

液体基准平面的 $\Phi 300$ mm 立式斐索干涉仪系统误差标定

马致遥, 陈磊, 郑东晖*, 马海颖, 李若琨, 黄晨, 胡晨辉

(南京理工大学 电子工程与光电技术学院, 江苏南京 210094)

摘要: 在高精度的干涉检测中, 干涉仪系统误差的标定越来越重要。根据立式斐索干涉仪的结构特点, 采用液面作为平面基准, 对参考平晶的自重变形量以及夹持形变进行补偿校准, 对其系统误差进行标定。理论上, 液面和地球半径的曲率相同, 可认作平面基准对立式结构干涉仪的系统误差进行标定。针对 $\Phi 300$ mm 立式斐索干涉仪, 研究了不同的液体粘度、液体厚度、干涉腔长和环境温度对液面测量的影响, 构建了可靠的液面基准。通过液面基准, 指导干涉仪参考平晶的装调校准, 对其系统误差进行补偿, 干涉仪精度达到 0.035λ , 优于 $\lambda/25$ 。为了进一步验证液面基准的可靠性与准确性, 进行了重复性实验, 并且采用 $\Phi 400$ mm 的液面和 $\Phi 450$ mm 的液面进行比对测试, 两次标定结果的偏差优于 $\lambda/100$ (6 nm), 验证了液面基准的可靠性与准确性。

关键词: 干涉测量; 液面基准; 表面形状测量; 系统误差

中图分类号: O436 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA20210880

System error calibration for $\Phi 300$ mm vertical Fizeau interferometer based on liquid reference

Ma Zhiyao, Chen Lei, Zheng Donghui*, Ma Haiying, Li Ruokun, Huang Chen, Hu Chenhui

(School of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: In high-precision interference detection, the calibration of interferometer system errors was important. According to the structural characteristics of the vertical Fizeau interferometer, the liquid reference plane was used as a reference to compensate and calibrate the self-weight deformation and clamping deformation of the reference flat crystal, and calibrate its system error. Theoretically, the curvature of the liquid surface and the radius of the earth were the same, which can be regarded as a plane reference to calibrate the system error of the vertical structure interferometer. For the $\Phi 300$ mm vertical Fizeau interferometer, the influence of different liquid viscosity, thickness, interference cavity length and temperature was studied, and a reliable liquid reference plane reference was constructed. Through the liquid reference plane, the interferometer was guided to refer to the installation and calibration of the reference flat crystal, and its system error was compensated. The accuracy of the interferometry reached 0.035λ , which was better than $\lambda/25$. In order to further verify the reliability and accuracy of the liquid reference plane, repeatability experiments were carried out, and the liquid reference plane of $\Phi 400$ mm and $\Phi 450$ mm were used for comparison test. The deviation of the two calibration results was better than $\lambda/100$ (6 nm). The reliability and accuracy of the liquid reference plane were verified.

Key words: interferometry; liquid reference; surface shape measurement; system error

收稿日期: 2021-11-24; 修订日期: 2021-12-01

基金项目: 国家自然科学基金 (62005122; U1731115); 江苏省自然科学基金 (BK20200458)

作者简介: 马致遥, 男, 博士生, 主要从事光学干涉测量方面的研究。

导师简介: 陈磊, 男, 研究员, 博士, 主要从事精密光学测试和光电智能化仪器等方面的研究。

通讯作者: 郑东晖, 男, 讲师, 博士, 主要从事精密光学测试技术方面的研究。

0 引言

近年来,随着干涉检测技术的不断发展,普遍应用在诸多领域中^[1-4]。传统的平面干涉检验一般是采用高精度的参考平面对待测件进行测量,它的测量精度受制于参考平面的面形精度。当元件的精度与参考件相近的时候,普通的相对检验则会存在很大的误差。因此,需要通过绝对检验方法对参考平面本身的误差进行标定,以此提高测试精度。对于这部分误差分量,称之为系统误差。

绝对检验方法中,传统的平晶三面互检法由 G.Schulz 提出^[5-6],后来发展出了奇偶函数法^[7]、旋转对称法^[8]等方法。这些方法对硬件设备的要求较高,因此一般常用于中小口径平面的绝对检验,便于实验人员操作。对于大口径的干涉仪,则可以采用其他的方法进行检测^[9-10]。而对于立式干涉仪,根据其结构特点,可采用液面基准进行绝对检验,对其系统误差进行标定。

1893 年, L.Rayleigh 提出了将稳定的液体平面作为基准平面进行光学干涉测量的方法^[11]。1998 年, L.Powell 等^[12]利用 DC705 硅油建立液面基准,对口径为 240 mm 的光学平面进行了测量,补偿了重力的变形量,获取待测平面在水平和垂直两个方向上的绝对面形,测量精度优于 $\lambda/100$ 。2006 年, Ralf D. Geckeler 等^[13]以汞作为液体材料,构建了口径大于 250 mm 的平面基准,测量不确定度达到 3.8 nm。2014 年, 苗二龙等^[14]采用液面基准法在立式斐索干涉仪对光学平面的 power 项进行绝对标定,结合旋转平移的绝对检验方法对该平面的其他 Zernike 项进行标定,得到了完整的高精度平面绝对标定。2016 年, Raja Ramanna 先进技术中心 Sanjib Chatterjee 等采用石蜡油作为液面材料,用于标定偏振移相斐索干涉仪^[15]。2019 年, Haiyang Quan 等^[16]提出了一种通过干涉法实现薄 X 射线基板绝对平面度测量方法。他采用了二甲硅油作为参考面,利用迭代法求出基板的绝对平面度。2020 年, 陈佳^[17]等对液体、液盘的各项性质进行综合分析,建立了高精度的液面基准,用于动态干涉仪的系统误差标定。

因为液面对环境的影响较为敏感,所以对于大口

径的 $\Phi 300$ 立式斐索干涉仪,先通过实验确定合适的条件。之后再通过两块不同的液面对干涉仪的系统误差进行测量和标定。

1 液面检验原理及变形补偿

1.1 液面检验原理

液体在受到地球重力的影响下,理论上其表面的曲率半径与地球的曲率半径一致,如图 1 所示。如果 y 为液面口径, R 为地球曲率半径,即可以得出矢高 h 的表达式。

