

基于振频逆解算的高抗振移相干涉仪系统设计

胡俞喆

上海星庆光学仪器有限公司, 上海

收稿日期: 2024年6月9日; 录用日期: 2024年6月29日; 发布日期: 2024年7月11日

摘要

本文设计并研制了一款具有高抗振性功能的移相式激光面型干涉仪系统。该系统通过快速获取连续非线性移相后获取样件干涉图组, 并对其进行振频逆解算分析, 自动判断干涉条纹图受振动干扰情况, 筛选出受振动干扰相对较小的高质量干涉图组, 可得到高抗振的稳定测量结果, 从而实现激光移相干涉仪系统的抗振能力增强, 极大改善干涉仪测量准确度与效率。

关键词

移相干涉仪, 振频逆解算, 高抗振

Design of High Vibration Resistance Phase-Shifting Interferometer System Based on Inverse Vibration Frequency Solution

Yuzhe Hu

Shanghai Xingqing Optical Instrument Co., LTD, Shanghai

Received: Jun. 9th, 2024; accepted: Jun. 29th, 2024; published: Jul. 11th, 2024

Abstract

A phase shifting laser surface interferometer with high vibration resistance is designed and developed in this paper. After the rapid continuous nonlinear phase shifting of the phase-shifting laser interferometer, the sampling interferogram group is obtained, and the vibration frequency inverse solution analysis is carried out on it. The interference of the interference fringe pattern is automatically judged, and the high-quality interferogram group with relatively small vibration interference is screened out, and the stable measurement results with high vibration resistance can be obtained, so as to enhance the anti-vibration ability of the laser phase-shifting interferometer

system and greatly improve interferometer measurement accuracy and efficiency.

Keywords

Phase-Shifting Interferometer, Vibration Frequency Inverse Solution, High Vibration Resistance

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

移相干涉技术(Phase Shifting Interferometry, PSI)相比传统波面测量技术具有分辨率高、测量精度高等优势,在光学元器件面形检测以及光学系统成像质量评价等领域被广泛应用[1] [2]。但在实际使用过程中,受干涉仪光学元件质量、激光光源的稳定性、移相器的非线性移相、传感器噪声及环境振动等因素影响,PSI 的高测量精度性能无法得到充分发挥[3],其中,振动因素是导致干涉仪产生测量误差的主要来源之一[4]。如何有效提升移相式激光干涉仪的抗振性能,是当前光学测量技术研究中重点关注方向,研究并开发具有抗振功能的移相干涉仪系统,对光学测量领域技术发展具有重要的现实意义。

目前,国内外学者主要通过改进干涉仪硬件结构和采用后期软件算法处理两类方法用于改善环境振动对移相干涉测量精度的影响[5] [6],其中,采用抗振算法处理因其无需对传统干涉仪系统进行硬件改动,可有效降低成本[7]。

本文设计研制了一套抗振动激光移相干涉仪系统,该系统采用非线性移相干涉抗振算法,通过对一组预设好的非线性移相干涉图像的数据进行分析处理,极大增强了移相干涉系统的抗振性能,对实际应用具有重要意义。

2. 系统设计

本文提出的抗振型干涉仪系统主要由光源分系统、光机分系统、信号采集与筛选分系统、数据分析处理分系统组成,如图1所示。



Figure 1. The configuration of phase-shifting interferometer

图1. 移相干涉系统组成

系统工作原理如图2所示,光源产生稳定窄线宽激光,并可根据反馈自适应调节光强。激光进入光机系统后生成了带有被测件面型信息的干涉条纹。在测量开始时,信号处理与筛选模块先输出一组预设的驱动电压,驱动光机系统内的移相器完成移相,并同步采集一组移相干涉图组。分析每张干涉图的综合相位,拟合相移曲线并与设计曲线进行对比。若对称度误差超过阈值,则调整曲线参数,重新移相采集。若对称度未超过阈值,则传输计算得到的相位数据至数据分析与处理系统进行解包分析。

