文章编号:1004-4213(2010)03-0485-5

液面基准法标定干涉仪系统误差*

武旭华[1],夏江涛[1],肖韶荣[1],陈磊[2]
(1 南京信息工程大学 电信学院,南京 210044)
(2 南京理工大学 电光学院,南京 210094)

摘　要:为消除干涉仪标准参考面的误差,保证其测量准确度,本文采用液面基准法建立光学平面基准对仪器的系统误差进行标定.首先建立弯曲静液面动力学方程从理论上分析润湿效应对液面平面度的影响,并结合实验分析气流、温度、震动等环境因素对液面稳定性的影响,讨论波面稳定性评价指标,给予实验验证.最后用建立的大液面基准对干涉仪系统误差进行标定,给出标定结果.

关键词:光学测试;液面基准法;干涉仪;标定
中图分类号:TH744.3　　**文献标识码**:A　　**doi**:10.3788/gzxb20103903.0485

0 引言

光干涉法始终是检验高准确度光学平面的有效手段,而参考平面是干涉仪中最关键的部件,担负着量值传递与保持的重任.为了避免标准参考面的误差,需要建立光学平面基准对仪器的系统误差进行标定,从而实现高准确度的平面面形测量.

光学平面基准的建立方法一般有两种:平面绝对检验(如三面互检法[1]和伪剪切法[2])和液面基准法[3].最早的三面互检法[4]是由 G. Schulz 和 J. Schwider 等人在 1967 年提出,后有以提高空间分辨率和减小插值误差为目的的文献[5-6]报道. Arizona 光学中心 Ai. 和 J. C. Wyant[7]等人也对平面绝对检验进行了深入研究,并提出"奇偶函数法".三面互检法的数学公式是理想情况下的,但作为平面检验基准存在一些不足[8],一般只适合于制造高准确度中等口径平面时使用. 1984 年 P. B. Keenan[2]提出了一种伪剪切干涉计量测试技术,国内也相继进行了一些探讨[9-10],与三面互检法相比,测量方程的数学表达式更为简洁,同时也可求出干涉仪的系统误差.但由于统一原始波面时误差*的积累问题,伪剪切法作为建立平面基准的方法一直未被广泛认可.综上考虑,本文决定采用液面基准法作为干涉仪系统误差的标定方案.液面平晶可作干涉测量平面基准的思想早在 1893 年就由 Lord Rayleigh[11]提出,理论上液体平面具有与地球表面相等的曲率半径,液体直径为 300 mm 时,平面度偏差仅 $\lambda/340$,因此液面被认为是检测平面的绝对标准.但液面基准制作极其困难,液面极易受干扰[12],对环境条件如温度、气流、振动等要求很高,此外润湿效应、蒸发、灰尘影响以及液体的自身不均匀性都会使液面曲率发生变化从而影响液体的平面度,所以这种方法一直难以在生产中实用化,只有美国亚利桑那大学光学中心曾有用数字波面干涉仪进行液面基准测试的简单报道.本文将结合实验重点分析液面基准建立过程中润湿效应[12]及温度、气流、振动等环境因素对液面的影响.

1 润湿效应

用液体表面作为基准参考反射面,在自然状态下,若不考虑容器的边缘效应,液体表面为理想水平面.可液体与盘壁接触时由于毛细血管作用所产生的润湿效应,在液盘周围的液面将发生局域弯曲,会严重影响液体表面的平面度,必须把靠近液槽四壁的液体分划在可用范围之外.因此液盘必须足够大,以保证液体的润湿效应不影响中间部分的平面度;而为了减小由地球吸引力引起的液体表面的曲度,还必须减小液面的覆盖面积,即减小液槽的大小.下面建立研究润湿效应的杨-拉普拉斯方程式,从理论上推导出润湿效应对液面的影响范围,从而确定合适的液槽尺寸,并从实验上给予验证.

1.1 杨-拉普拉斯方程

对于任意液体曲面上一小块任意形状的曲面,经推导可得

$$\Delta P=\delta(1/R_1+1/R_2) \tag{1}$$

式中 R_1,R_2 分别表示曲面在正交方向上的两个曲率半径(仅当曲面为球面时,两个曲率半径才相等),δ 为液体的表面张力,这是杨-拉普拉斯方程式[12]的

*南京信息工程大学校科研基金(S8108076001)和教育部科技发展中心博士点基金(20070288010)资助
Tel:025-58731196　　Email:wuxh1978@yahoo.com.cn
收稿日期:2009-05-01　　修回日期:2009-06-20

一般形式，适用于任意曲面上的附加压力与表面张力和相应的曲率半径的关系.