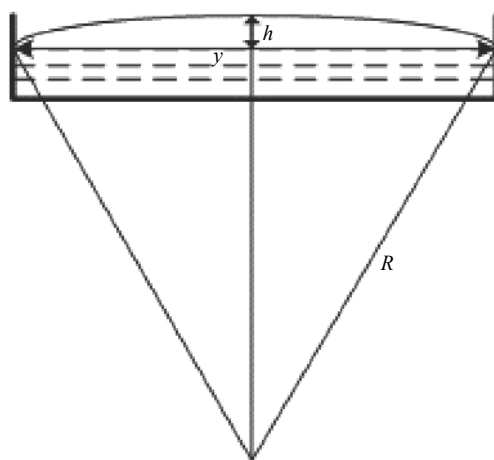


图 1 液面自然状态矢高

Fig.1 Natural state vector height of liquid

因为 $y \gg h$, 最终得出液面与标准平面的偏差可表示为:

$$h = \frac{y^2}{8R} \quad (1)$$

对于液面基准法而言,所用液面基准的尺寸是固定,因此 h 是一个已知的固定值。当对于口径为 $y=400$ mm 的液面,地球半径取 $R=6\ 400$ km,可以推算出矢高约为 3.125 nm,对于波长 632.8 nm 的激光器,仅仅相当于 $\lambda/200$ 。当 $y=450$ mm 时,推算出此时的矢高约为 3.955 nm,相当于 $\lambda/160$ 。因此,在外界环境稳定干扰误差非常小的情况下液面稳定的情况下,两种液面的矢高都远小于干涉仪的误差容限,可以将液面视为“绝对平面”作为平面基准对干涉仪进行系统误差的校准。

采用的 $\Phi 300$ mm 立式斐索干涉仪原理光路及仪

器如图 2 所示, 为保证液面的稳定性, 采用了波长调谐激光器进行移相, 同时整个干涉仪底部通过气浮支撑, 实现减震的效果。激光通过准直物镜变成平行光, 经过参考平晶透射后被液面反射, 在共轭位置形成干涉图, 通过 CCD 采集。

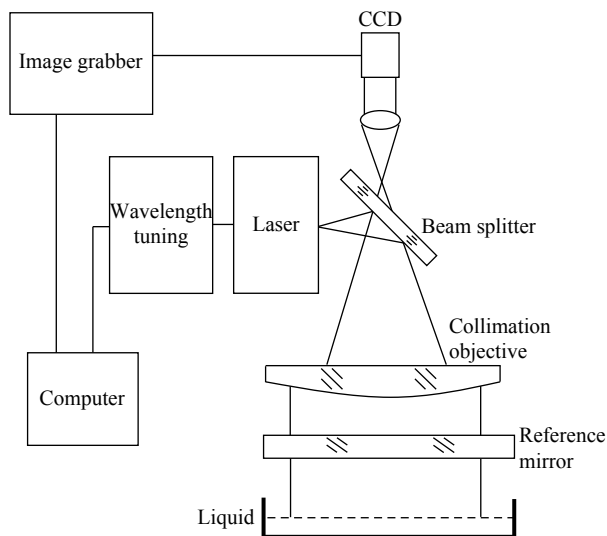


图 2 (a) $\Phi 300$ mm 斐索干涉仪原理图; (b) $\Phi 300$ mm 斐索干涉仪
Fig.2 (a) Schematic diagram of $\Phi 300$ mm Fizeau interferometer;
(b) $\Phi 300$ mm Fizeau interferometer

为更好的抑制随机误差的影响, 采用第一个 $\Phi 400$ mm 液面作为基准进行 N 次测量, 设第 i 次测量得到的波前差为 $W_i(x,y)$:

$$\bar{W}_i(x,y) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N W_i(x,y) \quad (2)$$

式中: $\bar{W}_i(x,y)$ 为 N 次测量的平均值。

更换成 $\Phi 450$ mm 液面进行系统误差测量, 进行

M 次测量, 设第 j 次测量得到的波前差为 $\bar{W}_j(x,y)$:

$$\bar{W}_j(x,y) = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M W_j(x,y) \quad (3)$$

式中: ΔW 为 M 次测量的平均值, 减去 $\Phi 400$ mm 液面测量结果 $\bar{W}_i(x,y)$, 得到残差波面。

$$\Delta W(x,y) = \bar{W}_i(x,y) - \bar{W}_j(x,y) \quad (4)$$

对残差波面 ΔW 进行分析, 验证使用液面对干涉仪的系统误差进行标定的可靠性。若残差小于干涉仪的精度容限, 则认为使用液面对干涉仪的系统误差进行标定的方法是可靠的。

1.2 系统误差测量及校正方案

在大口径的立式干涉仪中, 参考平晶不可避免的会因为自重产生变形以及夹持形变, 在测量结果中引入一个额外的误差量。这种由于参考平晶自身面形带来的误差被认为是整个干涉仪的系统误差。可以通过在平晶的抛光过程中磨一个低光圈用来粗略补偿一部分的重力变形量。该实验的参考平晶采用如图 3 所示的支撑结构, 通过调整周围的一圈环点支撑螺钉, 改变支撑方式, 校正参考平晶的变形量。

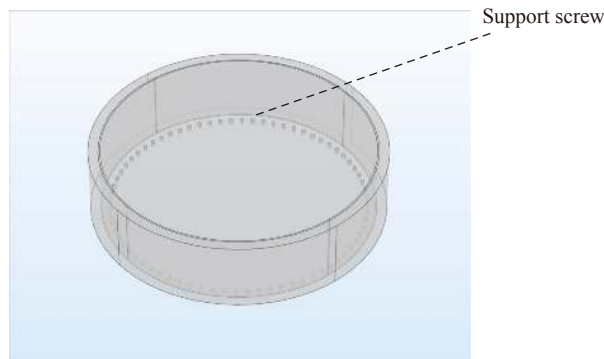


图 3 环点支撑结构
Fig.3 Ring point support structure

2 液面基准实验条件

由于液面对环境因素敏感, 振动、气流、温湿度等因素都会对其平整度和稳定性都会产生影响。在根据文献和以往的经验, 文中使用硅油作为液面材料进行实验。确定最适合进行测量的液体粘度、液面厚度、测量腔长、实验温度。

