基于波长移相干涉技术的多表面信息分离

于瀛洁1,常林1*,闫恪涛1,郑维伟1,徐瞿磊1,王陈1,孙 涛2

(1. 上海大学 机电工程与自动化学院,上海 200444;
 2. 上海浦东发展银行,上海 200002)

摘 要:利用波长移相干涉技术对平行平板的前后表面同时进行非接触测量在光学检测领域具有重要意义。阐述一种可实现平行平板前后表面干涉混叠信号解相的时域加权算法:加权 36 步采样算法。首先基于算法原理与约束条件进行了加权多步采样算法的基础分布参数的设计,进而得到前表面、后表面、厚度变化干涉信号的采样权值。利用该权值进行加权操作即可得到各表面初始相位分布。选用泽尼克多项式进行了多表面干涉解相的仿真,模拟的分离结果与真值的最大误差不超过 0.06 nm。此外还分析了多种误差对测量结果的影响。论文对这一厚度为 20 mm 的平行平板开展了测量,验证了该算法在实际测量过程中的有效性。

关键词:波长移相; 加权多步采样算法; 多表面信息分离; 窗函数设计 中图分类号:TH741.1 文献标志码:A DOI: 10.3788/IRLA202049.0303014

Information separation of multi-surface based on wavelength phase-shifting interferometry

Yu Yingjie¹, Chang Lin^{1*}, Yan Ketao¹, Zheng Weiwei¹, Xu Qulei¹, Wang Chen¹, Sun Tao²

School of Mechatronic Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200444, China;
 Shanghai Pudong Development Bank, Shanghai 200002, China)

Abstract: The simultaneous non-contact measurement of the front and rear surfaces of parallel plates by using wavelength phase-shifting interference technology was of great significance in the field of optical determination. A time-domain weighting algorithm was proposed to solve the overlapping interference signals of the front and rear surfaces of parallel plates: weighted 36-step sampling algorithm. Firstly, based on the principle and constraints of the algorithm, the basic distribution parameters of the weighted multi-step sampling algorithm were designed, and then the sampling weights of the interference signals of front surface, rear surface and thickness variance were obtained. Through the calculation of the basic distribution parameters, the sampling weight of each surface can be obtained, and the initial phase distribution of each interference information can be obtained by using the weight operation. Based on Zernike polynomials, the simulation of multi-surface interference phase solution was carried out, and the maximum error between the simulation result and the true value was not more than 0.06 nm. In addition, the influence of various errors on the measurement results was analyzed. A parallel plate with a thickness of 20 mm has been measured. The experiment verifies the effectiveness of the algorithm in the actual measurement process.

基金项目:国家重点研发计划项目 (2016YFF0101905)

收稿日期:2019-11-01; 修订日期:2019-12-25

作者简介: 于瀛洁 (1969-), 女, 研究员, 博士, 主要从事光学检测技术方面的研究。Email: yingjieyu@staff.shu.edu.cn 通讯作者: 常林 (1993-), 男, 博士牛, 主要从事光学检测技术方面的研究。Email: 18905370986@163.com

Key words: wavelength phase-shifting; weighted multi-step sampling algorithm; information separation of multi-surface; design of window function

0 引 言

高精度平行平板在光学领域及半导体领域应用 非常广泛。其表面形貌对元件性能有很大影响,因此 如何无损地获得平行平板精确表面信息是领域内科 研人员研究的内容之一^[1-4]。传统的测量方法多采用 硬件移相干涉仪在前后表面涂抹消光材料的方法来 逐次对透明平行平板的各表面进行测量。但是这种 方法的不足之处在于:在消光材料的涂抹和清洗过程 中容易对平板元件的表面造成损伤。

