

# 基于数值模拟的高精度波长移相干涉仪随机误差分析

文 刚<sup>1,2</sup> 苏东奇<sup>1,2</sup> 苏志德<sup>1,2</sup> 隋永新<sup>1</sup> 杨怀江<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033)  
<sup>2</sup> 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要** 研制波长移相干涉仪时为了选出满足干涉仪设计指标的激光器和 CCD 相机, 采用直接计算法和蒙特卡罗法对干涉仪系统中的主要随机误差进行建模仿真。介绍了菲佐型波长移相干涉仪的基本结构和测量原理, 对振动、空气扰动和激光光源不稳定性等随机误差进行了理论分析, 建立了相应的数学模型。结合误差模型进行数值仿真, 获得了各随机误差大小与测量结果之间的数值对应关系, 完成了激光器和 CCD 相机的选型和误差分配。搭建了波长移相干涉仪实验装置并对其重复性进行测量。实验结果表明, 搭建的波长移相干涉仪的均方根 (RMS) 重复性优于 0.07 nm, 基本达到设计指标。

**关键词** 测量; 重复性分析; 数值模拟; 蒙特卡罗法; 波长移相干涉仪

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201340.1008003

## Analysis of Random Errors in High Precision Wavelength Phase Shifting Interferometers by Numerical Simulation

Wen Gang<sup>1,2</sup> Su Dongqi<sup>1,2</sup> Su Zhide<sup>1,2</sup> Sui Yongxin<sup>1</sup> Yang Huaijiang<sup>1</sup>

[<sup>1</sup> State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China  
<sup>2</sup> University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China]

**Abstract** To choose proper laser and CCD for studying of wavelength phase-shifting interferometry, the main random errors are numerically simulated in the system based on direct algorithm and Monte-Carlo method. The basic structure of Fizeau wavelength phase-shifting interferometer and theory of measurement are introduced, the errors by vibrating, air turbulence and instability of laser frequency are analysed and the model is set up. Then, combined with the results of numerical simulation, the correspondence between each error and its measuring result is obtained, and proper laser and CCD are determined, simultaneously the error distribution is given. By setting up the interferometer and measuring, the results show that repeatability root-mean-square (RMS) error is better than 0.07 nm, which reaches the requirement.

**Key words** measurement; repeatability analysis; numerical simulation; Monte-Carlo method; wavelength phase shifting interferometer

**OCIS codes** 120.3180; 120.3940; 120.4630; 120.5050

## 1 引言

高精度光学元件的应用需求一直是推动光学检测技术不断发展的重要因素, 光学检测水平决定了光学加工精度<sup>[1]</sup>。由贝尔实验室的 Bruning 等<sup>[2]</sup>提

出的移相干涉 (PSI) 技术具有非接触、精度高等优点, 是现阶段最准确的检测手段之一。目前已有的移相干涉测量技术中, 以压电陶瓷堆 (PZT) 作为移相器的机械式移相干涉仪发展最成熟, 已普遍商用。

收稿日期: 2013-04-07; 收到修改稿日期: 2013-05-14

基金项目: 国家科技重大专项 (2009ZX02205)

作者简介: 文 刚 (1990—), 男, 硕士研究生, 主要从事高精度波长移相干涉仪和移相算法方面的研究。

E-mail: wengang9599@126.com

导师简介: 杨怀江 (1966—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事高精度光学加工、检测技术和信息安全等方面的研究。

E-mail: yanghj@sklao.ac.cn

对高精度的大口径光学元件进行测量时,机械式移相因易引入非线性误差而导致检测精度不高。波长移相干涉仪(WPSI)<sup>[3]</sup>把激光光源作为移相器,通过改变可调谐半导体激光器的输出波长实现移相,避免了机械式移相存在的非线性误差,可满足高精度大口径光学元件的测量需求。以 193 nm 光刻机为例,其投影物镜系统镜片为 20~30 片,部分光学元件口径接近 300 mm,面形精度[均方根(RMS)误差]达到 1~2 nm<sup>[4]</sup>。为满足 193 nm 光刻机投影物镜系统对透镜面形的超高精度要求,本课题组自行研制菲佐型波长移相干涉仪对上述超高精度光学元件进行检测,确定了测量 RMS 重复性达到  $\lambda/10000$  的技术指标。干涉仪研制过程中,系统主机的重复性和准确性是需要考虑的关键技术问题。重复性是表征干涉仪主机稳定性的技术指标,仪器中的随机误差是影响其测量重复性的决定因素。为了确保所研制的干涉仪的测量 RMS 重复性达到  $\lambda/10000$ ,干涉仪设计之前需要进行误差分配,找出各种随机误差对测量结果的影响。目前报道的文献大多是基于直接计算法对干涉仪中的系统误差和部分随机误差进行分析<sup>[5-6]</sup>,大多数随机误差因无法直接用数学公式描述其对检测结果的影响而鲜有报道。对于这类随机误差因素,可采用数值模拟的方式对其进行仿真分析,通过对仿真结果进行统计找出其对检测结果的影响规律。