对于圆柱形面，设 $R_2=\infty$，则

$$\Delta P=\delta/R_1 \tag{2}$$

为便于讨论，建立如图 1 所示坐标系，对弯曲液

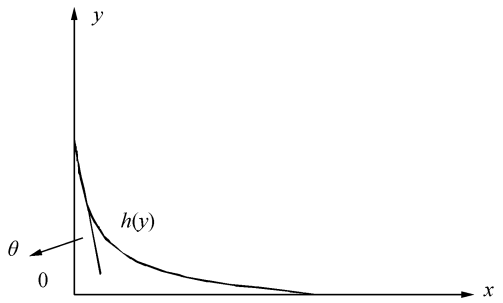

图 1 液面坐标系

Fig. 1 Coordinate system of liquid surface

面上任意一点(x,y)表面张力在内外液面上的附近压力 ΔP[12]为

$$\Delta P=\Delta\rho g y/\delta \tag{3}$$

式中，$\Delta\rho$ 表示表面上液气两相的密度差，g 为重力加速度，均为常量.

本文研究液槽与液体接触处的液面面形是为了确认液槽的大小对平面度的影响，因此主要考虑水平方向，点(x,y)在水平方向上的曲率可简单表示为

$$\frac{1}{R_1}=\frac{y''}{(1+y'^2)^{3/2}} \tag{4}$$

联立式(2)～(4)，得

$$\frac{\Delta\rho g y}{\delta}=\frac{y''}{(1+y'^2)^{3/2}} \tag{5}$$

式(4)是此次实验中杨—拉普拉斯方程式的具体形式.

解得(令 $y=0$)

$$h(0)=h(y)\Big|_{y=0}=\sqrt{\frac{\delta}{\rho g}} \tag{6}$$

所以液槽直径至少取

$$D=2\sqrt{\frac{\delta}{\rho g}}+d \tag{7}$$

d 为被测有效平面的直径；ρ 为液体的密度；δ 为液体表面张力；D 为液槽直径.

本文选用甲基硅油，$\delta=21.15\ \mathrm{mN\times m^{-1}}$，$\rho=0.970\ \mathrm{g/cm^3}$，求得 $D=9.34+d$，所以理论上选用 310 mm 的液盘就可以忽略浸润效应对 300 mm 的液面平面度带来的影响.

1.2 实验验证

选用 100 mm 的小液盘在立式移相干涉仪上进行液面的浸润效应的实验研究. 如图 2 所示的干涉图，条纹的边缘有明显的由于浸润效应引起的弯曲. 全口径的波面和除去边缘 10 mm 后的波面如图 3 和图 4(PV＝0.367λ，RMS＝0.117λ)，可见已经消除浸润效应对液体平面度的影响.

