

# 高精度、大口径平面波像差标准 ——移相式数字平面干涉仪

陈进榜 宋德真 朱日宏 王青 陈磊

(南京理工大学电光学院, 南京 210094)

陈道炯

(安徽工学院 合肥 230069)

**摘 要** 介绍研制成的一台移相式数字平面干涉仪, 其孔径为  $\phi 245$  mm, 用液面作基准标定并消除仪器的系统误差, 准确度优于  $\lambda/50$  (峰谷值,  $\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$ )。利用计算机辅助干涉术, 被测件口径可扩展到  $\phi 500$  mm。该仪器将用于建立高精度、大口径平面波像差标准。文中阐述了光学干涉仪、移相器及精度校核等问题。

**关键词** 干涉仪, 移相术, 光学平面, 标准, 精度校核。

## 1 引 言

自从 Bruning 等人提出数字波面测量干涉仪<sup>[1]</sup>以来, 移相干涉术已有很大发展。通过压电陶瓷堆调制干涉仪参考光束的位相、CCD 摄像机记录干涉图像光强变化, 即可利用计算机算出波面的位相, 实现对波面形状的直接测量。至今, 许多有关移相干涉术算法的技术<sup>[3~7]</sup>已有报道, 成为实现高精度相位测量的重要方法之一。现在, 用于测量光学面形和透镜像质的移相式干涉仪已经形成产品, 例如: 美国 ZYGO 公司的  $\phi 100$  mm MARK 型干涉仪, 我国浙江大学研制了  $\phi 80$  mm 移相干涉原理的泰曼偏振型干涉仪<sup>[8, 9]</sup>, 南京理工大学也研制并生产  $\phi 80$  mm 和  $\phi 150$  mm 移相式数字泰曼-格林干涉仪。但其有效孔径通常在  $\phi 100$  mm 以下, 其测试孔径的增大, 是通过光学扩束系统实现的。为了建立高精度、大口径平面波像差标准, 研制了移相式数字平面干涉仪, 它以液面为基准, 对仪器的系统误差作绝对平面校准。

## 2 系统框图及光学干涉仪

该干涉仪有效孔径为  $\phi 245$  mm, 仪器的准确度优于  $\lambda/50$  (峰谷值)。运用计算机辅助干涉术和提出了子孔径重叠干涉检验组合全口径波面的方法, 研制了数字扩束系统<sup>[2]</sup>, 使测量孔径进一步扩展到  $\phi 500$  mm。为了消除压电陶瓷堆非线性的影响提出了二维傅里叶变换算法

\* 国防科工委专项科研基金资助课题。

收稿日期: 1993年11月16日; 收到修改稿日期: 1994年2月6日

来分析压电陶瓷堆驱动的位移量<sup>[9]</sup>。此法可精确测量到  $0.01 \mu\text{m}$  的位移量, 以准确确定压电陶瓷堆的非线性曲线, 由此研制了压电陶瓷堆控制器和驱动源来补偿其非线性以使压电陶瓷堆作线性移动。同时, 作者提出了重叠四步平均法从算法的角度来消除压电陶瓷堆移相误差造成的影响。该干涉仪已通过鉴定并处于使用状态。

仪器的光路图如图 1。图中 A-direction 是指顶视方向, 实线部分表示仪器处于测量状态、虚线部分表示仪器处于初调状态。He-Ne 激光光源经过反射镜 2、3、4 将激光束引入仪器顶部, 由会聚透镜 5 聚焦在空间滤波器 6 上。空间滤波器上的针孔位于准直物镜 10 的焦点位置, 用以消除激光散斑的影响。光线经过反射镜 8 和分束镜 9 射向双分离的准直物镜 10, 形成平行光。标准平板玻璃 11 的下表面为参考平面, 13 为被测平板玻璃或放置液面 14 (作为基准平面来校验仪器的系统误差)。干涉条纹是由 11 的下表面(参考面)和 13 的上表面(被测面)或液面相干涉形成的。仪器调整时, 由参考面、被测面或液面反射的光线由分束镜 9 折向活动反射镜 15 再折向透镜 16, 经场镜 17 成像在带十字的分划板 18 上。然后由反射镜 19 将光线折向水平方向, 经透镜 20 准直后通过反射镜 21 和折光镜 22 进入 CCD 摄像机 23 接收。此时由监视器 24 即可看到两束相干光各自的像点。调整参考面或被测面使两个光点位于分划板 18 的十字线中心并重合, 即完成了调整过程。