本文介绍了菲佐型波长移相干涉仪的基本结构和测量原理,总结了影响干涉仪重复性的常见随机误差源。对环境振动、空气温度变化、激光光源不稳定性等主要误差源进行了理论研究,采用直接计算和数值模拟相结合的方式获得了激光器和 CCD 相机引入的随机误差与测量 RMS 值重复性之间的关系,结合仿真结果完成了激光器和 CCD 相机的选型,最后搭建了口径为 100 mm 的波长移相干涉仪实验装置并完成了重复性测量。

## 2 菲佐型波长移相干涉仪基本结构和测量原理

菲佐型波长移相干涉仪的基本结构如图 1 所示。可调谐半导体激光器输出的光束被聚焦透镜聚焦到小孔上,经小孔滤波后的光波通过准直镜变成平行光;参考镜反射的光束与被检光学元件反射的光束发生干涉后在 CCD 光电接收器上形成干涉条纹。对于波长移相干涉仪,CCD 上某像素点的干涉

条纹相对强度可以表示为<sup>[7]</sup>

$$I_j(x,y) = I_0(x,y) \left\{ 1 + \gamma \cos \left[ \frac{4\pi h(x,y)}{\lambda_j} \right] \right\}, \quad (1)$$

式中  $I_0$  代表平均光强,  $\gamma$  为条纹对比度,  $h$  为干涉腔长;  $\lambda_j = \lambda_0 + j\Delta\lambda$  为第  $j$  次移相时激光器输出波长 ( $j = 0, 1, 2, \dots, N-1$ ),  $\lambda_0$  是激光器的初始波长,  $\Delta\lambda$  为移相步长。从(1)式可以看出,改变激光输出波长能使相邻两幅干涉图间的相位发生变化而实现移相,单次移相引入的附加相位  $\Delta\varphi$  与移相步长及干涉腔长之间满足

$$\Delta\varphi(x,y) = \frac{4\pi h(x,y)}{\lambda_0^2} \Delta\lambda. \quad (2)$$

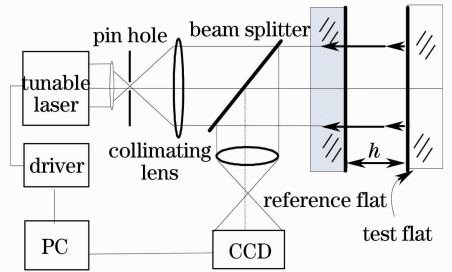


图 1 波长移相干涉仪原理图

Fig. 1 Sketch map of wavelength phase shifting interferometer

若采用等间隔移相,激光器初始波长和干涉腔长确定时可由(2)式求出移相步长  $\Delta\lambda$ ;对激光器进行波长调谐实现移相干涉测量,可获得有序的  $N$  幅干涉图。设计合适的  $N$  步移相算法对干涉图进行处理可获得  $[-\pi, \pi]$  之间的包裹相位,解包裹运算处理后即可获得被测元件的面形信息。一般地,可将  $N$  步标准移相算法表示为<sup>[8]</sup>

$$\theta' = \arctan \left( \frac{\sum_{j=0}^{N-1} s_j \cdot I_j}{\sum_{j=0}^{N-1} c_j \cdot I_j} \right) + c, \quad (3)$$

式中  $\theta'$  代表移相算法提取的未解包裹的相位,  $s_j$  和  $c_j$  是移相算法的特征系数,  $c$  代表一个常量。

## 3 影响干涉仪测量 RMS 重复性的主要随机误差

干涉仪系统中的主要随机误差有:振动、空气扰动及温度变化、激光频率不稳定性、激光功率不稳定性和 CCD 相机噪声等。其中,振动、空气扰动和温度变化等环境误差可采用直接计算法对其进行分析;激光器和 CCD 相机引入的仪器误差与干涉仪测