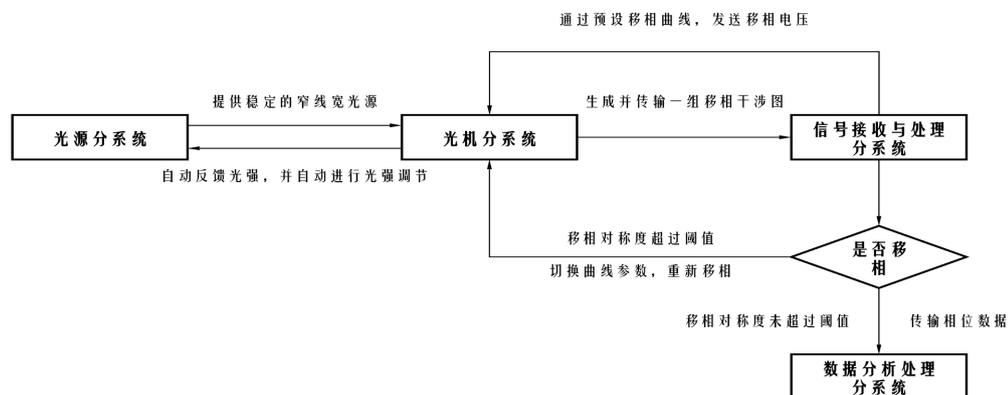


Figure 2. The working principle of phase-shifting interferometer
图 2. 系统工作原理

2.1. 光源分系统和光机分系统设计

光源分系统包括稳定的窄线宽光源及光强控制器。光机分系统由空间滤波器、分光棱镜(PBS)、1/4波片、准直镜、标准镜、中继镜等光学零件及经过模态分析的抗振动光学支架系统、光学调整架、压电移相器(PZT)等组成。

系统光源及光路设计如图 3 所示。光源分系统发出窄线宽激光，经过光机分系统形成相位扫描的一组干涉条纹，通过分析条纹图组进而获取光学元件表面的形貌信息。窄线宽光源通常使用稳频氦氖激光器或者 DFB 半导体激光器。激光器线宽越窄，相干长度越长，相干系统稳定产生高对比度的干涉条纹的距离越长，测量范围越广。由于干涉测量不同的应用场景，参考光和被测光能量存在变化，但 CCD 相机的动态范围有限，因此很可能出现过曝的情况，过曝会导致有效数据的损失。因此为了尽可能保证干涉图像对比度的灰度范围控制在 15~245 的理想范围内，系统采用光强负反馈，即通过分析采集的图像，改变光强控制器内渐变滤光片的旋转角度，从而改变系统整体光强，以满足最优对比度范围的要求。

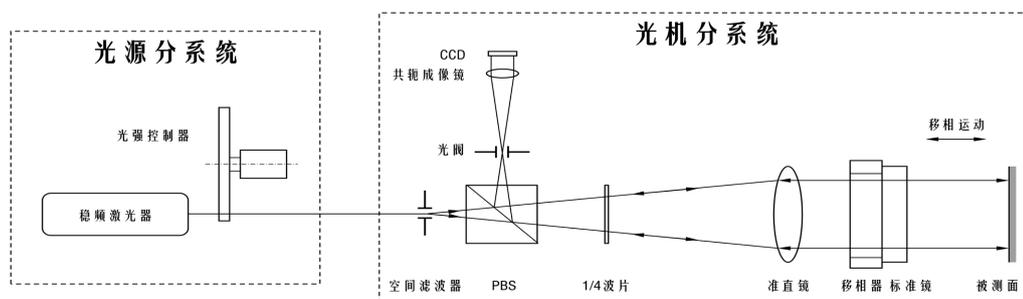


Figure 3. The light source and optical path of phase-shifting interferometer
图 3. 移相干涉仪光源及光路设计