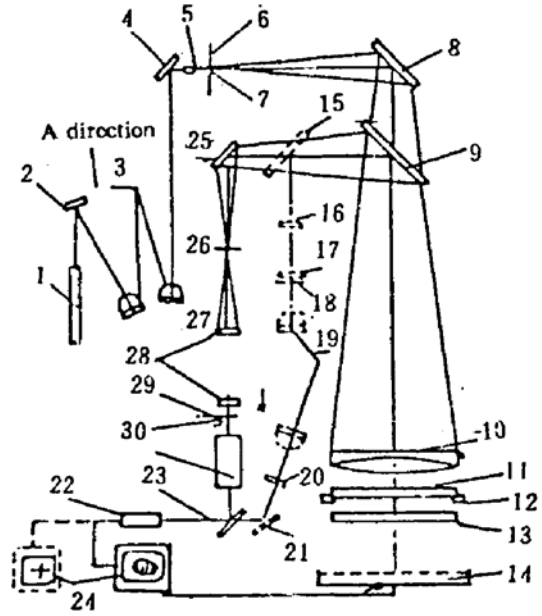


Fig. 1 Light path diagram of the optical interferometer

测量时, 活动反射镜 15 退出光路, 光束由反射镜 25 折向空间滤波器 26 以消除杂光。透镜 27 的作用是将干涉场的孔径成像在毛玻璃 29 上, 反射棱镜 28 将光线转向水平方向。毛玻璃由电机 30 带动旋转, 使其微粒子图像不会成像在监视器 24 上, 保证视场清晰不变形。变焦透镜 31 是为了适应小孔径被测件的需要, 保证被测件口径即使只有  $\Phi 60 \text{ mm}$  也可充满视场。微调参考面或被测面, 即可在监视器上见到干涉条纹。

由参考面、被测面(或液面)相干涉形成的干涉场中任意点  $(x, y)$  光强分布为

$$I(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \cos [\Phi(x, y) + \Psi_i]$$

式中  $\Phi(x, y)$  为被测面(或液面)相位分布, 也可转化为波面光程差  $W(x, y) = \Phi(x, y)\lambda/2\pi$ ;  $a(x, y)$  为干涉场背景光强;  $b(x, y)$  为干涉条纹的调制度;  $\Psi_i$  为标准平板(参考面)的相位移, 是借助于三个压电陶瓷堆 12 驱动标准平板而实现的。当压电陶瓷堆推动标准平板作匀速平移时, 在  $\Psi_i$  匀速变化的一定范围内, CCD 摄像机接收到干涉场中某点  $(x, y)$  处光强信号, 实际上代表该点光强的积分平均值, 即有

$$I_i(x, y, \Psi_i) = \frac{1}{\Delta} \int_{\Psi_i - \Delta/2}^{\Psi_i + \Delta/2} I(x, y, \Psi_i) d\Psi \quad (2)$$

式中  $1/\Delta$  为归一化因子,  $\Psi_i$  为积分区域中心处的相位移量, (2)式代入(1)式积分得

$$I_i(x, y, \Psi_i) = a(x, y) + b(x, y) \sin(\Delta/2) \cos [\Phi(x, y) + \Psi_i] \quad (3)$$

为从光强  $I$  值复原波面相位, 在研究了移相干涉术各种算法的基础上, 作者曾提出重叠四步平均法<sup>[8]</sup>。以能更好地消除随机噪声、压电陶瓷堆的非线性误差以及标定误差所带来的相位复原误差。其表达式为

$$\bar{\phi} = \frac{1}{2M} \sum_{k=1}^{2M} \phi_k = \frac{1}{2M} \sum_{k=1}^{2M} \tan^{-1} \left( \frac{I_{k+3} - I_{k+1}}{I_{k+4} - I_{k+2}} \right) \quad (4)$$