量 RMS 值重复性之间不能直接用数学公式描述,这里采用蒙特卡罗法对其进行数值仿真:对于给定的随机误差项给出其满足的概率分布,根据该分布生成误差允许范围内的随机数;计算该随机误差所引起的测量误差值,对其进行统计分析获得各误差项对测量结果的影响规律。

### 3.1 振 动

在移相干涉测量过程中,环境振动可使菲佐型干涉仪中非共光路部分被测面与参考面之间的光程差发生改变而引入测量误差。一般地,可将环境振动表示为<sup>[9-10]</sup>

$$n(t) = A \cos(2\pi\nu t + \alpha), \quad (4)$$

式中  $A$  为振幅,  $\nu$  为振动频率,  $\alpha$  为振动相位偏差。仅考虑振动时,可将干涉条纹相对强度表示为

$$I'(\theta, \alpha, t) = I_0 \{1 + \gamma \cos[\theta + \varphi(t) + n(t)]\}, \quad (5)$$

式中  $\theta$  为被测元件实际面形,  $\varphi$  为移相器引入的相位值。对于  $N$  步移相算法,假设 CCD 采样频率为  $\nu_0$ , 可将 CCD 上的光强积分表示成离散形式<sup>[6-9]</sup>:

$$I' = \sum_{j=0}^{N-1} I(\theta, \alpha, t_j + t_n), \quad (6)$$

式中  $t_n = \left(n - \frac{N-1}{2}\right) \frac{\tau}{N}$ ,  $\tau = \frac{\Delta''\varphi}{2\pi\nu_0}$ ,  $\tau$  代表单次移相时间。由(3)式可得振动引入的相位误差为

$$\Delta\theta = \theta' - \theta. \quad (7)$$

通过上述模型可以获得振动导致的相位误差,分别改变振动频率和振动振幅的大小可获得不同振动条件下的误差,从而找出振动对检测结果的影响规律。

### 3.2 空气扰动和温度变化

高精检测过程中,一般可将空气扰动看作低频振动来简化处理<sup>[11]</sup>,分析方法同 3.1 节。空气温度的变化会使其折射率发生改变,从而改变菲佐型干涉仪中非共光路部分的光程差,最终影响了干涉仪测量重复性。空气折射率与空气温度、压强和组成成分有关,可用 Edlen 公式进行描述<sup>[12-13]</sup>:

$$(n-1)_{t,p} = \frac{p(n-1)_s}{96095.43} \times \frac{1+10^{-8}(0.613-0.00998t)p}{1+0.003661t}, \quad (8)$$

式中  $t$  为大气温度,  $p$  为大气压强,  $(n-1)_{t,p}$  表示空气相对于真空的折射率,称为折射度,  $(n-1)_s$  表示标准空气折射度。根据 Edlen 公式,当空气温度为  $15\text{ }^\circ\text{C} \sim 30\text{ }^\circ\text{C}$  时空气折射率的经验公式可表示为<sup>[14]</sup>

$$(n-1)_{t,p} = \frac{2.8793p}{1+0.003671t} \times 10^{-9}. \quad (9)$$

由(9)式可以获得空气折射率随温度和压强的变化公式为

$$\Delta n = \frac{p\Delta t}{(1+0.003671t)^2} \times 10^{-11}, \quad (10)$$

$$\Delta n = \frac{\Delta p}{1+0.003671t} \times 10^{-9}. \quad (11)$$

由(10)、(11)式可知,当温度  $t = 20\text{ }^\circ\text{C}$  时,  $p = 1.01325 \times 10^5\text{ Pa}$ , 温度变化对空气折射率的影响比压强变化的影响大 3 个数量级左右,因此这里仅讨论空气温度变化对测量结果的影响。保持菲佐型干涉仪干涉腔长和激光波长不变时,空气折射率变换引入的相位变化为

$$\Delta\theta = \frac{4\pi h}{\lambda} \Delta n = \frac{4\pi h}{\lambda} \frac{p\Delta t}{(1+0.003671t)^2} \times 10^{-11}. \quad (12)$$

由(12)式可直接看出:测量误差与干涉腔长  $h$  和空气温度变化量  $\Delta t$  之间成正比。要使测量结果更精确,需要尽量保持环境温度稳定。此外,在保证能够对被测件实现检测的前提下,尽量使干涉腔长小一些对检测结果更有利。