为了克服上述问题,基于波长移相干涉技术的多 表面非接触式无损检测方法得到了发展^[1-8]。这种测 量方法通过改变激光器波长实现移相,并且因为各干 涉光束光程的不同,所以各表面干涉信息拥有不同的 移相频率,这种特点为多表面的同时检测提供了基 础。Sun等人提出一种利用最小二乘原理进行循环 迭代得到被测件前后表面形貌与厚度变化的方法^[6-7]。 Kim等人基于采样窗函数的设计,发展了多步移相采 样算法,通过频域评价函数可以知所设计的窗采样算 法具有较好的性能^[8]。Huang等人提出一种最小二乘 算法,可以实现被测件双表面的测量^[9]。Yu等人基于 傅里叶变换方法,提出一种步进式波长移相测量方案 及测量系统,可以实现多表面被测件厚度的测量^[10]。

目前,多表面干涉信息提取的主要难点在于如何 从含有背景光强和噪声的多种信息混叠条纹图中精 确地进行信息分离来同时得到各干涉信息的初始相 位,从而通过无损和非接触的方法恢复透明被测平板 的面形信息和厚度信息。与此同时,随着测量要求的 不断提高,算法处理过程中的误差以及参数设计对于 解相结果的影响也应当被充分重视。

文中阐述一种加权 36 步移相法来实现各表面的 同时测量,对比了仿真结果与真值的残余误差,还分 析了腔长、厚度和波长误差对分离结果的影响。此 外,文中通过搭建实验系统进行了实测数据的采集与 处理。实验结果的均方根误差可达微米级,验证了算 法的有效性,为透明平板的多表面干涉信息的分离解 相和恢复提供了基础。

1 波长移相干涉技术的基本原理

使用波长移相干涉法进行测量时,为了得到被测 面的三维形貌信息,必须要求解干涉图里的初始相位 信息^[4-5]。但是由于采集到的各表面的干涉信息的光 强信号是混叠的,因此直接进行解相是不可能的,必 须根据各干涉信息之间的不同性质,使用相应的分离 算法,从而得到目标信号。在对平行平板的前后表面 进行干涉测量时,干涉图中每一个点的干涉光强信息 可以由以下公式表示^[8-9]:

$$I(x, y, t) = I_0(x, y)[1 + \sum \gamma_i(x, y)\cos(\theta'_i(x, y, t))]$$

$$\theta'_i(x, y, t) = \theta_i(x, y) + \Delta \theta_i(x, y, t)$$
(1)

式中: $I_0(x,y)$ 为背景光强; $\gamma_i(x,y)$ 为调制度; $\theta'_i(x,y,t)$ 与 $\theta_i(x,y)$ 分别为干涉信号的相位与初始相位; $\Delta \theta_i(x,y,t)$ 为干涉图在t时刻引入的附加相位变化, 角标 i=f, r, fr,分别对应前表面、后表面与厚度变化信号。

干涉光强 I(x, y, t) 可以利用 CCD 相机采集得到, 移相步长通常作为已知或可测得的主动控制变量。 式中 $\Delta\theta_i(x, y, t) = 2\pi v_i(x, y)t$, $v_i(x, y)$ 为移相频率。为了 简化描述,点坐标 (x, y) 在下文中省略。通过波长移相 干涉仪施加电压的变化可以实现波长的调谐,从而改 变相位值^[11]。

在同时存在参考镜与前表面、后表面和被测件前 后表面自干涉时,其干涉路径如图1所示。





Fig.1 Reflection path diagram of interference beam

各表面干涉信号的移相频率可表达为:

$$v_i = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0^2} \left[ph + qn_1 T (1 - \frac{\lambda_0}{n_1} n_{\lambda}') \right]$$
(2)

式中: p和q分别表示空气隙和被测件内部中的激光反

射后进入观测系统的次数; h表示腔长值, 数值上为被 测面到参考面之间的实际距离; λ₀表示起始波长; Δλ表示相位调谐对应的波长改变量; n₁和T分别表示 被测件的折射率和厚度; n'₁为折射率随波长的变化率 (因波长变化量相对于波长值极小, 此值近似为 0)。 从公式 (2) 可知, 对于平行平板, 前表面、后表面和参 考表面彼此之间形成的干涉信号在移相过程中, 时域 的变化频率是不同的。