2.2. 信号接收与筛选分系统设计

信号接收与筛选分系统负责干涉条纹的移相驱动和数字采集工作，其工作原理如图 4 所示。由于环境振动对干涉测量的影响大多集中在时间累积上，所以越高的移相速度可以越好地规避环境振动的影响，这就要求高速驱动移相器并能同步高速采集信号。本系统通过高速 USB3.0 总线配合数字 CCD 自带时间戳和高速 DA 卡同步互锁触发驱动和采集信号，时间延迟控制在 5 ms 量级。在 200 fps 的采样速率下，可实现 0.1 s 移相，即 20 帧移相图中可能会随机丢失首帧或者尾帧。但是由于定义的对称移相曲线权重

集中在靠近对称轴最近的 10~14 帧，所以首尾帧的丢失对计算精度基本没有影响。

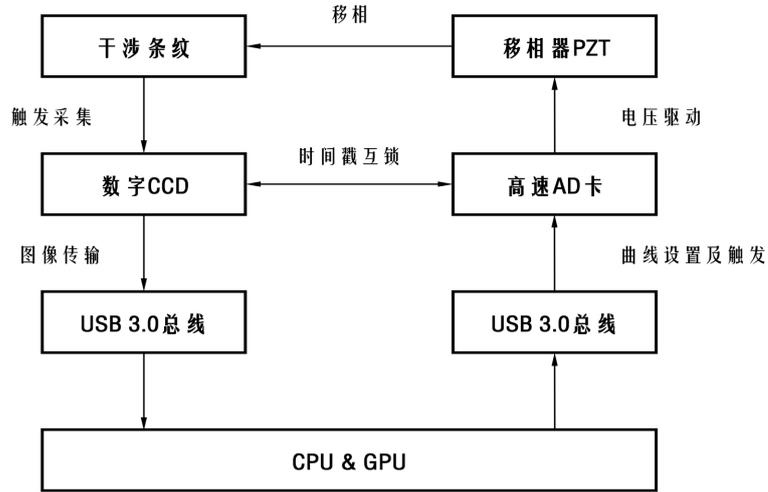


Figure 4. The working principle of signal receiving and screening sub-system
图 4. 信号接收与筛选分系统工作原理

2.3. 数据分析与处理分系统设计

2.3.1. 移相干涉抗振算法设计

移相干涉仪基于光的干涉原理进行工作，当单色光经过干涉仪主体时，会形成明暗相间的干涉条纹。通过移相装置改变相位差，可以观察到干涉条纹的移动情况。根据条纹的移动规律，可以计算出光学元件表面的形貌信息。

如图 2 所示，经标准镜反射的光束与经被测面反射的光束在光阑处相叠加，其干涉光强分布如下式所示：

$$I(x, y) = I_a(x, y)(1 + A \cos(\Phi(x, y))) \quad (1)$$

式中， $I_a(x, y)$ 和 A 分别表示平均光能量分布于干涉调制系数。相位差分布 $\Phi(x, y)$ 表示被测面与参考面之间的相对光程差，被测面不动时，该相位差对于确定的位置为常数。

在测量过程中，在两束光束之间引入变化的光程差 σ 后，干涉光强分布由下式表示：

$$I(x, y) = I_a(x, y)(1 + A \cos(\Phi(x, y) + \sigma)) \quad (2)$$

展开式(2)可得，

$$\begin{cases} I(x, y) = a_0 + a_1 \cos \sigma + a_2 \sin \sigma \\ a_0 = I_a(x, y) \\ a_1 = I_a(x, y) A \cos(\Phi(x, y)) \\ a_2 = -I_a(x, y) A \sin(\Phi(x, y)) \end{cases} \quad (3)$$

同时可得，

$$\begin{cases} \tan \tan(\Phi) = -\frac{a_2}{a_1} \\ A = \frac{\sqrt{a_2^2 + a_1^2}}{a_0} \end{cases} \quad (4)$$

由以上各式可知,当光程差 σ 已知时,要获得干涉光强分布,需要求解 3 个未知数,因此最少检测三次即可获得被测面面形。通常采取四步移相法,即移相值分别为 0 、 $\pi/2$ 、 π 和 $3\pi/2$,可得,

$$\begin{cases} \tan \tan(\Phi) = -\frac{a_2}{a_1} \\ A = \frac{\sqrt{a_2^2 + a_1^2}}{a_0} \end{cases} \quad (5)$$