### 3.3 激光频率不稳定

在移相干涉检测过程中,激光频率发生波动会导致移相步长改变,最终给测量结果带来不利影响。激光器频率的变化可看做一个满足均匀分布的随机过程,设激光器中心波长为  $\lambda_0$ , 则其实时波长描述为<sup>[15-16]</sup>

$$\lambda(j) = \lambda_0 + \Delta\lambda_0(j) = \lambda_0 [1 + \epsilon_\lambda \cdot \text{rand}(j)], \quad (13)$$

式中  $\text{rand}(j)$  表示均值为 0,  $-1$  到  $1$  之间满足均匀分布的随机数,  $\epsilon_\lambda$  表示激光器频率稳定度大小。一般地,激光器的频谱满足高斯分布,可表示为<sup>[15]</sup>

$$I(k) = c \exp\left[-\frac{4(k-k_0)^2}{\Delta k^2}\right], \quad (14)$$

式中  $c$  为常数,  $k = 2\pi/\lambda(j)$ ,  $k_0 = 2\pi/\lambda_0$ 。此时单色光干涉条纹强度随光程差的变化可表示为

$$I' = I(k)[1 + \gamma \cos(k \cdot \Delta L)], \quad (15)$$

式中  $\Delta L = (\theta + \varphi + \delta)/k_0$  表示光程差,  $\varphi$  为移相器引入相位,  $\delta$  为其他因素引入的附加相位。由(3)式可以求出激光频率不稳定引起的相位误差  $\Delta\theta$ 。

### 3.4 激光功率不稳定

激光器输出功率与干涉光背景强度  $I_0$  对应,功率的变化会导致背景光强的变化,最终导致移相算法计算结果不准。激光功率的变化也可看做一个满

足均匀分布的随机过程,对于菲佐型波长移相干涉仪,假设两束干涉光的功率变化率是相同的,可表示为<sup>[17]</sup>

$$I_1(j) = I_1[1 + \epsilon_p \cdot \text{rand}(j)], \quad (16)$$

$$I_2(j) = I_2[1 + \epsilon_p \cdot \text{rand}(j)], \quad (17)$$

式中  $\epsilon_p$  表示激光器功率稳定度。因此,仅考虑激光输出功率变化影响时干涉条纹相对强度可表示为

$$I' = I_0[1 + \epsilon_p \cdot \text{rand}(j)][1 + \gamma \cos(\theta + \varphi + \delta)], \quad (18)$$

由(3)式可以求出激光功率变化引起的相位误差  $\Delta\theta$ 。

### 3.5 CCD 噪声

移相干涉检测过程中,CCD 噪声会使干涉信号的相对强度发生波动,导致其采集到的干涉强度值与实际值之间存在偏差而导致测量结果不准。CCD 噪声也是随机的,主要包括暗电流和读出噪声等,可用动态范围  $A_D$  等效表征<sup>[18]</sup>:

$$A_D = \frac{n_w - n_d}{\sigma_r}, \quad (19)$$

式中  $n_w$  为满阱电荷,表示 CCD 探测最大信号能力; $n_d$  为暗电流电子数; $\sigma_r$  为读出噪声电子数,表示 CCD 探测最小信号能力。若只考虑 CCD 噪声的影响,可采用与激光功率不稳定性相同的数学模型进行分析。因此,可用一个满足均匀分布的随机函数描述 CCD 噪声,此时干涉条纹强度可表示为<sup>[19-21]</sup>

$$I' = I_0[1 + \epsilon \cdot \text{rand}(j)][1 + \gamma \cos(\theta + \varphi + \delta)], \quad (20)$$

式中  $\epsilon$  表示 CCD 相机的响应非线性度。结合(3)式可求出 CCD 噪声引入的相位误差。

根据上述误差模型,可获得以上几种随机误差

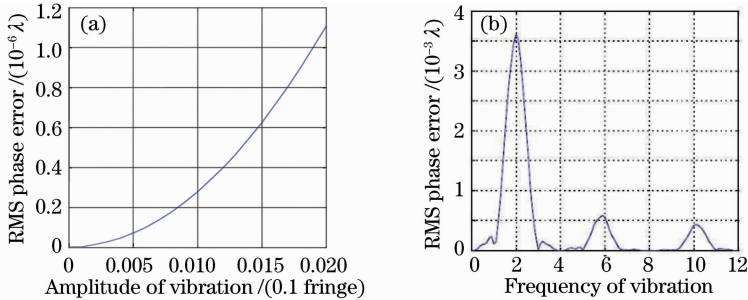


图2 相位误差 RMS 值随振动振幅和振动频率的变化。(a) 相位误差 RMS 值随振动振幅的变化;  
(b) 相位误差 RMS 值随振动频率的变化

Fig. 2 RMS phase error varies with vibration amplitude and vibration frequency. (a) RMS phase error varies with vibration amplitude; (b) RMS phase error varies with vibration frequency