2.1 液体粘度研究

液体的粘度直接影响了液面的稳定性。低粘度的液体对环境较为敏感, 细微的气流扰动或者振动都会破坏其稳定性, 因此对外界环境控制的要求极高。而高粘度的液体则稳定性较好, 可以防止轻微振动的影响, 对环境的抗干扰能力强。但由于粘度过高时液面稳定所需的时间非常长, 因此选择一个合适粘度的

液体对液面基准的建立有重大的影响。实验选取了 10、100、1 000 cs 三种不同粘度的二甲基硅油在 $\Phi 100$ mm 的干涉仪上进行实验, 液面的厚度均为 2 mm, 实验室温度为 20 °C。待三种液体形成的干涉条纹稳定时进行测量。10 cs 和 100 cs 粘度的硅油在 30 min 内均已经达到稳定状态, 而 1 000 cs 的需要静置 24 h 以上才能稳定。测试得到的波面图如图 4 所示。

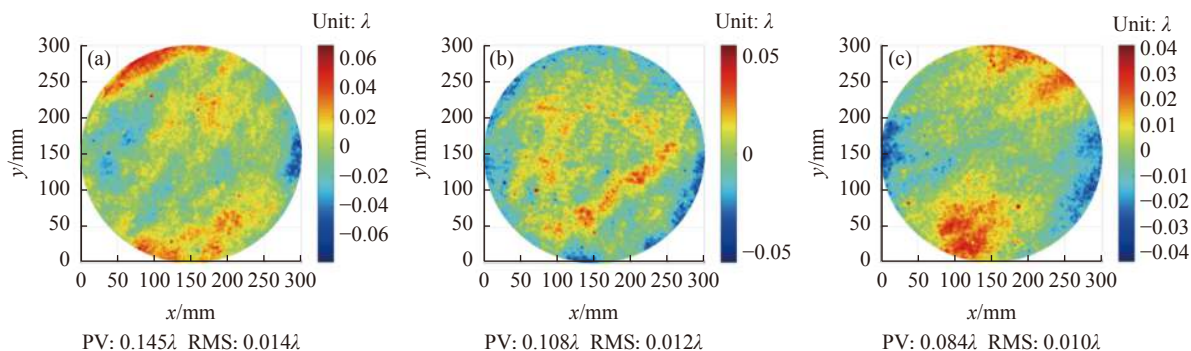


图 4 (a) 10 cs 硅油测量结果; (b) 100 cs 硅油测量结果; (c) 1000 cs 硅油测量结果

Fig.4 (a) 10 cs silicone oil measurement result; (b) 100 cs silicone oil measurement result; (c) 1000 cs silicone oil measurement result

根据图 4 的结果, 10 cs 硅油求解出的面形结果较差, 仅有 0.145λ。当液体粘度过低时, 液面在液盘内流动, 稳定性较差, 会影响测试结果。100 cs 的面形结果峰谷 (PV) 值在 0.108λ, 1000 cs 的面形结果在 0.084λ, 1000 cs 的硅油解算的波面结果略优于 100 cs。说明硅油粘度越大, 稳定性越好。但是 1000 cs 硅油粘度过大, 静置时间要求过长, 每次调整都需要等待很长时间, 不便于后续的实验操作。因此后续实验使用 100 cs 的硅油进行。

2.2 液面厚度实验

液体的厚度会对液面的稳定性产生影响。液体和液盘壁相互作用产生的自振频率接近于液体本身晃动的自振频率, 此时当液体厚度增加时, 液体的自振频率逐渐增加, 那么液体晃动的情况就越剧烈。为探究获得实验中液面的最佳厚度, 展开硅油厚度实验。实验中选用 100 cs 的二甲基硅油, 厚度分别设置为 2.0、2.2、2.4、2.6、2.8、3.0 mm, 其余条件均保持一致, 对这六种厚度的液面进行液面测量。测量解算出的测试波面结果如图 5 所示。

上述实验的重复性结果如图 6 所示, 结合图 5 和图 6, 当液体厚度在 2.0 mm 时, PV 值能稳定在 0.054λ; 而液体厚度在 3.0 mm 时, 液面测试结果中液面平整度较差, PV 值达到了 0.084λ。同样实验结果同样符合表面波声光效应原理, 液体厚度与液面表面波振幅成正比, 与液面稳定性成反比, 即液体厚度越厚, 液体振动幅度越大, 对应的波面 PV 值越大。

若加入的硅油过薄, 可能会导致硅油不能完整均匀的铺展在液盘上。同时液体表面的面形会受到液盘底部的平整度的影响, 如图 7(a) 所示为厚度 1.5 mm 的液面面形图, PV 值为 0.138λ, 均方根 (RMS) 值为 0.016λ。

图 7(a) 的结果存在严重误差, 通过移动液盘位置判断得到误差由于液盘底部面形影响引起。而液盘在加工过程中, 底面面形受加工工艺影响, 平整度不能达到较高的精度要求, 因此需要尽可能的避免液盘底部对于液面的影响。因此在不更改液盘底面面形平整度的条件下, 液面厚度选择不应低于