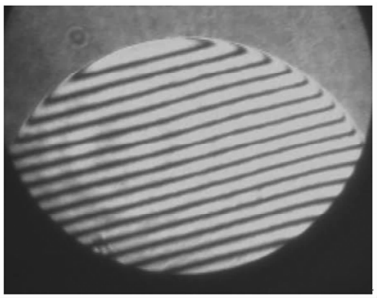

图 2 液面浸润效应条纹

Fig. 2 Wetting fringes of liquid surface

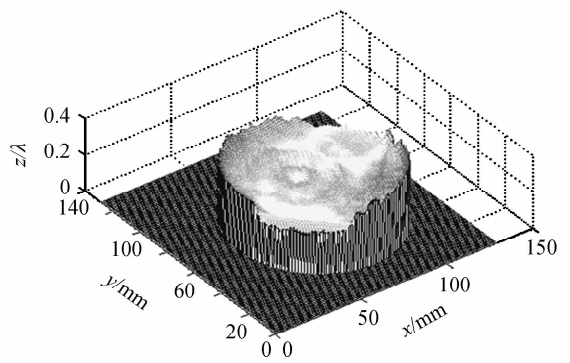

图 3 100 mm 的液盘波面

Fig. 3 Wavefront of a 100 mm flume

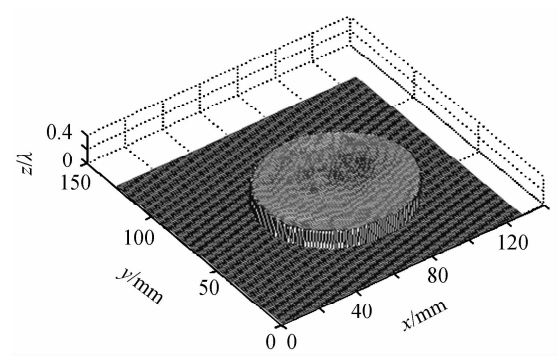

图 4 有效口径选 90%的液盘波面

Fig. 4 90% wavefront of full aperture

2 液面稳定性研究

使用液面测试时，液面的稳定是绝对必要的，液体的稳定直接影响着液面的平面度，主要考虑温度、气流、震动等环境因素对液面的影响.

气流若进入主光路甚至干涉腔内将造成干涉条纹漂移. 由于干涉仪一般置于密闭的室内，且一般有密闭的外罩对光路进行保护，气流的影响可以忽略. 当液面处于变化的热环境中，各种热效应对液面产生影响，使液面的面形将随温度的变化而变化. 因此需要一个长时间的恒温过程. 实验表明，为保持条纹在 1 h 内变化小于 1 个条纹，干涉仪周围的温度变化应小于 0.1 ℃. 当恒温时间达到要求时，测量结果

一般可以达到所需的准确度和重复性. 液面受震动的影响极为明显，必须采取必要的防震措施：将干涉仪和盛着液体的液槽放置在环境僻静的恒温实验室内的减震大理石实验平台上，在这种实验条件下，我们来测试震动等环境因素对液面稳定性的影响.

2.1　实验

将盛放液体的 400 mm 的液槽置于安放 300 口径斐索立式移相干涉仪的抗震平台上，调节干涉仪参考镜（参考镜和测试镜都用标准镜，条纹数目取决于参考镜和测试镜的倾斜角的大小）的倾斜角量，干涉图中的条纹数随之增加，即在干涉图采集前引入一个线性空间载频，这样采集到的每幅干涉图是一幅静态干涉图. 将液面和干涉仪充分恒温静置 48 h 后让液面处于静止状态拍下参考平面，然后晃动实验平台，液体会在液槽内形成液体旋涡，设置好采样时间间隔，采用干涉仪专用抓图软件快速记录下一组液体表面从静止到转动相对稳定的干涉图的动态过程. 一共拍摄 350 s，共获得 900 帧动态图像，图 5(a)为其中的一帧.

以图 5(a)为例，根据干涉图分析的莫尔技术[13]对其进行处理. 图 5(b)为计算机生成的参考干涉图，通过编制的程序生成所需要的四幅位相相差 π/2 的参考干涉图，与待测干涉图相乘叠加后就可获得四幅移相莫尔条纹图（图 5(c)为其中一幅），再经过空域低通滤波，就获得了四幅相位值相差为 π/2 的莫尔条纹图（图 5(d)为其中一幅），用 4 步移相法即可得到该液面的包裹相位面（图 6），再用解包算法处理就可得到其相位波面（图 7）. 根据一定的时间间隔选取所记录的干涉图，依次用干涉图分析的莫尔技术进行处理，可以得到一系列液体从静止到旋转相对稳定的动态过程的液面数据及其 PV 值和 RMS 值，分别如表 1 中 A 和 B. 由分析可知，波面 RMS 的变化幅度基本上随着测试时间距的增大在减小，而 PV 值这个波面评价指标只由波面中的最大值和最小值确定，并不是对整个波面数据都进行运算，所以评价时难免会出现一些偏差. 尤其当液面临近稳定状态时，液面变化很小，只靠观察干涉图或计算干涉图的PV值、RMS值是不容易发现