图3为基于蒙特卡罗方法对仿真结果进行统计获得的激光频率不稳定性与干涉仪测量 RMS 值重复性的关系。图3(a)为不同干涉腔长条件下激光

单独作用时导致的相位误差  $\Delta\theta$ ,从而推导出这些随机误差引起的面形测量均方根误差<sup>[6]</sup>:

$$E = \left[ \frac{1}{K} \frac{1}{M} \sum_{k=0}^{K-1} \sum_{m=0}^{M-1} \left( \Delta\theta_{m,k} - \frac{1}{M} \sum_{m=0}^{M-1} \Delta\theta_{m,k} \right)^2 \right]^{1/2}, \quad (21)$$

式中  $K, M$  为空间采样点数(样本数)。

## 4 模拟仿真及讨论

将干涉仪测量 RMS 值重复性描述如下:重复测量 100 次,每次测量取 16 次相位平均,共得到 100 个测量面形 RMS 值,以此作为样本计算的 2 倍标准差( $2\sigma$ )作为 RMS 重复性指标。模拟仿真时几个重要的参数分别为:可调谐半导体激光器初始波长为 632.99 nm;被测平面和参考平面的反射率均为 4%;干涉腔长度  $h$  分别取 1 m 和 0.2 m;基于 Zygo13 步移相算法<sup>[18]</sup>进行计算;仅对各种随机误差单独作用时进行分析。

首先分析振动对面形测量精度的影响,如图2所示。图2(a)为振动频率等于 CCD 采样频率时,振幅与相位误差 RMS 之间的关系。从图中可以看出:振动频率一定,振幅越大相位误差 RMS 值越大,对干涉仪测量重复性的影响越大。图2(b)为振动振幅为  $0.01\lambda$  时,振动频率与相位误差 RMS 之间的关系。从图中可以看出:当归一化频率为 2、6 和 10 时振动对测量结果影响较大,尤其是归一化频率为 2 时影响最大,RMS 误差达到  $3.5 \times 10^{-3} \lambda$ ;其他频率范围振动引入的相位误差 RMS 值较小。因此,要实现高精度干涉测量,需要采取减振措施,对环境进行严格控制。

频率不稳定性与测量 RMS 重复性之间的关系,可以看出:干涉腔长  $h$  固定,激光频率不稳定性值越小,获得的 RMS 重复性值越小,表明干涉仪主机越

稳定。当激光频率不稳定度值固定,干涉腔长  $h$  越长获得的 RMS 重复性值越大,表明干涉仪主机越不稳定。当频率不稳定度值为  $1.0 \times 10^{-8} \text{ s}^{-1}$ ,干涉腔长  $h = 1 \text{ m}$  时, RMS 重复性为  $7.9 \times 10^{-4} \lambda$ ;  $h = 0.2 \text{ m}$  时, RMS 重复性为  $1.58 \times 10^{-4} \lambda$ 。图 3 (b) 为激光器输出功率不稳定性与测量 RMS 重复性之间的关系。从图中可以看出,激光功率稳定度

值越小, RMS 重复性值越小,干涉仪越稳定。此外,激光功率不稳定度对测量结果的影响与干涉腔长大小无关。当激光器功率不稳定度为 0.5% 时,干涉仪 RMS 重复性为  $3.36 \times 10^{-5} \lambda$ 。从上述结果可以看出,在满足检测要求的情况下,选择较短的干涉腔长可保证检测结果更准确,干涉仪主机更稳定。

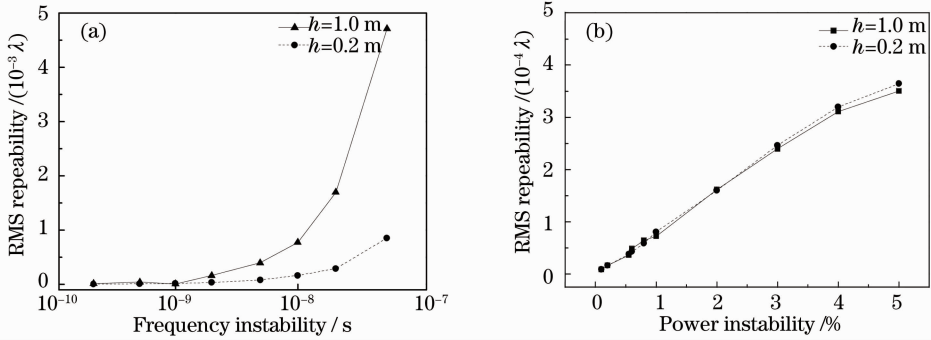


图 3 光源不稳定与 RMS 重复性的关系。(a) 频率不稳定度与 RMS 重复性的关系;  
(b) 功率不稳定度与 RMS 重复性的关系

Fig. 3 RMS repeatability varies with the light source instability. (a) RMS repeatability varies with frequency instability;  
(b) RMS repeatability varies with power instability