四步移相法建立在移相稳定可靠地分布在四个固定相位基础上。环境振动将导致移相过程中引入相位不确定度 $\Delta\Phi$,四步移相法或线性移相无法解算该相位不确定度,从而引起整体相位错位,造成解相失败。

本系统为了能快速分离出振动引起的载波,并尽可能的不损失精度,在移相器上加载一预设参数的非线性移相电压,产生非线性的光程相位变化,此时很容易得到一组具有对称性分布并且易于解算的连续相位图(约 20 帧)。按照对称性分析,选取相位曲线中的 10~14 帧图像进行相位拟合,利用该非线性判据,可以高速且有效的判断振动对当前测量的影响程度,并且对相位不确定度 $\Delta\Phi$ 的允差可以达到 20% 以上。该技术称为 VICT 技术(Vibration Immunity at Crest and Trough),打破了传统移相曲线对振动干扰只能进行频域分析或者平均化操作的固有思维,通过“设计一条曲线,满足一个方程”的纯数学方法,真正的把振动信息从复杂的干涉相位图中分解出来。

2.3.2. 数据分析处理分系统工作原理

数据分析处理分系统工作原理如图 5 所示。首先获取一组干涉图像数据信息(通过压电陶瓷移相器和 CCD 获取不同移相时刻的干涉图像数据信息),计算图像组综合相位,将计算出的相位及顺序与设计移相曲线进行对比,判断干涉图像是否符合对称度阈值等质量要求。如满足质量要求,通过相位公式计算相位并输出。如不满足质量要求,进一步判断振动检测分析次数是否超过设定次数(20 次)。若是,则报错提示环境不可靠,无法进行相位计算。否则,返回获取干涉图像数据信息的步骤,直至得出可靠相位信息。

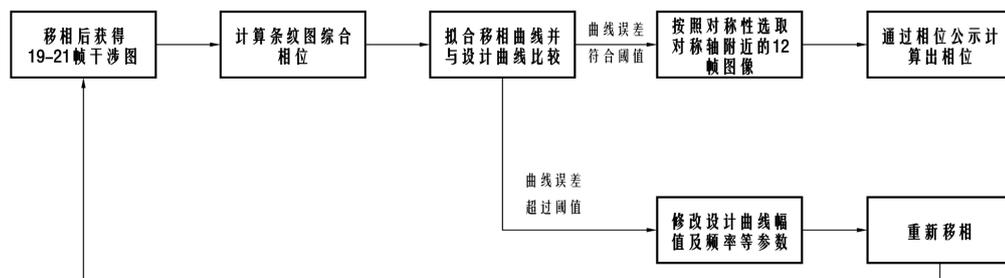


Figure 5. The working principle of data analysis and processing subsystem

图 5. 数据分析处理分系统工作原理

3. 系统抗振性能测试

高抗振移相干涉仪装置实物如图 6 所示,可对直径 ≤ 600 mm 的工件进行测量,达到 30 nm 绝对精度及 1 nm 重复精度,测量时间仅需 1 s,即可实现表面形貌的 3D 成像。

通过在不使用隔振光学平台的条件下,对仪器抗振性能进行测试。使用不同测量模式时,测试结果如图 7 所示。不启用抗振模式时,剧烈振动条件下,振纹明显,干涉条纹几乎不可见。而启用抗振模式后,振纹得到改善后基本消失,测量结果得到极大改善。

