

激光与光电子学进展

移相干涉测量中的抗振技术综述

张力伟, 陈浩博, 孙文卿*, 王军, 吴泉英

苏州科技大学物理科学与技术学院江苏省微纳热流技术与能源应用重点实验室, 江苏 苏州 215009

摘要 移相干涉术是一种高灵敏度的非接触式光学测量方法。该方法在光学表面测量、形变测量等许多方面被广泛应用。然而环境振动对该方法的测量结果可能产生不可忽视的影响,包括造成条纹抖动、干涉图模糊等现象。为了解决这个问题,提高移相干涉测量结果的稳定性,干涉测量中的抗振技术应运而生。本文将抗振技术分为主动与被动两大类,主动抗振旨在隔振,即削弱传播至干涉系统的振动信号强度;被动抗振旨在消振,即消除振动对干涉测量造成的影响。被动抗振技术种类繁多,本文从帧数和实时性两个方面出发,将已有的被动移相干涉抗振技术进行分类介绍并对比,并对移相干涉测量抗振技术的发展方向进行了阐述。

关键词 光学测量; 移相干涉; 时域移相; 空域移相; 单帧干涉; 抗振

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP221473

Review of Anti-Vibration Technology in Phase-Shifting Interferometry

Zhang Liwei, Chen Haobo, Sun Wenqing*, Wang Jun, Wu Quanying

Jiangsu Key Laboratory of Micro and Nano Heat Fluid Flow Technology and Energy Application, School of Physical Science and Technology, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, Jiangsu, China

Abstract Phase-shifting interferometry is a noncontact optical measurement method with high sensitivity. This method is widely used in optical surface and deformation measurements. However, environmental vibrations can have a significant influence on the obtained measurement results, producing fringe jitter and interference pattern ambiguity. To address these issues and improve the stability of phase-shifting interferometry, the anti-vibration technique can be used. In this article, the anti-vibration technology is divided into active and passive categories. Active anti-vibration is used for vibration isolation, that is, weakening the intensity of the vibration signal transmitted to the interference system. Passive anti-vibration is used to eliminate the influence of vibration on interferometry. Several types of passive anti-vibration technologies have been developed so far. In this article, existing passive phase-shifting interference anti-vibration technologies are classified and compared with respect to the frame number and real-time performance. Furthermore, the development direction of phase-shifting interference measurement anti-vibration technology is discussed.

Key words optical measurement; phase-shifting interferometry; temporal phase shifting; spatial phase shifting; single frame interference; anti-vibration

1 引言

光学干涉测量技术以光的波长为量级单位,具有极高的精度与灵敏度。传统的光学干涉测量是通过人眼直接判读干涉条纹,经过手工计算获得结果。这种方式不仅效率低下,而且无法避免由人的主观因素引起的误差。1974年,Bruning等^[1]将通信理论中的同步相位探测技术引入光学干涉术中,提出了移相干涉

(PSI)技术。“移相”这一过程的引入,使光学干涉测量技术有了巨大的发展,之后 Yamaguchi 等^[2]又将其应用于数字全息技术中。现代移相干涉测量技术融入了机械、电子和计算机等学科的多种技术,被广泛使用在物体形貌测量^[3]、微纳形变检测^[4]、三维温度场测量^[5]等领域中。然而,移相干涉测量的高灵敏度使得其对于环境振动十分敏感,若不消除振动所带来的误差,测量结果的精确度将受到显著影响^[6],难以满足许多场

收稿日期: 2022-04-29; 修回日期: 2022-06-09; 录用日期: 2022-06-15; 网络首发日期: 2022-06-25

基金项目: 国家自然科学基金(61875145,11804243)、“十四五”江苏省重点学科资助项目(2021135)、苏州市科技计划前瞻应用研究项目(SYG202013)

通信作者: *sunwenqing@mail.usts.edu.cn

合下的波面检测要求,例如在生产光学元件的车间中干涉仪受环境影响显著,无法正常工作。本文将着重介绍移相干涉测量中的抗振方法。

2 抗振移相干涉技术的基本原理

移相干涉的基本原理为:通过改变两束相干光的光程差,引入相位差的变化,使干涉条纹发生移动,再通过 CCD 采集不同光程差下的条纹图,并使用特定的移相算法提取被测物件表面的相位包裹图。在理想的条件下,干涉场中每点的光强都可以表示为

$$I(x, y) = A(x, y) + B(x, y) \cos [\varphi(x, y) + \delta(x, y)], \quad (1)$$

式中: A 为干涉图的背景光强; B 为干涉图的调制度; φ 为两束光的相位差; δ 为移相量。然而,实际测试过程常常伴随着环境振动的干扰。研究表明,环境振动的能量主要集中在频率为 100 Hz 以下的低频部分,峰值在 30 Hz 附近^[7]。环境振动的振幅与频率成反比,频率大于 100 Hz 的振动振幅一般很小,高频振动在环境振

动中占比较小。此外,高频振动仅会使干涉图像略微模糊,即条纹边缘出现毛刺,对相位信息影响较小,可以通过算法处理解决。然而,低频的大幅度振动不仅会使干涉图模糊,而且会降低干涉图的对比度。此时,移相器产生的移相叠加振动引起的移相,使整个移相过程的精度无法保证,将显著影响相位信息的计算。受振动影响的干涉图可以表示为

$$I(x, y) = A(x, y) + B(x, y) \cos [\varphi(x, y) + \delta(x, y) + p(x, y)], \quad (2)$$