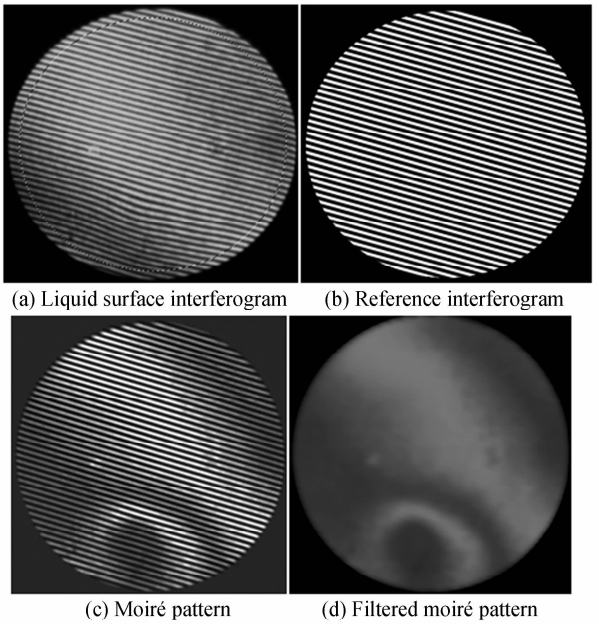

图 5　液面条纹图的处理过程

Fig. 5　The process of liquid surface interferogram

图 6　包裹相位面

Fig. 6　The wring plane

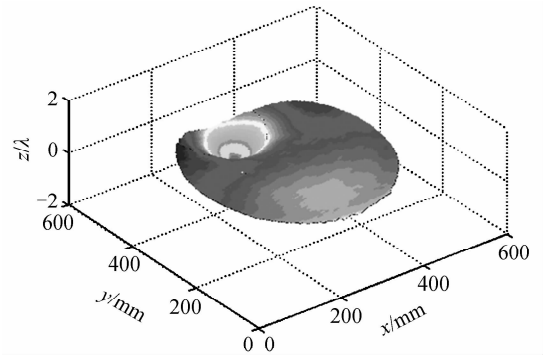

图 7　解包波面

Fig. 7　The retrieved surface

表 1　各时刻波面具体分析数据

Table 1　Analysis data of liquid surface wavefront at different times

Time/s	0	0.1	0.5	1	5	10	20	40	80	160	300	reference
A/λ	8.503	7.729	5.183	2.891	2.539	2.603	1.693	1.732	1.699	1.598	1.558	1.536
B/λ	0.310	0.289	0.271	0.255	0.246	0.227	0.202	0.202	0.202	0.201	0.190	0.183
C	0.724	0.619	0.571	0.531	0.621	0.764	0.117	0.068	0.051	0.522	0.438	—
D	0.855	0.861	0.870	0.892	0.860	0.851	0.998 0	0.999 5	0.999 8	0.986 0	0.993 8	—

的，而且仅由此来评价液面的稳定性也是不够充分的，为了能更全面的评价波面，下面进一步讨论液面稳定性的评价指标.

2.2 评价指标

1)波面直方图

波面直方图是一个一维离散函数，其函数表达式为

$$p(s_k)=n_k \quad (k=1,\cdots,L-1) \tag{7}$$

在计算时将波面数据的值按大小分成若干区间，s_k 表示每个区间的中点值，n_k 表示每个区间内包含的波面数据个数，L 表示区间个数.

波面直方图反应了波面的分布情况，可以很直观地看到波面在各个不同区间范围内的分布情况. 图 8 是图 9 的波面图的波面直方图，由波面直方图可知，该液面数据值大致分布在 -0.2λ 到 0.4λ 之间，只有极少数据分布在高于 0.4λ 和低于 -0.8λ 的范围内.

