高精度测量技术[J]. 光学技术, 2011, **27**(6): 528~531
- 2 Ren Huan, Yuan Jing, Xu Hua *et al.*. Optical homogeneity measure method analysis of optical material[J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2007, **5**(6): 48~51
任 寰, 袁 静, 许 华 等. 光学材料光学均匀性检测方法分析[J]. 光学与光电技术, 2007, **5**(6): 48~51
- 3 Andy Fanning, Joe Ellison, Dan Green. Polished homogeneity testing of corning fused silica boules[C]. *SPIE*, 1999, **3782**: 453~463
- 4 Xu Rongwei, Liu Liren, Liu Hongzhan *et al.*. Support schemes and thermal deformation analysis of large-aperture interferometer mirrors[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(6): 809~815
徐荣伟, 刘立人, 刘宏展 等. 大型干涉仪镜子的支承设计与温度变形分析[J]. 光学学报, 2005, **25**(6): 809~815
- 5 Chen Hua, Shi Zhenguang, Sui Yongxin *et al.*. Thermal deformation analysis of optical surfaces caused by environmental temperature during interferometric testing[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(1): 0112007
陈 华, 史振广, 隋永新 等. 干涉检测中环境温度引起的镜面变形分析[J]. 光学学报, 2011, **31**(1): 0112007
- 6 Chen Xu, Yuan Wenquan, Feng Yutao *et al.*. Study of the error of the reference lens in absolute spherical testing and the thermal deformation model establishment[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(2): 0212002
陈 旭, 袁文全, 冯玉涛 等. 绝对检验参考镜误差分析与热变形模型建立[J]. 光学学报, 2011, **31**(2): 0212002
- 7 J. C. Murphy, L. C. Aamodt. Photothermal spectroscopy using optical beam probing: mirage effect[J]. *J. Appl. Phys.*, 1980, **51**(9): 4580~4588