文中所述加权 36 步算法本质是通过时域傅里叶 离散加权计算对目标信号进行提取,即将叠加的干涉 信号进行分离,从而求解其初始相位。基于频域采样 窗的设计和计算,目标信号的多步离散加权采样的数 学表达可以写为^[7,8]:

$$\theta_{i} = \arctan \frac{\sum_{k=1}^{K} S_{i}(k)I(k)}{\sum_{k=1}^{K} C_{i}(k)I(k)} = \arctan \frac{\sin \theta_{i}}{\cos \theta_{i}}$$
(3)

式中: *S_i*(*k*)、*C_i*(*k*)分别对应正弦项和余弦项采样权值; *I*(*k*)为第*k*步该点的干涉光强,其中*k*=1,2,3.....*K*,对 应移相序数,*K* 为移相总步数。测量时采集的混叠干 涉图是背景光强、噪声与各表面干涉信息的叠加结 果,通过解相算法在干涉图中解调出每一个表面的初 始相位,从而以初始相位为基础进行进一步分析:

$$\theta_{f} = \frac{4\pi n_{0}h}{\lambda_{0}}, \quad \theta_{r} = \frac{4\pi (n_{0}h + n_{1}T)}{\lambda_{0}},$$
$$\theta_{f-r} = \frac{4\pi n_{1}T}{\lambda_{0}}$$
(4)

一般空气折射率n₀取 1, 计算时可以省略。因此 通过公式 (4) 的各干涉信息的初始相位计算得到各表 面的形貌分布和厚度变化。

2 36 步干涉加权采样算法设计与评价

考虑加权多步窗采样,对公式(1)使用欧拉公式进行变换,加入采样窗取样后,再对公式进行傅里叶变换。公式(1)频域形式可以改写为^[9,12]:

$$I_F(v) = \frac{1}{2} I_0(x, y) \gamma_i \{ W(v)$$

$$\sum \left[W(v - v_i) \exp(j\theta_i) + W(v + v_i) \exp(-j\theta_i) \right] \}$$
(5)

式中:j为虚数单位;W(v)为频域内关于频域变量v的窗函数。若一倍频与二倍频处窗函数为0,可得:

$$\theta_{i} = \arctan \frac{Im[I_{F}(v_{i})]}{Re[I_{F}(v_{i})]} + const$$
$$= \frac{\sum_{k}^{K} S_{i}(k)I(k)}{\sum_{i} C_{i}(k)I(k)} + const \qquad (6)$$

$$S_{i}(k) = w(k)\sin(-\theta_{i}(k))$$

$$C_{i}(k) = w(k)\cos(-\theta_{i}(k))$$

$$w(k) = [S_{i}(k)\sin(-\theta_{i}(k)) + C_{i}(k)\cos(-\theta_{i}(k))$$

$$+ i[S_{i}(k)\cos(-\theta_{i}(k)) - C_{i}(k)\sin(-\theta_{i}(k))]$$
(7)

式中: const 表示频率为 0 时的传输窗口复相位; w(k)为基础分布参数。公式 (5)~(7) 为加权采样函数 的基本设计方法。同时加权采样函数的设计应符合 以下条件^[7,13]:

$$\begin{cases} \sum_{k=1}^{k=K} S_i(k) = 0 & \sum_{k=1}^{k=K} C_i(k) = 0\\ \sum_{k=1}^{k=K} S_i(k) \sin(-\theta_i(k)) &= \sum_{k=1}^{k=K} C_i(k) \cos(\theta_i(k)) & (8)\\ \sum_{k=1}^{k=K} S_i(k) \cos(\theta_i(k)) = -\sum_{k=1}^{k=K} C_i(k) \sin(\theta_i(k)) & (8) \end{cases}$$

文中选取 5N-4 算法进行混叠干涉信号的分离, 综合权衡算法适应性与计算量^[1,7],取 N=8,因此移相 步数为 36,通过上文所述的基础分布参数和各采样权 值的计算,从而进行下一步各信号初始相位的求解。 2π/N = π/4为单次移相值。根据上述约束条件,可求 得基础分布参数如公式 (9) 所示:

w(36) = (1,5,15,35,70,126,210,330,490,690,926,1190,1470,1750,2010,2260,2380,2460,2460,2380,2260,2010,1750,1470,1190,2226,690,490,330,210,126,70,35,15,5,1)/2460(9)