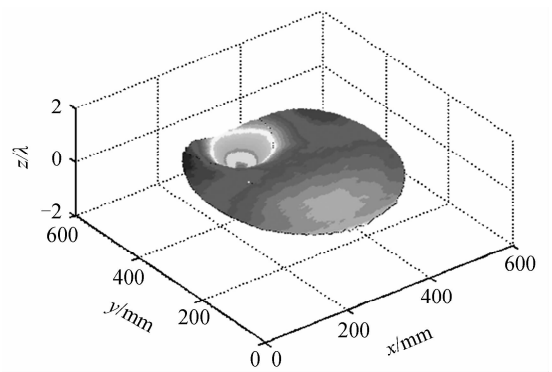

图 8 液面波面

Fig. 8 Wavefront of liquid surface

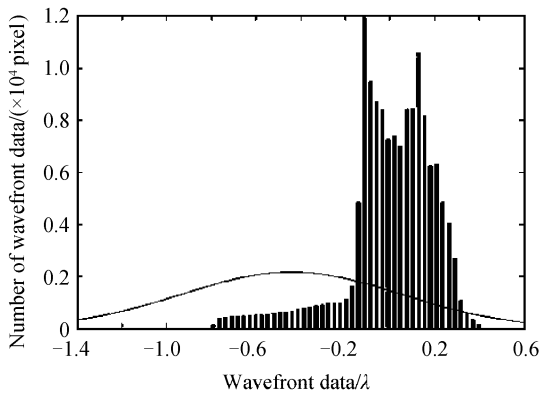

图 9 液面直方图

Fig. 9 Wavefront histogram

2)熵

熵是一个信息的概念. 波面熵的概念为

$$\text{Entropy}=\sum_{i=1}^{N}p(i)\ln(p(i)) \tag{8}$$

式中 $p(i)$表示波面直方图中第 i 个区间对应数据点个数与总有效数据点个数的比值. 波面熵可用于对两个波面相似性的评价，不同的波面熵值可能相同，但是相同的波面熵值一定相同，熵值不同的两个波面一定不同. 波面熵的变化幅度如表 1 中 C 所示，在采样的前 80 s 里基本随着测试时间的增长均在减小，表明液面整体渐趋于稳定，80s 后的数据渐有跳变，可能是由于液面漩涡的局部波面值突变造成的.

3)波面相关系数

波面相关系数的定义表达式为

$$r=\frac{\sum_m\sum_n(A_{mn}-\overline{A})(B_{mn}-\overline{B})}{\sqrt{(\sum_m\sum_n(A_{mn}-\overline{A})^2)(\sum_m\sum_n(B_{mn}-\overline{B})^2)}} \tag{9}$$

式中 A_{mn}、B_{mn} 分别是两个波面的数据，$\overline{A}$、$\overline{B}$ 为波面数据的均值.

通过对两个波面进行相关运算，求出其相关系数. 波面相关系数是对两个波面数据进行点对点运算得到的，可以用于对两个波面的相似性进行评价. 表 1 中 D 表示波面相关系数，不难看出随时间的增长，变化波面相关系数值越来越大，越来越趋近于 1. 这说明波面中相邻波面越来越相似，即波面变化越来越小，证明液面越来越趋于稳定.

从表 1 中可以明确看到震动在不同时刻对测试结果的影响：波面 RMS 的变化幅度、相关度变化幅度、熵的变化幅度的变化趋势是一样的，基本上随着测试时间距的增大均在减小. 经过几组重复实验可知，如果环境中存在轻微的震动、空气扰动或气流等干扰，将液面静置 0.5 min 完全可以恢复；对一些人为的试验平台的小晃动，需将液面静止大约 1 min 左右才可以恢复稳定；而对一些人为的试验平台的大晃动，则需将液面静止大约 5～10 min 左右才可以恢复稳定. 液面与干涉仪参考平面的相对倾斜是靠调整整个干涉系统的水平状态来实现的，之后液面将通过流动来达到与地面平行，实验表明，将液面静置 20 min 即可恢复从而进行测试. 采用了两级隔震系统及对内部震源采取措施后，仪器在周围无强震动源的情况下，任何时候均可以对液面进行正常的观察和测试. 而对干涉仪进行干涉系统得标定，一般应选择在凌晨 0～3 点震动最小时进行.

3 仪器的标定

利用前面所建立的液面基准对该干涉仪进行标定。当系统无误差时，测试将获得一个准确的平面. 如果有固定的系统误差如标准参考平面的面形误差，测试结果将反映这种误差，此误差在换上被测件测试时作为一个修正量从测试结果中自动扣除，以达到减小测试不确定度的目的.

被检仪器：φ300 mm 斐索立式移相干涉仪；

温度条件：恒温室起始温度 23 ℃；恒温时间须大于 24 h，恒温温度 20±0.5℃；仪器内部温度变化 <0.1℃/h；

测试结果：0.086λ < λ/12（PV）；随机误差：0.009λ）.

4 结论

本文讨论了大口径光学平面基准的建立方法并分析了其优缺点；采用液面基准法，建立了弯曲静液面动力学方程从理论上推导出润湿效应对液面平面度的影响，并从实验上给予验证；分析了气流、温度、震动等外界因素对液面稳定性的影响，依据波面稳定性评价指标进行了液面稳定性测试实验. 最后用所建立的大液面基准对大口径干涉仪的系统误差进行校正标定，从而保证了其面形测量精度. 需要注意的是：为消除随机误差的影响，需要进行大量的测试来获取系统的修正量.