对于干涉场光强  $I(x, y)$ , 在网格点  $(x, y)$  集合  $S$  上, 作  $2M + 3$  帧采样 ( $2M$  是指四步法相位计算次数  $k$  的总次数为偶数), 采样间隔为  $\pi/2$ 。即在压电陶瓷堆驱动参考反射镜作相位步进  $\pi/2$  时, 作一帧干涉图光强采样, 利用“四步法”由光强复原波面相位  $\phi_k$ , 即每四帧干涉图光强 ( $I_k, I_{k+1}, I_{k+2}, I_{k+3}$ ) 作为一个相位计算周期, 得到第  $k$  次相位计算值  $\phi_k$ ; 下一个相位计算周期是递进一帧干涉图光强值, 即后一个计算周期的第一帧干涉图光强值, 是前一个计算周期的第二帧干涉图光强值, 这也就是“重叠”的含义;  $k$  值由 1 顺序递进到  $2M$  得到  $2M$  个  $\phi_k$  值 ( $k = 1, 2, \dots, 2M$ )。对于  $2M$  个  $\phi_k$  值, 取平均值就得到相位值  $\phi$  平均值。乘以系数  $\lambda/2\pi$  ( $\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$ ) 就可得到平面或波面的光程差值  $W(x, y)$ 。

### 3 移相器及微机控制

移相器是由压电陶瓷堆、压电陶瓷堆控制器和压电陶瓷堆驱动源组成(图 2)。压电陶瓷堆是利用压电晶体逆向压电效应的机理, 采用电路并联、机械串联的形式, 构成叠式压电陶瓷堆。仪器中放置三个压电陶瓷堆用以支承和驱动标准平板作轴向位移。移动范围为  $0 \sim 5 \mu\text{m}$ , 分辨率为  $0.01 \mu\text{m}$ , 经过补偿校正后非线性  $< 0.1\%$ 。

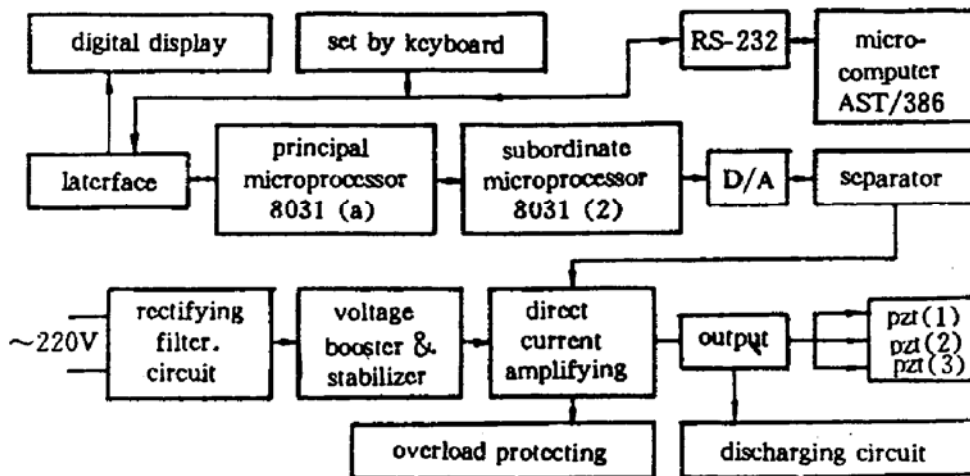


Fig. 2 Circuit diagram of controlling system and driver of the phase shifter

控制器实质上是智能化的函数信号发生器。由两片 8031 芯片组成主从结构, 巧妙地解决了函数信号发送与实时控制的矛盾, 并实现了控制信号与微机实时通讯。控制器能在键盘监控或微机串行通讯监控下产生  $Y = \sin(\omega t)$ 、 $Y = A + Bt$  和非线性控制电压  $Y = Y = \beta(A + Bt \pm Ct^2)$  的周期性信号, 其中各系数可由用户设定。控制电压输出范围为  $0 \sim 10 \text{ V}$ , 控制信号输出频率范围为  $0.01 \sim 5 \text{ Hz}$  (二次曲线) 和  $0.06 \sim 50 \text{ Hz}$  (正弦曲线与锯齿曲线)。设置的非线性控制电压专用于补偿、校正压电陶瓷堆的非线性, 使实际位移的非线性  $< 0.1\%$ 。采用高精度数模转换和放大集成块, 使控制信号输出幅值相对误差  $< 0.2\%$ 。

驱动源是一种无级调压高压源, 能连续地自动跟踪控制信号。响应速度快, 信号失真度小。信号幅值为  $0 \sim 10 \text{ V}$ , 输出电压为  $0 \sim 350 \text{ V}$ 。在电路中采用过载保护电路, 增强了电路