求取基础分布参数后,利用公式(9)构造采样权 重函数*S_i(k)和C_i(k)*,以厚度变化为基频,根据需要提 取的干涉条纹组的频率不同,各权值计算结果分别如 公式(10)~(12)所示,分别对应前表面、后表面、厚度 变化。其中*M*为腔长系数,后文将会对该系数的取 值进行分析。

$$S_{f}(k) = \frac{1}{4}w(k)\cos\left[\frac{(k-22)M}{4}\right]$$
$$C_{f}(k) = \frac{1}{4}w(k)\sin\left[\frac{(k-22)M}{4}\right]$$
(10)

$$S_{r}(k) = \frac{1}{4}w(k)\cos\left[\frac{(k-22)(M+1)}{4}\right]$$
$$C_{r}(k) = \frac{1}{4}w(k)\sin\left[\frac{(k-22)(M+1)}{4}\right]$$
(11)

$$S_{f-r}(k) = \frac{1}{4}w(k)\cos\left[\frac{(k-22)}{4}\right]$$
$$C_{f-r}(k) = \frac{1}{4}w(k)\sin\left[\frac{(k-22)}{4}\right]$$
(12)

在进行信息提取时,各种算法的信息提取性能是 不同的。为综合评价解相算法的性能,即能否有效的 提取目标信号以及抑制噪声,定义采样算法的评价函 数如公式(13)所示^[6]:

$$F_1(v) = \sum_{k=1}^{k=K} S_i(k) \exp\left(-j\delta(k)\frac{v_i}{v_{f-r}}\right)$$
$$F_2(v) = \sum_{k=1}^{k=K} C_i(k) \exp\left(-j\delta(k)\frac{v_i}{v_{f-r}}\right)$$
(13)

式中:δ(k)为狄拉克函数。目前有很多算法可以用于 基础分布参数的选取,但是不同算法对信号的提取能 力-即解相能力是不同的^[1,11]。其中谐波抑制能力则是 评价窗函数最重要的性能指标。下面将就常用的汉 宁窗的评价函数及其频域谐波抑制能力进行评估,并 与加权 36 步移相算法的采样性能进行比较。

汉宁窗是频域提取信号常用的采样窗,尤其用于 通信信号传输过程中。其特点是主瓣较宽,旁瓣较 小,从而可以有效减小旁瓣泄漏,其基础分布参数的 公式可表示为:

$$w_{Hanning}(k) = \frac{1}{2} \left[1 - \cos\left(\frac{2\pi k}{K+1}\right) \right]$$
(14)

通过公式 (10)~(12) 的各信息的加权函数进行计 算,利用公式 (13) 的评价函数进行计算,取厚度变化 为基础频率,因此根据光程不同,通过设置腔长系数 的取值,前表面和后表面分别对应二倍频和三倍频。 可以得到各表面的汉宁窗评价结果如图 2 所示。图 中横坐标表示各频率与基础频率的比值。

根据汉宁窗的评价函数可知,汉宁窗对旁瓣有较好的抑制效果,各倍频处的旁瓣幅值为2.68%,即大多数旁瓣信息将被有效抑制。但是与此同时仍然会有一部分混频噪声被采集。同样地,根据公式(13)可得出加权36步采样权重函数的各倍频的评价函数如图3所示。



Fig.2 Hanning window evaluation function

Evaluation function of 36 step weighted sampling algorithm under different frequency doubling





由文中所阐述的加权 36 步算法的评价函数结果 可以得知,各倍频下评价函数的旁瓣幅值均为 0.066%,远小于汉宁窗的旁瓣幅值,因此意味着该算 法的信号提取效果以及旁瓣抑制效果优于汉宁窗。