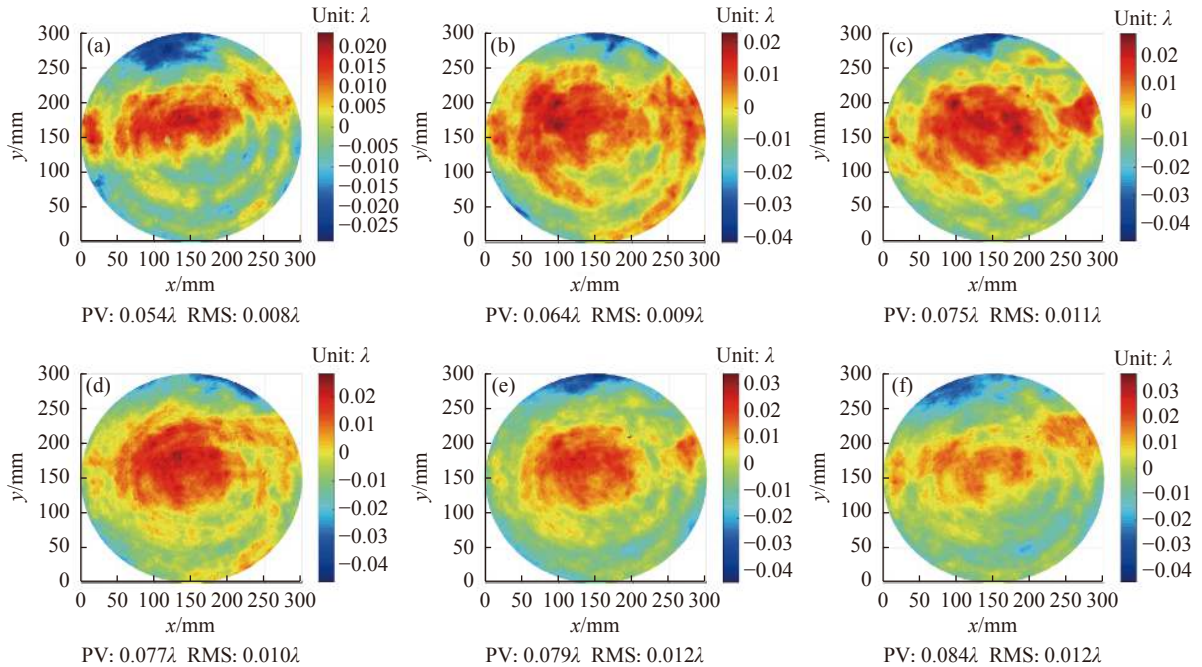


图 5 (a) 2.0 mm 测量结果; (b) 2.2 mm 测量结果; (c) 2.4 mm 测量结果; (d) 2.6 mm 测量结果; (e) 2.8 mm 测量结果; (f) 3.0 mm 测量结果

Fig.5 (a) 2.0 mm measurement result; (b) 2.2 mm measurement result; (c) 2.4 mm measurement result; (d) 2.6 mm measurement result; (e) 2.8 mm measurement result; (f) 3.0 mm measurement result

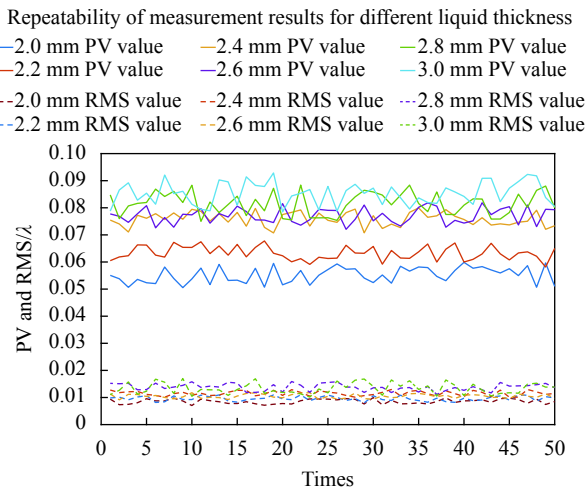


图 6 不同液体厚度的测量结果重复性

Fig.6 Repeatability of measurement results for different liquid thickness

1.5 mm。

当液面厚度选择 1.8 mm 时, 此时液面面形图如图 7(b) 所示, 此时面形的 PV 值为 0.054λ, 与液面厚度选取 2.0 mm 时面形的 PV 值一致, 面形平整度并没有明显变化。但考虑液体的挥发性, 要适当加厚液体厚度。因此液体厚度选择 2.0 mm 或者略高于 2.0 mm。

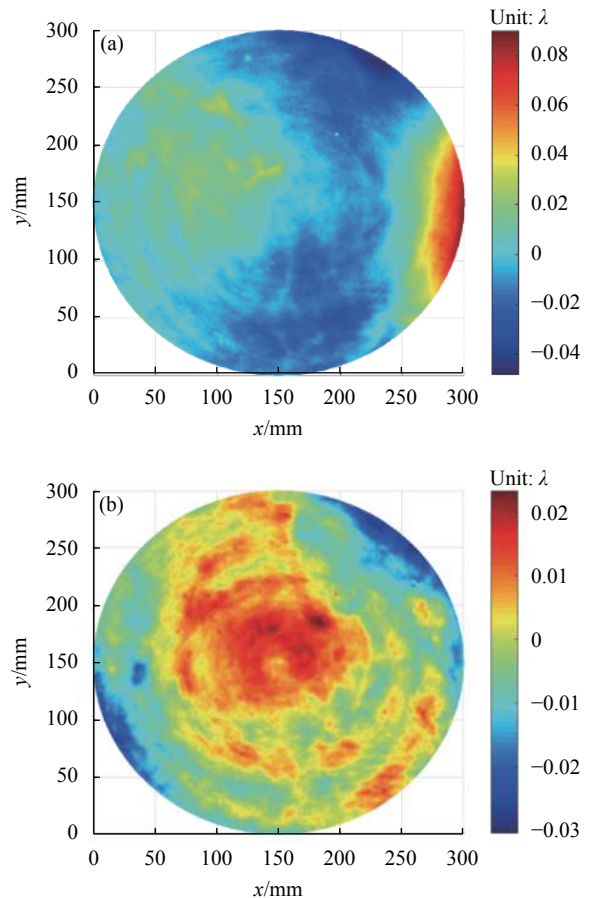


图 7 (a) 1.5 mm 测量结果; (b) 1.8 mm 测量结果

Fig.7 (a) 1.5 mm measurement result; (b) 1.8 mm measurement result

2.3 干涉腔长实验

干涉腔内空气受到温度变化的影响,导致其折射率发生改变,从而导致测试光的光程差发生改变引入误差。当不能确定各种大气物理量时,为了简便计算,只考虑波长、大气压强、湿度、水汽压对折射率的影响。在指定标准大气环境为温度 $T=273.15\text{ K}$, 大气压强 $P=1\ 013.25\text{ hPa}$, CO_2 含量 $x=0.0375\%$, 水汽压 $e=0.00\text{ hPa}$ 时,大气折射率公式可以采用 Rüeger 公式表示为:

$$N_0 = (n - 1) \times 10^6 = 287.615\ 5 + \frac{1.628\ 87}{\lambda^2} + \frac{0.068\ 00}{\lambda^4} \quad (5)$$

式中: λ 为光学波长,单位 μm 。

而实际大气折射率(折射度)为:

$$N = (n - 1) \times 10^6 = \left(\frac{273.15}{1\ 013.25} \cdot \frac{P}{T} \cdot N_0 \right) - 11.27 \frac{e}{T} \quad (6)$$

式中: P 为实际大气压强; T 为温度; e 为水汽压强。

此时能够得到温度、压强、湿度对折射率的具体影响。而根据斐索干涉仪相移测量原理,由参考光和被测光之间的光程差引入的相位可以表示为:

$$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot 2Ln \quad (7)$$

式中: L 是干涉腔的长度; n 为空气折射率。空气折射率 n 会受到环境压强和温湿度的影响,从而引入测量误差。而干涉腔腔长会放大测量,因此需要通过实验得到干涉仪腔长对液面面形的影响。

现采用 $\Phi 300\text{ mm}$ 立式斐索干涉仪进行干涉腔腔长实验,探究得到适用于该干涉仪的最佳腔长。分别将干涉腔的腔长设置为 350 mm 和 500 mm ,液面稳定 30 min 以上,测量解算得到波面图,如图 8 所示。

从上述实验中可以得到干涉腔长 350 mm 时对应的面形 PV 值为 33.7 nm ,腔长为 500 mm 时对应的面形 PV 值为 24.9 nm 。这两种不同干涉腔腔长的实验结果表明随着干涉腔腔长的增加,面形的 PV 值逐渐降低,即面形的平整度在逐渐变优。所以针对该 $\Phi 300\text{ mm}$ 立式斐索干涉仪,干涉腔腔长选择 500 mm 较为合适。

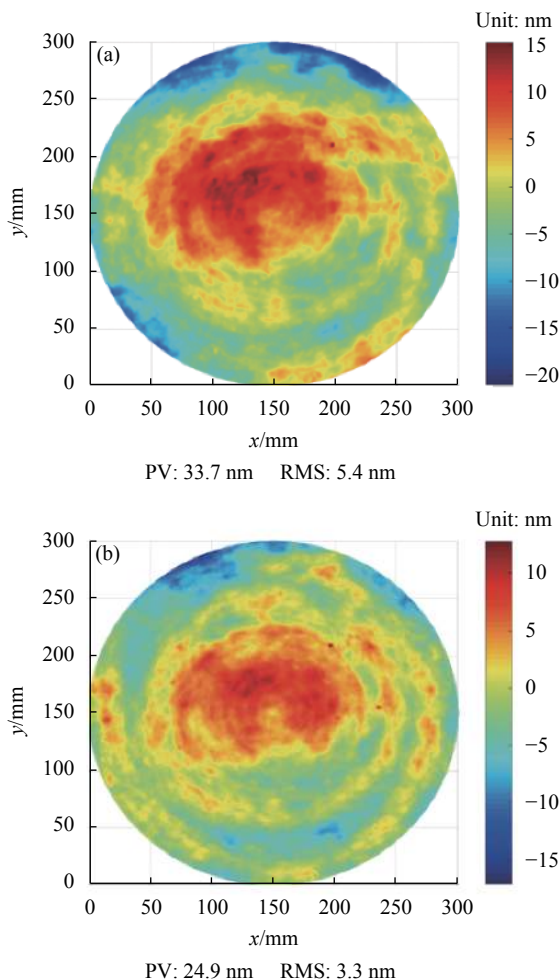


图 8 (a) 350 mm 腔长测量结果; (b) 500 mm 腔长测量结果

Fig.8 (a) 350 mm cavity length measurement result; (b) 500 mm cavity length measurement result

2.4 环境温度控制

实验采用精密的空调进行温度控制,能够将环境温度稳定在 $(20 \pm 0.1)\text{ }^\circ\text{C}$ 。采用 400 mm 金属圆盘,硅油厚度 2.0 mm ,确保实验室除测试人员外无其他人员时开始进行实验。等待干涉条纹平直且稳定时,对波面进行测量,结果如图 9 所示。

环境温度为 $20.0\text{ }^\circ\text{C}$ 时,测量得到的面形结果如图 9(a) 所示, PV 值为 30.8 nm , RMS 值为 4.8 nm 。环境温度为 $20.1\text{ }^\circ\text{C}$ 时,测量得到的面形结果如图 9(b) 所示, PV 值为 33.5 nm , RMS 值为 5.3 nm 。两者面形分布基本一致, PV 仅相差 2.7 nm ,在容限范围内,因此当环境温度控制在 $0.1\text{ }^\circ\text{C}$ 以内时,对测量结果的影响并不大。