参考文献

[1] FRITZ S. Absolute calibration of an optical flat[J]. *Opt Eng*, 1984, **23**(4): 379-383.

[2] KEENAN P B. Pseudo-shear interferometry[C]. *SPIE*, 1984, **123**(4): 2-9.

[3] LOAD R. Interference bands and their application[J]. *Nature*, 1893, **48**: 212-214.

[4] SCHULZ G, SCHWIDER J. Precise measurement of planness [J]. *Applied Optics*, 1967, **6**(6): 1077-1084.

[5] FRITZ B S. Absolute calibration of an optical flat[J]. *Optical Engineering*, 1984, **23**(4): 379-383.

[6] XU Chen, CHEN Lei. Absolute flatness measurement of optical surface[J]. *Optical Technique*, 2006, **32**(5): 775-778.
徐晨，陈磊. 光学平面绝对检验的研究与实验[J]. 光学技术，2006，**32**(5)：775-778.

[7] AI C, WYANT J C. Method and apparatus for absolute measurement of entire surfaces of flats[P]. U S Patent: 5502566[P]. 1996.

[8] WU Xu-hua, CHEN Lei, WANG Lei. *et al*. Design and test of reference mirror in 300 mm interferometer[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2007, **15**(8): 1235-1240.
武旭华，陈磊，王磊，等. φ300mm 干涉仪参考镜的设计与测试[J]. 光学精密工程，2007，**15**(8)：1235-1240.

[9] ZHAO Hua-wei, WANG Jun. A new method of absolute flatness measurement of optical surface errors[J]. *Applied Optics*, 1991, **12**(2): 53-55.
赵华伟，王军. 一种用于光学平面面形误差绝对测量的新方法[J]. 应用光学，1991，**12**(2)：53-55.

[10] ZHU Yu-cong, YANG Guo-guang, DONG Tai-he, *et al*. Absolute measurement and foundation of standard optical surface[J]. *Acta Metrologica Sinica*, 1989, **10**(4): 285-289.
朱郁葱，杨国光，董太和，等. 标准光学面形的建立与绝对检验[J]. 计量学报，1989，**10**(4)：285-289.

[11] RAYLEJGH L. Interference bands and their applications[J]. *Nature*, 1893, **48**: 212-214.

[12] TAN Mu-hua, HUANG Yun-yuan. Physical chemistry of surface[M]. Beijing: China Building Industry Press, 1995: 7-12.
谈慕华，黄蕴元. 表面物理化学[M]. 北京：中国建筑工业出版社，1995：7-12.

[13] WU Xu-hua, CHEN Lei, SUN Jiao－fen, *et al*. Application of virtual grating phase－shifting Moiréfringe method to angle departure evaluation of optical components[J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2006, **27**(3): 221－223.
武旭华，陈磊，孙娇芬，等. 用虚光栅移相莫尔条纹法测量光学元件的角度偏差[J]. 计量学报，2006，**27**(3)：221－223..

Calibration of System Error for Interferometer Through Absolute Liquid Reference Method

WU Xu-hua[1], XIA Jiang-tao[1], XIAO Shao-rong[1], CHEN Lei[2]

(1 *College of Electronic and Information Engineering, Nanjing University of information Science & Technology, Nanjing* 210044, *China*)

(2 *College of Electronic Engineering & Optoelectric Technology, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing* 210094, *China*)

Abstract: Through absolute liquid reference method, the bend static liquid surface dynamics equation is built for calibrating the system error of interferometer, and theoretical simulation and experimental measurement are carried out for wetting effect on liquid surface. The stability of liquid surface effected by the environment factors such as air current, temperature, vibration, is analyzed, the experiment is taken, and estimate indexes are given. The absolute liquid reference with high-accuracy is set for calibrating interferometer system error under laboratory environment, the results are given, and the measurement accuracy is ensured.

Key words: Optical testing; Absolute liquid reference method; Interferometer; Calibration

WU Xu-hua was born in 1977. She received the Ph. D. degree in optical engineering from Nanjing University of Science and Technology, in 2007. Now she is teaching at Nanjing University of information Science & Technology, and her current research interests focus on optical designing and optical testing.