3 数值仿真与误差分析

在这一部分将对设计的算法进行数值仿真,并且 对腔长、厚度以及波长误差进行分析。文中将通过泽 尼克多项式模拟各波面。在数值仿真时所模拟的干 涉条件为:考虑被测件为透明平行平板,取单参考面 光楔,模拟平行平板前表面和后表面与参考面的干涉 以及被测件前后表面自干涉的叠加干涉信号,各模拟 波面的数学表达式可以写为:

$$H_{si} = k_{ia} \times \left[\left(\frac{x - x_i 0}{R_i} \right)^2 - \left(\frac{y - y_i 0}{R_i} \right)^2 \right] + k_{ib} \times \left[2 \times \left(\left(\frac{x - x_i 0}{R_i} \right)^2 - \left(\frac{y - y_i 0}{R_i} \right)^2 \right) - 1 \right] + k_{ic} \times \frac{x - x_i 0}{R_i} + k_{id} \times \frac{y - y_i 0}{R_i} + k_{ie}$$
(15)

式中: H_{si}表示模拟的波面; k_{ia}表示相散; k_{ib}表示离焦; k_{ic}和k_{id}分别表示 x 和 y 方向的倾斜; k_{ie}表示沿 Z 轴的 偏移量; (x_{i0}, y_{i0})表示有效干涉区域的圆心的坐标; R_i表示像差半径。如前所述角标 *i=f*、r 分别对应前表 面、后表面的波面,厚度变化为后表面减前表面的结 果。干涉图大小为像素 1 024 的矩形。波面仿真参数 取值如表 1 所示。模拟的被测件为表面折射率为 1.5,平均厚度为 20 mm 的平行平板,模拟腔长为 300 mm。

表1 仿真参数的取值

Tab.1Value of simulation parameters

Surface	Туре	Value	Surface	Туре	Value
Front surface	k_{fa}	0	Rear surface	k _{ra}	0.5
	k_{fb}	-0.1		k_{rb}	-0.1
	k_{fc}	0.0		k_{rc}	0.03
	k_{fd}	0.08		k_{rd}	0.05
	k_{fe}	0.1		k_{re}	0.15
	x_{i0}	300		x_{i0}	60
	yi0	40		yi0	450
	R_i	120		R_i	250

通过基于波长调谐移相原理和移相频率的计算 方法,设置合适的腔长与待测元件厚度数值关系,可 以人为控制各信号移相频率的分布。这里引入腔长 系数 *M*,被测件较薄时一般选取厚度变化信号作为基 础频率^[8]。通过将腔长系数进行精确的选取和控制, 可以改变移相频率与对应的不同倍频。腔长系数的 公式定义为:

$$M = \frac{h}{n_1 T} \tag{16}$$

如前文所述的模拟的被测件,其折射率为n₁=1.5, 待测元件表面反射系数为 R,根据被测件的材料特性,文中取 0.04。不同的腔长系数的选取应当综合考 虑算法适用范围以及目标信号的频率分布,否则无法 进行解相。根据表 1 所选取的仿真参数的适应范围^[1,6], 考虑计算量和算法适应性,文中选取腔长系数为 M=2, 因此各信号的倍频分布如表 2 所示。

表 2 M=2 时频率比例

Tab.2	Frequency	ratio	distribution	when	M = 2

Туре	Multiple of frequency(v_i/v_{f-r})	Туре	Multiple of frequency(v_i/v_{f-r})
v_f	2	v _r	3
v_{f-r}	1	v_d	6

如前文所述,因二次反射信号经过多次反射后能 量损失较大,因此其强度较小,对结果的影响不大,这 里不对该种信号进行提取。通过上述分析可知,当 M=2时,则对应的腔长为 h=3T。例如当被测元件的 平均厚度为 10 mm 时,腔长需要达到 30 mm。但是在 实际测量中因为参考镜与被测件均由夹具夹持,本身 会占用一定空间,因此如此近距离的调节是难以达到 的。针对这种情况,文中通过分析加权 36 步移相算 法的频谱特性-周期性拓展。当基础移相值为 $2\pi/N = \pi/4$ 时, N=8 就为加权 36 步移相算法的周期, 采样窗在频域内周期地分布。因此 M 值只需满足公 式 (17),其性能与 M=2 时等价,叠加干涉条纹图中多 表面干涉信号可被周期性地提取。