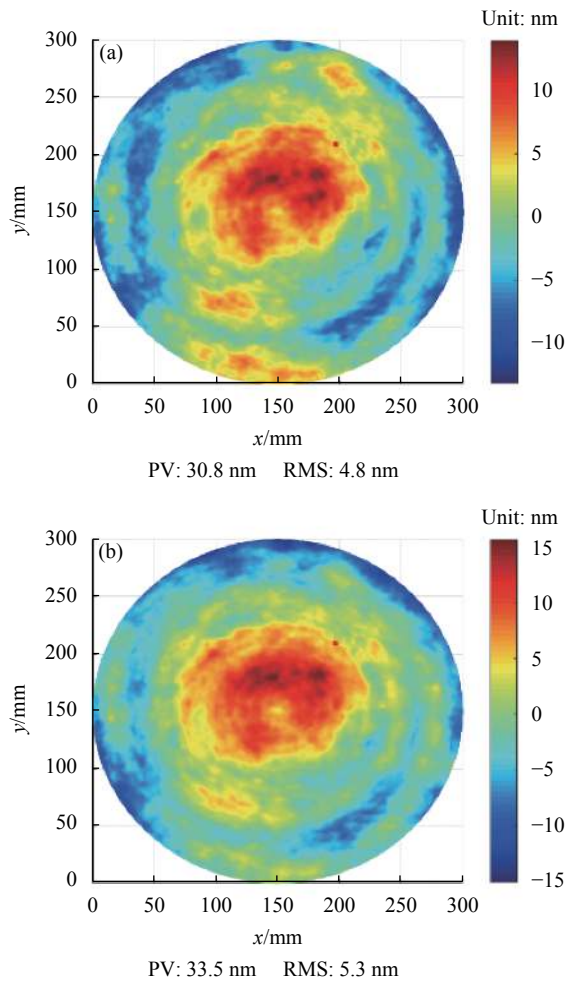


图 9 (a) 20.0 °C 测量结果; (b) 20.1 °C 测量结果

Fig.9 (a) 20.0 °C measurement result; (b) 20.1 °C measurement result

实验装置由精密空调系统控制干涉仪环境温度, 并进行监测, 将 4 个温度探头放置在液面的东南西北 4 个方向进行记录, 如图 10(a) 为温度检测装置示意图。

在该环境控制的基础上, 每隔 5 min 进行一次测量, 测量时间持续 7 个小时, 绘制面形 PV 值 RMS 值与温湿度变化的曲线图, 如图 10(b) 所示。

从图 10 可以看出, 温度的平均值变化较小, 基本保持稳定, 平均温度的变化量为 0.068 °C, 小于 0.1 °C, 温度稳定性较高, 能够满足测量要求。此时液面的 PV 值在 0.046λ 上下浮动, RMS 值在 0.006λ 上下浮动, 无明显变化, 稳定性较好。说明实验环境的温度控制结果良好, 微小的环境变化对液面面形结果不会产生影响, 满足液面基准要求。

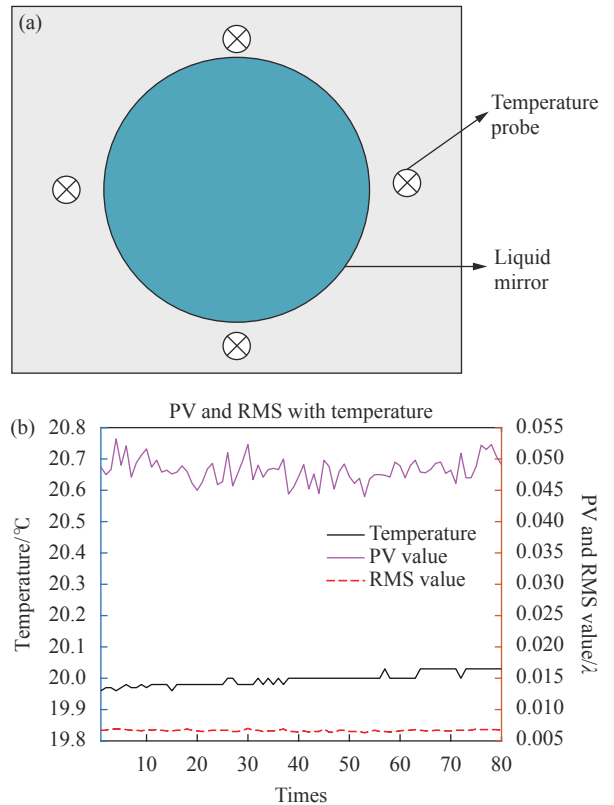


图 10 (a) 温度监测装置; (b) PV、RMS 值与温度变化曲线

Fig.10 (a) Temperature monitoring device; (b) Relationship between PV, RMS values and temperature

3 实验结果

3.1 系统误差测量结果

在上述实验得到的条件, 在 500 mm 腔长的实验条件下, 使用 $\Phi 400$ mm 液面, 2.0 mm 厚度 100 cs 的硅油, 温度控制在 (20.0 ± 0.1) °C, 整个干涉仪通过气浮支撑实现减震, 对 $\Phi 300$ mm 立式斐索干涉仪的系统误差进行测量。

对参考平晶进行测试, 通过测试所得的结果指导调整支撑螺钉, 不断校正变形误差最终得到最优的系统误差测试结果。

所使用的 $\Phi 400$ mm 的液面以及优化校正过程如图 11 所示。校正后的结果如图 12 所示, 波面 PV 值为 0.0350λ (22.1 nm), RMS 值为 0.0051λ (3.2 nm), 其中 λ 为 633 nm。