的可靠性。设计了卸压放电回路,使压电陶瓷堆能迅速复位,加快了反应速度。

微机(AST/386)是系统的控制中心。它保证干涉图像采样与压电陶瓷堆的位移同步,并对压电陶瓷堆的运动模式和采样的步进数做出选择。CPU直接控制图像采集系统(图像卡)进行图像采样,同时通过异步通讯口(RS-232)来控制压电陶瓷堆控制器的芯片8031(1)。控制器按照微机设置的参数要求来控制芯片8031(2)发出电压信号,并使之与采样同步。

干涉图由低噪声、高分辨率的CCD摄像机接收,输出标准视频模拟信号。信号由图像采集卡接收并转换为数字信号,采用 $32 \times 32$ 、 $64 \times 64$ 、 $128 \times 128$ 三种方式采集数据并存储。同时把帧存体中的数字信号转换为模拟信号,并传输到监视器,以便操作者能实时监控数据采集过程。计算机也可直接从帧存体中读出采样点的光强值进行计算,提高了数据传输速度。

## 4 仪器的修正值、精密度、准确度<sup>[10~12]</sup>

### 4.1 仪器系统误差及修正值

在用液面(水银面或液体石蜡)作为平面的绝对基准时,从理论上讲各网格采样点 $(x, y)$ 所求得光程差值应为零。但由于干涉仪本身的光学质量为 $\lambda/20$ ,及其它偶然误差的影响,而不可能为零。另外还要考虑到地球球面曲率的影响,即液面是一个略有微凸的弧矢面,其弧矢高表达式为

$$G(x, y) = \frac{(x^2 + y^2)}{2R} \quad (5)$$

$R$ 为地球的半径。用液面作基准,作 $Q$ 组测量,每组 $N$ 次,每次采样 $2M + 3$ 帧干涉图。按(4)式求取网格点上的相位 $\phi_i(x, y)$ 或光程差值 $W_i(x, y)$ ,一组波差函数 $W_j(x, y)$ 为

$$W_j(x, y) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N W_i(x, y), \quad i = 1, \dots, N \quad j = 1, \dots, Q \quad (6)$$

式中 $W_i(x, y)$ 是第 $i$ 次测量在采样网络点 $(x, y)$ 上的算术平均值,采样网络点 $(x, y)$ 的集合用 $S$ 表示。对于 $Q$ 组重复测量的平均值为 $\bar{W}(x, y)$

$$\bar{W}(x, y) = \frac{1}{Q} \sum_{j=1}^Q W_j(x, y) \quad (7)$$

说明 $\bar{W}(x, y)$ 是由 $2M + 3$ 幅干涉图按(4)式重叠四步平均法得 $N \times Q$ 个 $W_i(x, y)$ 的算术平均值,它已基本消除偶然误差的影响,(7)式减去(5)式,就可以得到仪器的系统误差 $W_0(x, y)$

$$W_0(x, y) = \bar{W}(x, y) - G(x, y) \quad (8)$$

修正值的大小等于已定系统误差,但符号相反。为减少或消除系统误差,应将修正值加入到那些未修正过的测量结果上,故将修正值存入计算机内,在对被测试件测量时,与测量结果作减法运算。

### 4.2 仪器的精密度

用液面作为测量对象时,进行 $Q$ 组测量。当用计算机加上修正值时,波面残差 $\Delta W_i(x, y)$ 虽有很大减小但仍不为零,各组 $\Delta W_j(x, y)$ 有一随机散布,其随机误差 $\Delta W_j(x, y)$ 为

$$\Delta W_j(x, y) = W_j(x, y) - W_0(x, y) \quad j = 1, \dots, Q \quad (9)$$

波面残差两个指标,1)所有采样点的 $(x, y)$ 集合 $s$ 上峰谷值(PV) <sub>$j$</sub> ,2)是均方根值(RMS) <sub>$j$</sub> ,

$$(PV)_j = [\Delta W_j(x, y)]_{\max} - [\Delta W_j(x, y)]_{\min} \quad (10)$$

$$(RMS)_j = \left( \frac{1}{s-1} \sum_{i=1}^s (\Delta W_j(x, y) - \Delta \bar{W}_j(x, y))^2 \right)^{1/2} \quad (11)$$