图 4 为基于蒙特卡罗方法获得的 CCD 动态范围与干涉仪测量 RMS 重复性之间的关系。从图中可以看出,CCD 动态范围的值越大, RMS 重复性的值越小,干涉仪主机工作越稳定。当 CCD 动态范围为 65 dB 时, RMS 重复性为  $9.7 \times 10^{-6} \lambda$ 。

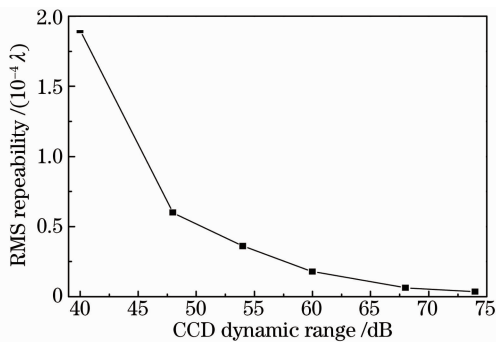


图 4 CCD 动态范围与干涉仪 RMS 重复性的关系

Fig. 4 RMS repeatability varies with CCD dynamic range

若不考虑环境因素的影响,干涉仪的重复性主要取决于选用器件的性能,激光器和 CCD 相机是最关键的两个。根据上述误差模型可以对激光器和 CCD 相机引入的随机误差进行分配,从而选出满足设计要求的激光器和 CCD 相机。本实验研制的干涉仪设计指标要求其测量 RMS 重复性达到  $\lambda/10000$ ,这里按照等作用原则进行误差分配。对激光器而言,干涉腔长  $h = 1.0 \text{ m}$  时,激光频率不稳定性的值需小于  $1.5 \times 10^{-9} \text{ s}^{-1}$ ,功率不稳定性的值小

于 1.31%,可确保 RMS 重复性不超过  $\lambda/10000$ ;当干涉腔长  $h = 0.2 \text{ m}$ ,激光频率不稳定性的值需小于  $6.12 \times 10^{-9} \text{ s}^{-1}$ ,功率不稳定性的值需小于 1.30%;对于 CCD 相机而言,当 CCD 动态范围的值大于 45.7 dB 时,可确保 RMS 重复性不超过  $\lambda/10000$ 。

根据上述分析结果,该实验选用了堡盟电子 (BAUMER) 生产的型号为 SXC10 的 CCD 相机,其动态范围为 64 dB,导致的 RMS 重复性为  $0.118\lambda/10000$ 。为实现波长移相,选用了 New Focus 公司生产的型号为 TLB-7004-P 的可调谐半导体激光器,其频率稳定性为  $0.133 \times 10^{-6} \text{ h}^{-1}$ ,短时间范围内(如 1 s)的稳定性在  $10^{-7}$  量级,导致干涉仪测量 RMS 重复性超出了设计指标;单独设计稳频系统对其进行稳频处理可使频率稳定性达到  $\pm 5.04 \times 10^{-9} \text{ s}^{-1}$ ,引入的 RMS 重复性为  $0.847\lambda/10000$ 。实验发现,当调谐范围较大时该激光器输出功率相对波动可达到 5%,导致干涉仪测量 RMS 重复性超过设计指标;单独设计功率补偿系统对其进行处理,可使输出功率稳定性提高到  $\pm 0.2\%$ ,引入的 RMS 重复性为  $0.172\lambda/10000$ 。暂不考虑环境因素的影响,本实验中激光器和 CCD 相机产生的随机误差分配结果如表 1 所示,综合各项误差的作用可获得这些误差合成后的标准差为  $0.8723\lambda/10000$ ,满足干涉仪系统的设计指标。通过以上步骤完成了激光器和