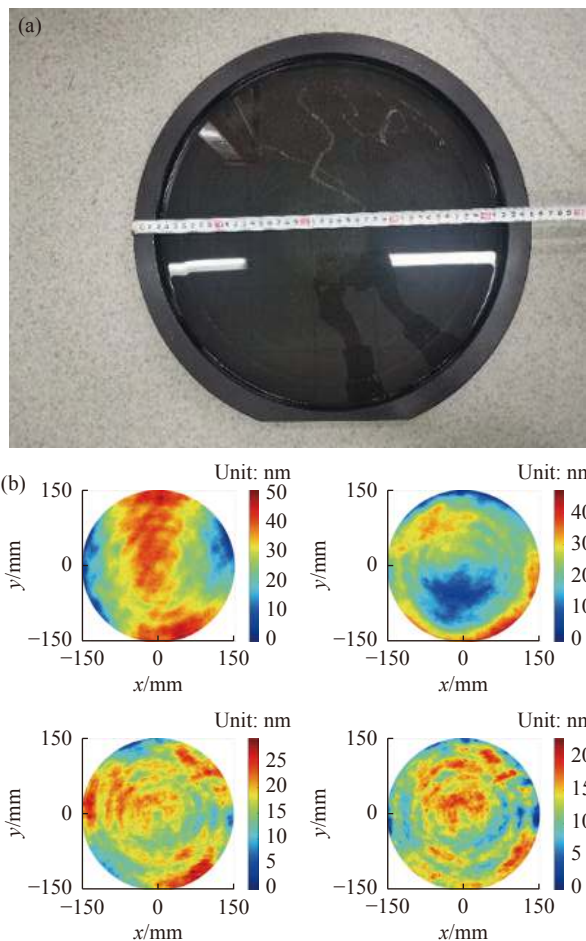


图 11 (a) $\Phi 400$ mm 液面照片; (b) 参考平晶校正过程

Fig.11 (a) $\Phi 400$ mm liquid reference plane; (b) Reference flat crystal calibration process

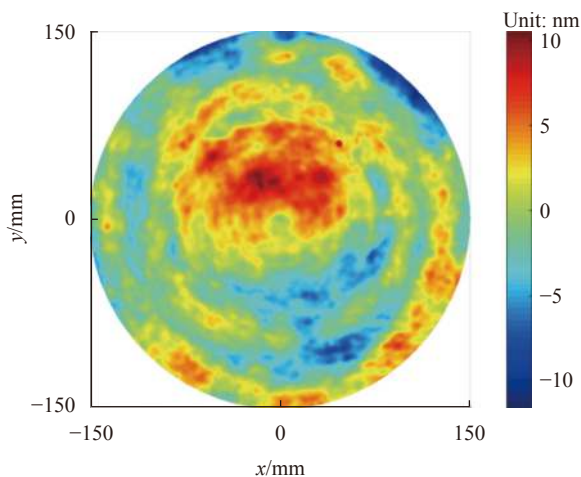


图 12 $\Phi 400$ mm 液面测量系统误差结果

Fig.12 System error measured by $\Phi 400$ mm liquid reference plane

为了进一步验证液面系统的准确性,采用另外一个 $\Phi 450$ mm 液面基准对于干涉仪的系统误差进行标

定,液面实物及其测量的结果如图 13 所示,波面 PV 值为 $0.0354\lambda(22.4\text{ nm})$, RMS 值为 $0.0057\lambda(3.6\text{ nm})$,与 $\Phi 400$ mm 液面的标定结果基本一致。

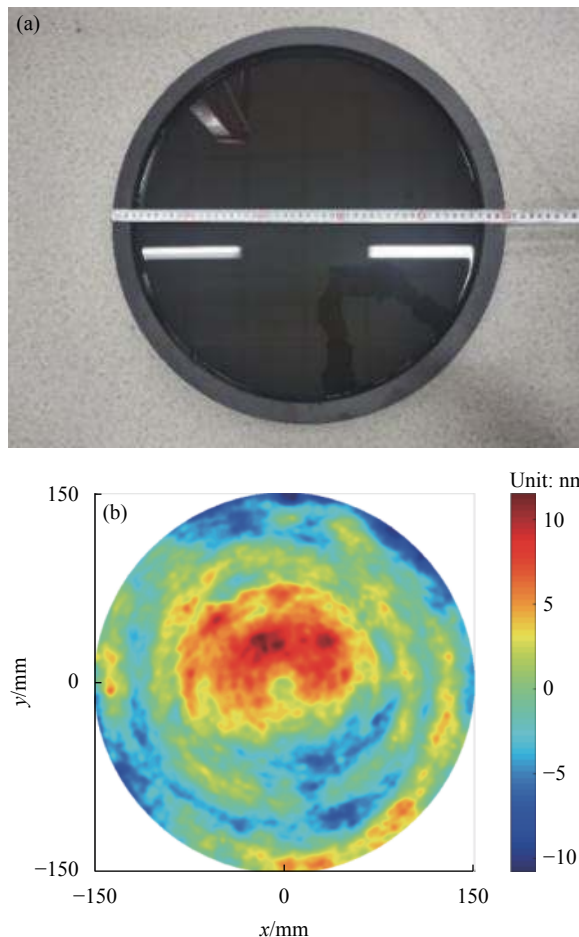


图 13 (a) $\Phi 450$ mm 液面照片; (b) $\Phi 450$ mm 液面测量系统误差

Fig.13 (a) $\Phi 450$ mm liquid reference plane; (b) System error measured by $\Phi 450$ mm liquid reference plane

3.2 系统误差测量重复性

使用 $\Phi 400$ mm 液面进行实验,其余条件均保持不变,调节干涉仪使条纹平直且根数合适,开始连续测量,每隔 1 min 进行一次测量,总共得到 50 组重复性数据,结果如图 14 所示。

从图 14 中可以看出,连续测量 50 次的结果稳定性良好,PV 值和 RMS 值比较稳定,其中 PV 值变化的幅度大于 RMS 值。PV 值在 30 nm 附近波动,均方根值 RMS 变化范围在 4 nm 左右。