$$M = \rho N + 2 \tag{17}$$

式中: ρ 为任意正整数; N 为延拓周期。当 N=8 时, 通 过公式 (17) 可知, M 可能取值为 2,10,18,26,34,42,50 …, 通过这种特性可以扩展干涉腔长对应被测件的可 用腔长分布范围, 在干涉测量中具有重要的意义。设 置基础移相值 $\Delta \theta_{f-r}$ 为 $\pi/4$, λ_0 =632.8 nm 时, 则对应波 长单次调谐量为:

$$\Delta \lambda = \frac{\Delta \theta_{f-r} \lambda_0^2}{4\pi n_1 T} \approx 0.000\ 834\ 8\ \text{nm}$$
(18)

将表1的仿真参数代入泽尼克多项式进行各波 面的模拟,为贴近真实测量情形,每一步的取移相误 差为Δλ/10。各波面的干涉信号叠加后可以得到混叠 光强分布图,在此基础上进行波长改变即可实现移 相。将公式(9)求取的结果代入公式(10)~(12)求取 各信号的采样函数,由公式(3)的加权计算可以得到 各表面的结果,经过反正切变换后可得到各表面的包 裹相位如图4所示。

通过求解结果可得看出,所述算法可以清晰地分 离各信号。为了验证和量化算法的有效性,对各分离 信息与所设定的真值的形貌残余误差进行量化,如图 5 所示。



图 4 36 步加权采样算法求解的包裹相位

Fig.4 Wrapped phase of 36-steps weighted sampling algorithm



图 5 50 少加伐木什并伍时残赤侯左

Fig.5 Residual errors of 36-steps weighted sampling algorithm

通过残差分布结果可以看到,36步加权采样算法的计算精度很高,真值与模拟值的最大误差不超过 0.06 nm,具有较好的算法性能,能够实现多表面干涉 信息的有效分离和各表面相位的解相与恢复。

但是在实际的移相过程中,因为各种不确定因素 和扰动的存在,几乎不可能严格地保证测量时的环境 参数是理想的^[14]。因此为了使计算更具现实意义需 要对误差进行准确的评估。

因为不同的腔长位置和样品厚度值会给相对应 的干涉信息带来不同的移相频率^[13],而在实际的实验 过程中由于定位误差和系统误差的存在,因此实际的 腔长位置和厚度相对于理想值而言必定存在差值,而 此部分差值会对于已经设计好的算法产生影响。此 外,由于移相控制器的输出波动,测量时波长误差也 应被考虑在内。 ε_h 、 ε_T 、 ε_c 分别表示腔长、厚度、波长的误差系数。h'、T'、 λ' 分别表示考虑误差的实际腔长、厚度和波长,下角标为0时表示基准参考值,此处分别取750 mm、4 mm、632.8 nm。考虑误差时,实际的腔长和厚度表示为:

$$\begin{aligned} h' &= (1 + \varepsilon_h) h'_0 \quad T' = (1 + \varepsilon_T) T'_0 \\ \lambda' &= (1 + \varepsilon_C) \lambda'_0 \end{aligned}$$
 (19)

观察在不同误差下的均方根误差-RMS(Root Mean Square) 值。真值与求解结果的 RMS 值可表示为:

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^{n=N_{RMS}} (x_{ca} - x_{tr})^2}{N_{RMS}}}$$
(20)

式中: N_{RMS} 为总采样点数, 对应干涉图中所有采样点的集合; x_{ca} 为干涉图上每一个采样点的计算结果; x_{tr} 为每一个采样点模拟的真值。通过公式 (20), 分别 计算不同腔长误差 ε_h 与厚度误差 ε_r下的 RMS 值, 结果 如图 6 所示。