CCD 相机的选型。

表 1 随机误差分配

Table 1 Random error distribution

Error source	Power instability	Frequency instability	CCD dynamic range
Value	$\pm 0.2\%$	$\pm 5.04 \times 10^{-9} \text{ s}^{-1}$	64 dB
RMS repeatability	$0.172 \lambda / 10000$	$0.847 \lambda / 10000$	$0.118 \lambda / 10000$

## 5 测量实验与结果分析

根据图 1 所示的原理图,搭建了口径为 100 mm 的波长移相干涉仪实验装置,基于该实验平台开展检测实验获得的零条纹状态下的干涉图如图 5(a)

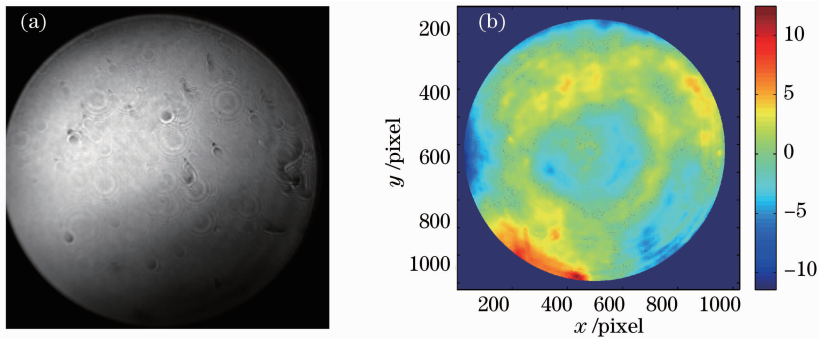


图 5 干涉图与面形图。(a) 实际干涉图; (b) 移相算法处理结果

Fig. 5 Interferogram and result of phase-shifting algorithm. (a) Real interferogram; (b) result of phase-shifting algorithm

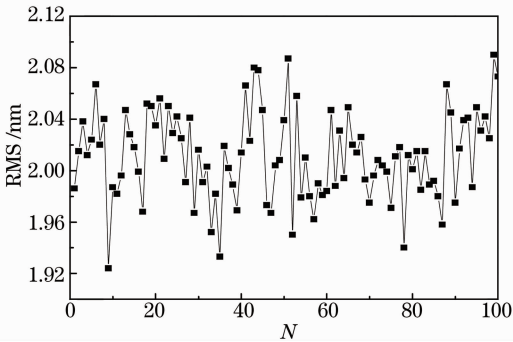


图 6 100 次测量结果曲线

Fig. 6 Result curve for 100 times

## 6 结 论

结合自主研发的非佐型波长移相干涉仪设计指标研究了干涉仪系统中影响其测量 RMS 重复性的主要随机误差因素。采用直接计算法研究了振动、空气扰动和空气温度变化等环境误差对干涉仪测量结果的影响规律;利用蒙特卡罗法思想仿真分析了激光频率不稳定、激光功率不稳定和 CCD 噪声等仪器误差对干涉仪测量 RMS 重复性的影响,基于仿真结果完成了激光器和 CCD 相机的选型和误差分

所示,通过 Zygo13 步移相算法处理后获得了如图 5 (b)所示的面形图。为了研究所搭建的波长移相干涉仪实验装置的重复性,在相同的测量条件下对一平面元件进行了多次测量:每次测量取 16 次相位平均,重复测量 100 次,获得了 100 个测量面形 RMS 值,如图 6 所示。经过计算,100 次测量结果的标准差  $\sigma$  为 0.035 nm,则该干涉仪的 RMS 重复性  $2\sigma$  为 0.07 nm。实验结果表明,该波长移相干涉仪实验装置的 RMS 重复性基本达到设计要求。如果对振动、环境温度等误差因素进行严格控制,可进一步提高该干涉仪实验装置的重复性。

配。仿真结果表明,要使干涉仪测量 RMS 重复性达到  $\lambda / 10000$ ,对干涉仪工作环境的控制和其使用的关键器件都有严格的要求。最后,基于购买的激光器和 CCD 相机搭建了一台口径为 100 mm 的波长移相干涉仪实验平台,实验分析表明其测量 RMS 重复性为 0.07 nm。为了提高该波长移相干涉仪的检测精度,需要进一步对该干涉仪实验装置进行标定处理,同时加强实验环境的建设。