式中  $(\Delta W_j(x, y))_{\max}$ ,  $(\Delta W_j(x, y))_{\min}$  是指网格采样点  $(x, y)$  集合  $S$  上  $\Delta W_j(x, y)$  的极大值和极小值。 $\Delta \bar{W}_j(x, y)$  则是各点在集合  $S$  上的平均。 $Q$  组  $\Delta W_j(x, y)$  是随机散布的, 仪器的精密度是表示被测值进行多次测量时所得结果之间的符合程度, 它可用  $(PV)_{rms}$  和  $(RMS)_{rms}$  表示

$$(PV)_{rms} = \left( \frac{1}{Q-1} \sum_{j=1}^Q [ (PV)_j - (\overline{PV}) ]^2 \right)^{\frac{1}{2}} \tag{12}$$

$$(RMS)_{rms} = \left( \frac{1}{Q-1} \sum_{j=1}^Q [ (RMS)_j - (\overline{RMS}) ]^2 \right)^{\frac{1}{2}} \tag{13}$$

$$(\overline{PV}) = \frac{1}{Q} \sum_{j=1}^Q (PV)_j, \quad (\overline{RMS}) = \frac{1}{Q} \sum_{j=1}^Q (RMS)_j, \tag{14}$$

### 4.3 仪器的准确度

仪器的准确度表示测量结果中系统误差和随机误差的综合, 即测量结果与被测量真值之间的一致程度

$$PV = (\overline{PV})_j \pm t_p(Q)(PV)_{rms} \tag{15}$$

$$RMS = (\overline{RMS})_j \pm t_p(Q)(RMS)_{rms} \tag{16}$$

$t_p(Q)$  随置信概率  $P$  和测量次数  $Q$  而定, 当  $Q = 40$  和  $P > 0.95$  时,  $t = 2.02$ ; 当  $Q = 40$  和  $P > 0.99$  时,  $t = 2.71$ 。

## 5 测试结果

测试以液面为基准, 作 40 ( $Q = 40$ ) 组, 每组 10 ( $N = 10$ ) 次, 每次 11 ( $2M + 3 = 11, M = 4$ ) 帧干涉图测量, 总共是 4400 帧数字化干涉图像, 每幅按照  $64 \times 64$  网络点采样, 据(4)、(7)、(8)式经过计算处理得到系统误差  $W_0(x, y)$ 。 $W_0(x, y)$  用下述两式求得, 表征仪器光学质量  $PV$  值和  $RMS$ 。

$$[W_0(x, y)]_{PV} = [W_0(x, y)]_{\max} - [W_0(x, y)]_{\min} = 0.047\lambda (< \lambda/20) \tag{17}$$

$$(W_0(x, y))_{RMS} = \left\{ (s-1)^{-1} \sum_{s=1}^s [(W_0(x, y) - \Delta \bar{W}_0(x, y))]^2 \right\}^{\frac{1}{2}} = 0.009\lambda (< \lambda/100) \tag{18}$$