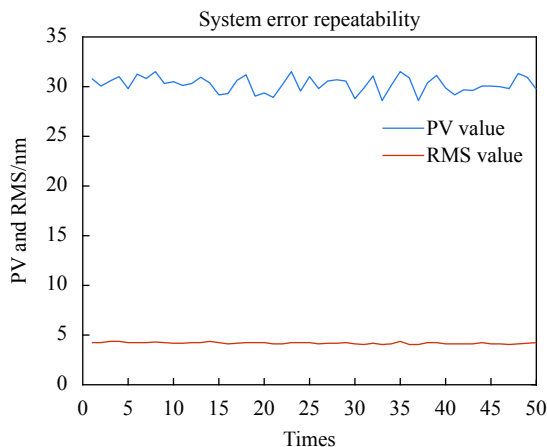


图 14 系统误差测量重复性

Fig.14 System error measurement repeatability

4 结果分析

将 $\Phi 400$ mm 液面与 $\Phi 450$ mm 液面得到系统误差结果相减, 残差 ΔW 如图 15 所示。残差波面的 PV 值为 $0.0094\lambda(5.9$ nm), RMS 值为 $0.0017\lambda(1.1$ nm)。两液面测量结果的残差波面 PV 值小于 6 nm, RMS 值仅仅 1.1 nm, 满足干涉仪的误差容限, 可以认为两种不同口径的液面的标定结果是相同的。说明两个不同口径的液面对同一个干涉仪进行标定之间的差别来自于环境干扰等时变因素, 而不是由液面本身的差别造成的。因此, 说明通过液面测量的干涉仪系统误差结果可靠。

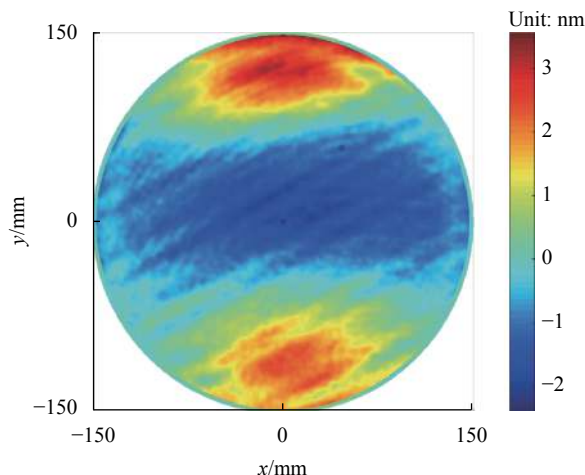


图 15 残差波面

Fig.15 Residual wavefront

5 结论

文中介绍了通过液面测量 $\Phi 300$ 立式斐索干涉仪系统误差的基本原理, 并对适合的液面基准条件进行实验探究, 主要涉及液面厚度和干涉腔长的影响。通过以往的经验 and 实验得到了适用于 $\Phi 300$ 立式斐索干涉仪的液面基准。使用 2 mm 厚度的硅油液面、在 500 mm 腔长的条件下可以用于干涉仪的系统误差的标定。在此条件下使用两种不同口径的液面对系统误差进行标定, 两个液面测量标定结果的残差波面 PV 值小于 6 nm, RMS 值仅仅 1.07 nm, 说明了两个液面对干涉仪的系统误差标定结果基本相同, 排除了偶然性的结果。说明使用液面对立式斐索干涉仪进行系统误差校正的方法的结果是可靠的。

与传统的三平板检验方法相比, 采用液面法对于干涉仪进行标定测量, 具有操作步骤简单, 测量成本低等优势, 更适合应用在大口径的立式干涉仪上。

在后续研究中可以继续优化改进该液面基准, 分析并扣除重力对液面形状的影响, 使液面基准法测量能够达到更高的精度和稳定性。

参考文献:

- [1] Zhao Weiqian, Li Wenyu, Zhao Qi, et al. Surface measurement by randomly phase shifting interferometry of measured element [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(9): 2167-2172. (in Chinese)
- [2] Ma Yun, Chen Lei, Chen Yiming, et al. Reflective shearing point diffraction interferometer for phase defect measurement [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2018, 26(12): 2873-2880. (in Chinese)
- [3] Yan Hao, Long Jun, Liu Chiyue, et al. Review of the development and application of deformation measurement based on digital holography and digital speckle interferometry [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(6): 0603010. (in Chinese)
- [4] Yu Yingjie, Chang Lin, Yan Ketao, et al. Information separation of multi-surface based on wavelength phase shifting interferometry [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(3): 0303014. (in Chinese)
- [5] Schulz G, Schwider J. Precise measurement of planeness [J]. *Applied Optics*, 1967, 6(6): 1077-1084.
- [6] Schulz G, Schwider J, Hiller C, et al. Establishing an optical

- flatness standard [J]. *Applied Optics*, 1971, 10(4): 929-934.
- [7] Ai C, Wyant J C. Absolute testing of flats decomposed to even and odd function[C]//Proceedings of SPIE, 1992, 1776: 72-83.
- [8] Evans C J, Kestner R N. Test optics error-removal [J]. *Applied Optics*, 1996, 35(7): 1015-1021.
- [9] Yuan Li, Zhang Xiaohui. Surface shape measurement of large flat mirrors using a scanning pentaprism method [J]. *Chinese Optics*, 2019, 12(4): 920-931. (in Chinese)
- [10] Yan Gongjing, Luo Wang, Zhang Binzhi. High-precision surface reconstruction technology for elliptical flat mirrors [J]. *Chinese Optics*, 2021, 14(1): 0106.
- [11] Rayleigh L. Interference bands and their-applications [J]. *Nature*, 1893, 48: 212-214.
- [12] Powell I, Goulet E. Absolute figure measurements with a liquid-flat reference [J]. *Applied Optics*, 1998, 37(13): 2579-2588.
- [13] Geckeler R D. Error minimization in high accuracy scanning deflectometry[C]// SPIE, 2006, 6293: 1-15.
- [14] Miao Erlong, Su Dongqi, Peng Shijun. High precise absolute flat calibration [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(5): 051203. (in Chinese)
- [15] Chatterjee S, Kumar Y P, Singh R, et al. Measurement of the surface form error of large aperture plane optical surfaces with a polarization phase-shifting liquid reference reflection Fizeau interferometer [J]. *Applied Optics*, 2016, 55(2): 310-316.
- [16] Quan Haiyang, Hou Xi, Wu Gaofeng, et al. Absolute interferometric testing of an ultra-precise flat substrate with a liquid mirror[C]//SPIE, 2019, 11032: 110320.
- [17] Chen Jia, Chen Lei, Wang Chong, et al. Research on the establishment of liquid reference based on dynamic interferometer [J]. *Optical Technique*, 2020, 46(6): 1-6. (in Chinese)