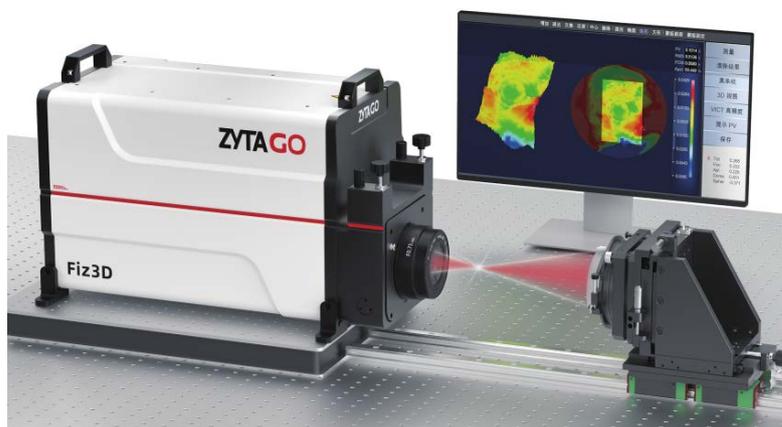


Figure 6. The diagram of high vibration resistance phase-shifting interferometer device
图 6. 高抗振移相干涉仪装置实物图

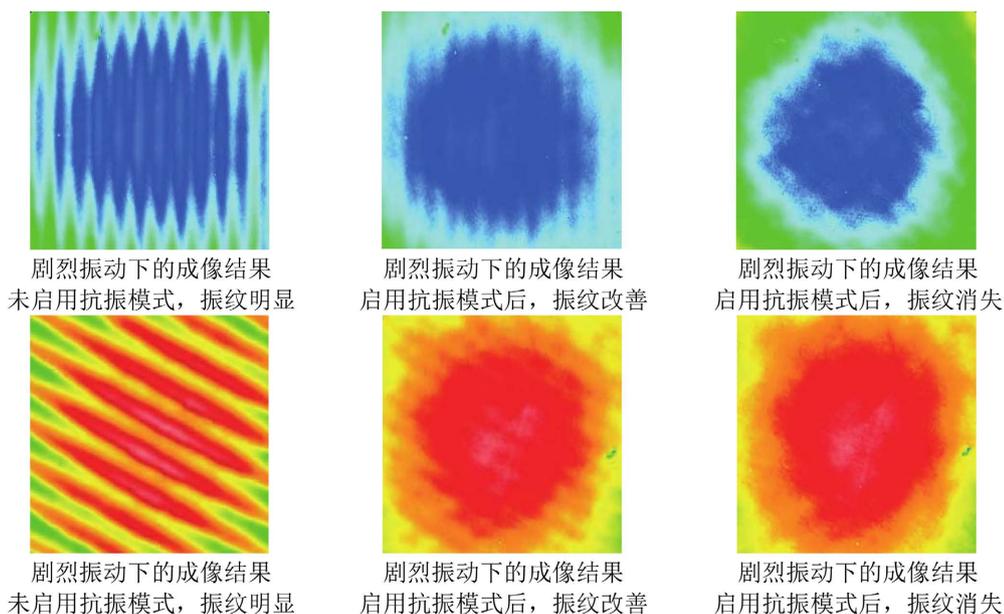


Figure 7. The improved effect of vibration pattern after enabling seismic mode
图 7. 启用抗震模式后振纹改善效果



第 1 次测量结果：
PV/RMS 值：0.1970 λ / 0.0350 λ

第 2 次测量结果：
PV/RMS 值：0.1915 λ / 0.0352 λ



第 3 次测量结果：
PV/RMS 值：0.1932 λ / 0.0353 λ

第 4 次测量结果：
PV/RMS 值：0.1937 λ / 0.0350 λ

Figure 8. Test results after repeated measurements
图 8. 多次重复测量后测试结果

通过对同一工件进行 4 次重复测量，进一步检验系统抗振效果稳定性，测试结果如图 8 所示，测试结果显示，重复性很高，可达 $\lambda/200$ 。

在抗振模式下，对一片直径 250 mm 的平晶进行 1000 次连续测量，测量结果如图 9 所示，PV 值的重复精度为 5.7 nm ($\lambda/111$)，RMS 值的重复精度为 0.38 nm ($\lambda/1666$)，仪器测试稳定性极高，表现出很强的抗振性能。