可以看出厚度和腔长误差对结果有一定的影响, 不超过 1.6 nm。如果要精确得到解相结果,应当综合 考虑所述误差对结果的影响,并且进行误差的控制。

在波长移相干涉仪的实际工作时,波长的调谐量 并不是恒定不变的,当电压有微弱扰动时波长的调谐 量也会有波动,因此必须分析和量化在不同波长调谐 误差下的算法结果。考虑公式(19)存在误差时的波 长计算方法,应用公式(10)~(12)加权采样算法,可以 得到图 7 所示结果。



从图示结果可以看出,36步加权采样算法在波长存在误差的情况下,依然能够得到较好的结果。最大误差不超过 0.025 nm,并且在波长误差系数 ε_c 为 0~0.08 时,波长波动对解相结果影响不大,进一步验证了该算法对误差的鲁棒性。

通过误差分析可以得出结论: 腔长和厚度误差对 结果的影响不超过 1.6 nm, 波长误差对结果的影响不 超过 0.1 nm, 算法对误差的抑制效果良好。上述误差 分析可为算法设计提供合理的参考范围, 以应对不同 的测量要求和实验设备条件, 为算法的进一步发展提 供理论基础。

4 实验验证

文中使用 Fizeau 式波长移相干涉仪进行测量,其 基本结构及原理阐述如下:激光从利用电压进行波长 调谐的激光器出射,经过准直后到达参考镜。参考镜 使用前表面带有角度的光楔,因此一部分在参考镜后 表面发生反射,另一部分激光从被测件表面反射后与 参考镜反射光发生干涉。采集到的干涉信号主要包 括前、后表面与参考镜的干涉信号与被测件前后表面 自干涉信号。而后所述干涉信号进入观测系统,通过 CCD 相机进行采集。干涉仪结构如图 8 所示。实验 实物图如图 9 所示。



图 8 波长移相干涉仪原理简图





图 9 加权 36 步移相干涉测试实验图 Fig.9 Weighted 36-steps phase-shifting interference test experiment

被实验条件及参数为: 腔长为 300 mm, 选择厚度 为 20 mm、折射率为 1.52 的被测件(材料: 熔融石英), 中心波长为 632.8 nm, 移相总步数为 36 步, 移相步距 为 $\pi/4$, 总移相步距为9 π , 单次波长改变量 0.000 834 8 nm, 总波长改变量为 0.030 051 7 nm。文中使用波长可调 谐激光器的调谐范围为 632.67~632.97 nm, 电压调谐 范围为 0~117 V。测试环境的温度为 26 °C, 温度变化 率小于 0.3 °C/h, 相对湿度为 55%~65%。

使用上述实验系统进行干涉图的采集,利用 CCD 相机采集 36 幅干涉条纹,可以得到 36 帧混叠的 干涉图。采集到的干涉图整体为像素850×850的矩 形,去除无效背景边缘后以备算法处理。文中所用处 理软件为 MATLAB 2018b。通过将公式 (10)~(12) 求 取的加权 36 步采样权重函数代入公式 (3) 进行加权 计算,可以得到各信号的包裹相位如图 10 所示。



Wrapped phase of rear surface Wrapped phase of thickness variance



图 10 初始干涉图和加权多步解相结果 Fig.10 Initial interferogram and weighted multi-step results

对包裹相位进行解包裹、消倾斜后计算各表面 的 RMS 值分布。求得前表面、后表面与厚度变化的 RMS 值分别为: 2.502 7、14.060 8、15.770 4 μm。通 过实验结果可以看出, 加权 36 算法能够有效地从混 叠的干涉图中分离各表面信息, 使各表面和厚度变化 的初始相位分布能够通过混叠的光强分布干涉图进 行重建, 从实验角度验证了加权多步算法的可行性。 同时可以通过各表面的初始相位分布得到对应表面 形貌的分布, 实现形貌信息的重构。此外, 恢复的相 位分布结果可以为表面信息的进一步分析提供直接 依据。

5 结 论

文中阐述了加权 36 步解相算法的设计和实施过程。通过仿真和实验可以得出以下结论:

(1) 加权 36 步移相采样算法通过求取对应的采 样权重值,可以利用系数加权运算得到被测表面的初 始相位,模拟的最大残差为 0.06 nm。对厚度为 20 mm 的平行平板实现了分离测量,该算法的前表面、后表 面与厚度变化的 RMS 值分别为: 2.502 7、14.060 8、 15.770 4 μm。 (2) 文中分析了不同的腔长误差、厚度误差和波 长下的算法表现结果,误差分析结果表明,腔长和厚 度误差对结果的影响不超过 1.6 nm,波长误差对结果 的影响不超过 0.025 nm,各变量的误差分析为算法的 不同情况和需求下的应用提供了理论基础。

(3) 加权 36 步采样算法的特点在于: 对混叠的干 涉信号加权采样窗进行计算, 能够根据各信号分布的 频率不同进行时域傅里叶采样, 通过加权计算即可同 时得到各干涉信息的初始相位分布。但是该算法对 腔长系数的取值有关, 只能满足固定腔长值下的解 相。当腔长或厚度发生变化时, 算法有可能不适用, 无法应对任意腔长下的测量要求。

参考文献:

- Kim Y, Hibino K, Sugita N, et al. Design of phase shifting algorithms: fringe contrast maximum [J]. *Optics Express*, 2014, 22(15): 18203.
- [2] Larkin K G, Oreb B F. Design and assessment of symmetrical phase-shifting algorithms [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1992, 9(10): 1740–1748.
- [3] Chatterjee S. Noncontact thickness measurement of planeparallel transparent plates with a lateral shearing interferometer
 [J]. *Optical Engineering*, 2007, 46(3): 035602.
- [4] Kumar Y P, Chatterjee S. Simultaneous determination of refractive index and thickness of moderately thick plane-parallel transparent glass plates using cyclic path optical configuration setup and a lateral shearing interferometer [J]. *Applied Optics*, 2012, 51(16): 3533.
- [5] Kim Y, Hibino K, Sugita N, et al. Simultaneous measurement of surface shape and optical thickness using wavelength tuning and a polynomial window function [J]. *Optics Express*, 2015, 23(25): 32869–32880.
- [6] Sun T, Zheng W, Yu Y, et al. Determination of surface profiles of transparent plates by means of laser interferometry with wavelength tuning [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2019, 115: 59–66.
- [7] Sun T, Asundi A K, Valyukh S. Algorithm for surfaces profiles and thickness variation measurement of a transparent plate using a fizeau interferometer with wavelength tuning [J]. *Applied Sciences*, 2019, 9(11): 2349.
- [8] Kim Y, Hibino K, Kizaki T, et al. Simultaneous interferometric measurement of the absolute thickness and surface shape of a transparent plate using wavelength tuning Fourier analysis and

phase shifting [J]. Precision Engineering, 2017, 48: 347-351.

- [9] Huang L, Asundi A K. Phase retrieval from reflective fringe patterns of double-sided transparent objects [J]. *Measurement Science and Technology*, 2012, 23(8): 085201.
- [10] Yu H, Aleksoff C, Ni J. Thickness measurement of transparent plates by wavelength stepping and a phase unwrapping algorithm [J]. *Measurement Science and Technology*, 2013, 24(7): 075201.
- [11] Sun T, Yu Y, Dong Y, et al. Calibration of tunable diode laser wavelength based on energy centrobaric correction method for

discrete spectrum[C]//Proc of SPIE, 2018, 10827:108270K.

- [12] Pontus J, Göran A, Magnus K. Suppression of phase error in differential phase-shift keying data by amplitude regeneration [J]. *Optics Letters*, 2006, 31(10): 1385–1387.
- [13] Groot P D. Measurement of transparent plates with wavelengthtuned phase-shifting interferometry [J]. *Applied Optics*, 2000, 39(16): 2658–2663.
- [14] Yu Yingjie, Sun Liuxing. Parameter determination method of weighted multi-step wavelength phase-shifting algorithm [J]. *Astrometry*, 2003, 23(6): 1–8. (in Chinese)