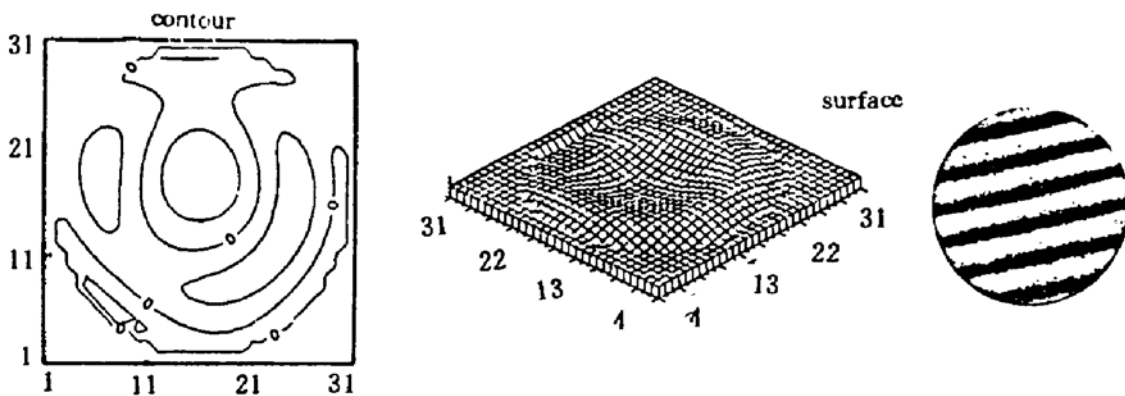


Fig. 3 Measured result: interferogram, two-and three-dimension wavefront

图 3 为典型干涉图和  $W_0(x, y)$  的三维立体图和二维等值图。所以仪器的光学质量优于  $\lambda/20$  (峰谷值)。将  $W_0(x, y)$  的负值作为修正值存入计算机, 按(10)、(11)式可求得 40 组的  $(PV)_j$  和  $(RMS)_j$ , 其的散布在  $0.0164\lambda (\lambda/61)$  和  $0.0051\lambda (\lambda/196)$  之间。而  $(\overline{PV}) = 0.009\lambda$ ,  $(\overline{RMS}) = 0.002\lambda$ 。按公式(12)和(13)可得用  $PV$  或  $RMS$  表征仪器的精密度, 分别为  $((PV)_{rms} = 0.00339\lambda (\lambda/295)$ ;  $(RMS)_{rms} = 0.0008\lambda (\lambda/1250)$ 。

按公式(15)和(16), 在  $Q = 40$  情况下: 若置信概率取  $P = 95\%$ , 则  $t = 2.02$ , 仪器的准

确度为  $PV = 0.0159\lambda(\lambda/62)$ ; 若置信概率取  $P = 99\%$  时, 则  $t = 2.71$ , 此时仪器的准确度为  $PV = 0.0189\lambda(\lambda/55)$ 。故仪器的准确度优于  $\lambda/50$  的峰谷值 ( $PV$ )。

### 参 考 文 献

- [1] J. H. Bruning, *et al.*, Digital wavefront measuring interferometer for testing optical surface and lenses. *Appl. Opt.*, 1974, **13**(11): 2693~2703
- [2] Qing Wang, Jinbang Chen *et al.*, A new technique for testing large optical flat. *Proc. SPIE*, 1994, 2003
- [3] J. Schwider, Phase shifting interferometry; reference phase error reduction. *Appl. Opt.*, 1989, **28**(18): 3889
- [4] J. Schwider, R. Burow, K. E. Elssner *et al.*, Digital wavefront measuring interferometry; some systematic error sources. *Appl. Opt.*, 1983, **22**(21): 3421
- [5] C. Ai, J. C. Wyant, Effect of piezoelectric transducer nonlinearity on phase shift interferometry. *Appl. Opt.*, 1987, **26**(6): 1112~1116
- [6] K. Creath, Comparison of phase-measurement algorithms. *Proc. SPIE*, 1986, **680**: 19~28
- [7] 朱日宏, 陈进榜等, 移相干涉术的一种新算法: 重叠四步平均法. *光学学报*, 1994, **14**(12): 1288~1293
- [8] Jinbang Chen, Rihong Zhu, Liangdu Liu *et al.*, Two dimension Fourier transform algorithm analyzing the interferogram and the fringe shift. *Proc. SPIE*, 1991, **1553**: 616~625
- [9] 董大年, 杨国光, 曹天宁等, 用于光学表面检测的数字波面干涉仪. *仪器仪表学报*, 1987, **8**(3): 8
- [10] 国家技术监督局, 测量误差用数据处理. JJG1027-91
- [11] 国家技术监督局, 常用计量名词术语及定义. JJG1001-82
- [12] Bunnagel, R. *et al.*, Fizeau interferometer for measuring flatness. *Appl. Opt.*, 1968, **7**(2): 331

## High Accuracy and Large Aperture Optical Standard —— Phase Shifting Digital Flat Interferometer

Chen Jinbang    Song Dezheng    Zhu Rihong    Wang Qing    Chen Lei

(Electro-optics Department of Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094)

Chen Daojiong

(Anhui Institute of Technology, Hefei 230069)

(Received 16 November 1993; revised 6 February 1994)

**Abstract** This paper describes a large aperture-high accuracy phase shifting digital flat interferometer which is a combination of optics, mechanics, electricity and algorithm. Its aperture is 245 mm and liquid surface is used as absolute flat to eliminate systemic error. The accuracy is better than  $\lambda/50$  ( $\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$  peak-to-valley value). The tested aperture can be enlarged to 500 mm. This interferometer will be used as an optical flat standard instrument. The optical interferometer, phase shifter and calibration of precision are discussed.

**Key words** interferometer, phase shifting technique, optical flat, standard, calibration of precision.