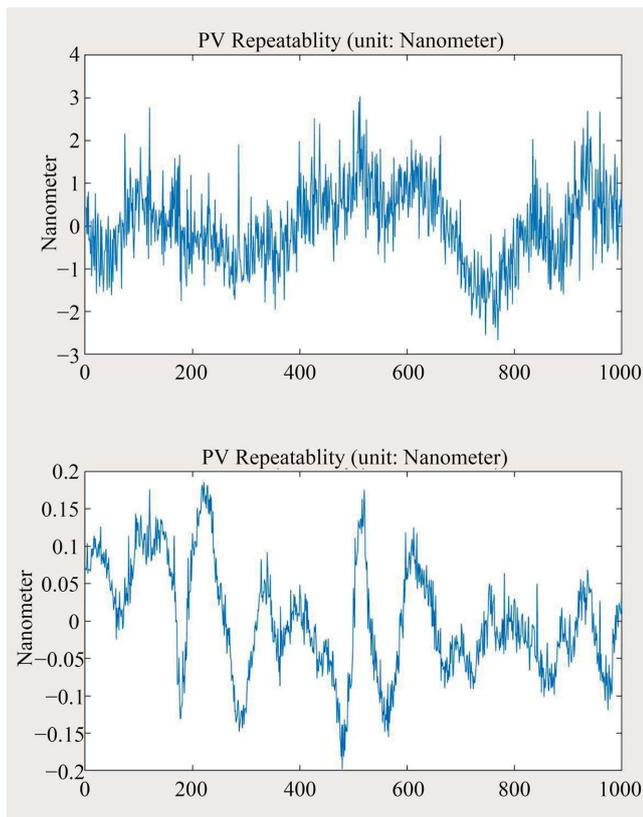


Figure 9. The test results of 1000 continuous measurements of $\Phi 250$ mm flat crystal
图 9. 对 $\Phi 250$ mm 平晶进行 1000 次连续测量的结果

4. 结论

应用移相干涉仪对光学器件面形进行检测的过程中,环境振动的影响是最大的误差来源,严重影响测量的准确性和效率。环境振动将在移相过程中引入相位不确定度,而传统的线性移相无法对该相位不确定度进行解算,对检测环境的要求较高,难以在恶劣的振动环境中实现检测。而采用非线性移相技术,预设非线性相移曲线,对检测过程中的干涉图进行相位计算和拟合,并将其与设计曲线进行比对,从而对测试过程进行监测,形成反馈,极大改善环境振动对测量过程带来的影响。基于该方法研制的移相干涉仪,可实现剧烈振动环境中的准确检测,重复检测精度可达 $\lambda/1666$ (RMS),表现出极高的抗振性。

参考文献

- [1] 刘斌,王孝坤,程强,刘忠凯,李凌众,蔡梦雪,张洛嘉,李文涵,王金成,张学军. 复杂曲面光学元件高精度面形检测技术概述[J]. 南通大学学报(自然科学版), 2024(1): 1-27.
- [2] 赵锦春. 激光测振在振动计量中的发展概况及作用[J]. 计量与测试技术, 2011, 38(6): 11-13+15.
- [3] 郭乾统,李博. 基于光刻机全球产业发展状况分析我国光刻机突破路径[J]. 集成电路应用, 2021, 38(9): 1-3.
- [4] 谈宜东,徐欣,张书练. 激光干涉精密测量与应用[J]. 中国激光, 2021, 48(15): 222-243.
- [5] 翟天保. 基于干涉图像质量分析的激光干涉仪抗振技术研究[D]: [硕士学位论文]. 上海: 东华大学, 2020.
- [6] 王婷,赵云,孙文卿,等. 移相干涉仪的改进方法与实现[J]. 物理实验, 2017, 37(10): 53-57.
- [7] 杨宏兴,付海金,胡鹏程,杨睿韬,邢旭,于亮,常笛,谭久彬. 超精密高速激光干涉位移测量技术与仪器[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(9): 295-309.