## 参 考 文 献

- 1 A Davies, C Tarrío, C Evans. Advanced optics characterization [J]. Optics and Photonics News, 2001, 12(2): 34–37.
- 2 J H Bruning, D R Herriott, J E Gallagher, *et al.*. Digital wavefront measuring interferometer for testing optical surfaces and lenses[J]. Appl Opt, 1974, 13(11): 2693–2703.
- 3 L L Deck, J A Soobitsky. Phase-shifting via wavelength tuning in very large aperture interferometers [C]. SPIE, 1999, 3782: 432–442.
- 4 M Bigelow, N Harned. Taking optical precision to the extreme [C]. OE Magazine, 2004. 10.1117/2.5200411.0009.
- 5 J Schwider, R Burow, K E Elssner, *et al.*. Digital wave-front measuring interferometry: some systematic error sources [J]. Appl Opt, 1983, 22(21): 3421–3432.
- 6 P J Groot, L L Deck. Numerical simulations of vibration in phase-shifting interferometry [J]. Appl Opt, 1996, 35 (13):

- 2172—2178.
- 7 Yu Yingjie, Sun Liuxing. Determination of parameters in weighting multi-step phase-shifting algorithm via wavelength tuning[J]. *J Astronautic Metrology and Measurement*, 2003, 23(6): 1—8.  
于瀛洁, 孙流星. 加权多步长移相算法参数确定方法[J]. *宇航计测技术*, 2003, 23(6): 1—8.
- 8 P Groot. Derivation of algorithms for phase-shifting interferometry using the concept of a data-sampling window[J]. *Appl Opt*, 1995, 34(22): 4723—4730.
- 9 P J Groot. Vibration in phase-shifting interferometry[J]. *J Opt Soc Am A*, 1995, 12(2): 354—365.
- 10 Wang Rudong, Tian Wei, Wang Ping, *et al.*. Analysis of vibration effect to surface figure measurement[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(11): 1112001.  
王汝冬, 田 伟, 王 平, 等. 振动对面形测量误差的影响分析[J]. *光学学报*, 2012, 32(11): 1112001.
- 11 A E Rosenbluth, N Bobroff. Optical sources of nonlinearity in heterodyne interferometers[J]. *Precision Eng*, 1990, 12(1): 7—11.
- 12 B Edlén. The refractive index of air[J]. *Metrologia*, 1966, 2(2): 71—80.
- 13 Miao Erlong, Gu Yongqiang. Temperature influence on Fizeau interferometer repeatability[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(12): 1212008.  
苗二龙, 谷勇强. 温度对 Fizeau 干涉仪测量重复性的影响[J]. *光学学报*, 2011, 31(12): 1212008.
- 14 Miao Erlong, Zhang Jian, Gu Yongqiang, *et al.*. Measurement error analysis of high precision Fizeau interferometer for lithography projection objective[J]. *Chinese J Lasers*, 2010, 37(8): 2029—2034.  
苗二龙, 张 健, 谷永强, 等. 用于光刻投影物镜检测的高精度菲佐干涉仪误差分析[J]. *中国激光*, 2010, 37(8): 2029—2034.
- 15 P Sandoz, T Gharbi, G Tribillon. Phase-shifting methods for interferometers using laser-diode frequency-modulation[J]. *Opt Commun*, 1996, 132(3): 227—231.
- 16 M Bom, E Wolf. *Principles of Optics*[M]. Oxford: Pergamon Press, 1980.
- 17 P Hariharan. Phase-stepping interferometry with laser diodes: effect of changes in laser power with output wavelength[J]. *Appl Opt*, 1989, 28(1): 27—28.
- 18 Wang Qingyou, Sun Xuezhong. *CCD Applied Technology*[M]. Beijing: Publishing House of Tianjin University, 1995. 30—47.  
王庆有, 孙学株. *CCD 应用技术*[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1995. 30—47.
- 19 Meng Xiaochen, Hao Qun, Zhu Qiudong, *et al.*. Influence of CCD pixels on the phase measurement accuracy in phase-shifting interferometry [J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2011, 31(9): 1071—1074.  
孟晓辰, 郝 群, 朱秋东, 等. CCD 像元尺寸对移相干涉术相位测量精度的影响[J]. *北京理工大学学报*, 2011, 31(9): 1071—1074.
- 20 Wang Ping, Wang Rudong, Tian Wei, *et al.*. Design and analysis of thermal stability for main frame in Fizeau interferometer[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(9): 2100—2107.  
王 平, 王汝冬, 田 伟, 等. Fizeau 干涉仪主机的热稳定性设计与分析[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(9): 2100—2107.
- 21 V J Cadarso, S Chosson, K Sidler, *et al.*. High-resolution 1D moires as counterfeit security features [J]. *Light: Science & Applications*, 2013, 2(7): e86.

栏目编辑:何卓铭