式中, p 为环境振动导致的移相误差或相位倾斜。因此,抗振移相方法的研究,主要针对幅频积在 100 waves·Hz 以下的振动开展。

3 移相干涉测量的抗振技术

按照抗振方式不同可将移相干涉测量中的抗振方法分为主动与被动两大类,其中被动抗振包含的方法种类较多,又可分为时域移相、单帧处理与空域移相三类,如图 1 所示。

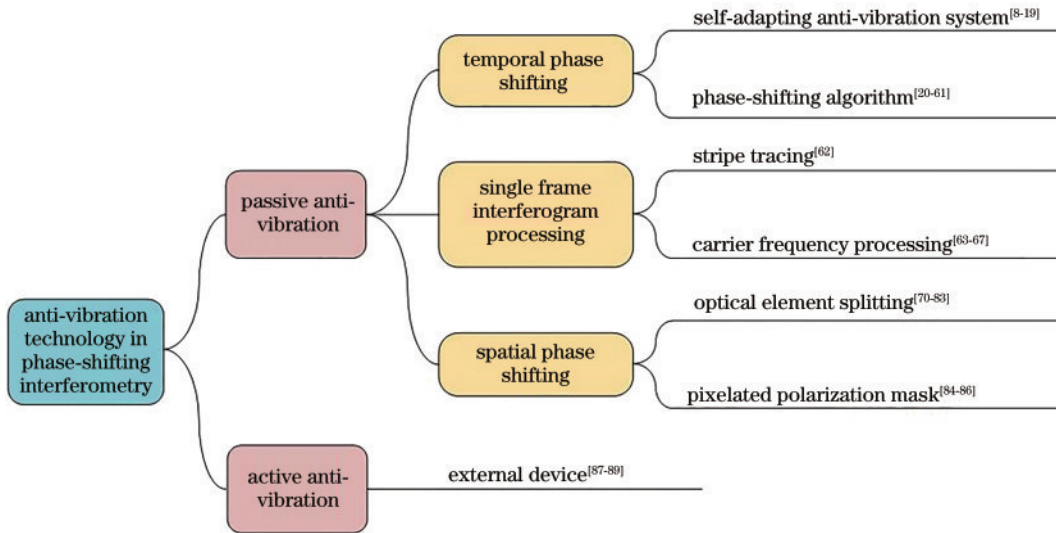


图 1 移相干涉的抗振技术分类

Fig. 1 Classification of anti-vibration technology in phase-shifting interferometry

在被动抗振技术中,研究最为广泛的一类是时域移相中的抗振方法,即从不同时刻采集的包含振动信息的多帧移相干涉图中计算出排除振动影响的相位分布图;第二类是单帧干涉图处理技术,由于仅采集一幅干涉图进行处理,因此自然避免了振动影响,如何从单帧干涉图中计算出准确的相位分布图,是这类方法着重需要解决的问题;第三类是空域移相技术,这种技术在同一时刻采集到一组移相干涉图,这样既避免了振动影响,又能使用常规的移相算法进行计算,然而这类抗振方法一般系统较为复杂,同时可能引入空间错位误差。主动抗振技术旨在削弱环境振动的传播,因此主要使用气浮平台、隔罩等外部设备进行抗振。

3.1 时域移相下的抗振技术

时域移相技术将移相器加入参考光路或测试光路,移相器能够在时间序列下改变两束光的相位差,从而达到使干涉条纹移动的目的。这种移相方式最常见,一般用于对静态物体进行测量。由于环境振动的存在,移相器每次移动引起的光程差变化都是不精确的,假设振动引起的移相误差为平动误差,即 p 为随机常数 d ,式(2)可写为

$$I(x, y) = A(x, y) + B(x, y) \cos [\varphi(x, y) + \delta(x, y) + d]. \quad (3)$$

若振动引起的移相误差为倾斜误差,即 p 为倾斜平面,式(2)可写为

$$I(x, y) = A(x, y) + B(x, y) \cos [\varphi(x, y) + \delta(x, y) + ax + by + c], \quad (4)$$

式中, a 、 b 、 c 为倾斜平面的系数。另外在 CCD 曝光时间内振动也会对波前造成影响, 导致记录下的干涉条纹变得模糊。因此 CCD 采集到的条纹图中会包含振动所造成的误差, 最终会导致提取出来的相位包裹图精确度较低。

3.1.1 自适应抗振

自适应抗振的原理为: 以环境振动引发的相位变化作为反馈信号, 将干涉系统制作成闭环系统, 由探测器(例如高速响应的光电二极管等光电探测器)同步检测振动所造成的相位变化并实时反馈给控制器, 达到在移相过程中监测振动, 并由驱动器补偿振动带来的影响。大体分为以下三类。

1) 压电陶瓷(PZT)驱动型

Freschi 等^[8]在以 PZT 为移相器的干涉仪中提出了该振动反馈方法, 在该方法中, PZT 既作为移相器在干涉仪中完成移相, 又作为反馈补偿器消除振动的影响。后续吴子明等^[9]优化了这种结构, 提出了光强-相位法, 该方法将干涉区域内某点光强所对应的相位转化为电压信号, 并通过数字信号处理器(DSP)将测得电压与预设相位值的电压进行对比, 其差值便作为反馈信号, 驱动 PZT 进行补偿。该方法的优点在于用单个光电二极管进行振动探测, 因此对不同的干涉条纹形状具有普适性。该类反馈结构的优点在于整体较简单, 可直接应用在传统移相干涉仪上, 缺点是 PZT 的幅频特性要求较高。考虑到 PZT 材料的强度与推力极限, 该类型抗振策略更适用于中小口径元件的测量。

2) 声光/电光调制型

在声光/电光调制抗振方面, 研究者们利用了晶体的声光效应与电光效应来实现移相并对振动进行补偿。声光方面, Cole 等^[10]利用声光调制(AOM)原理, 通过入射光束在声光调制器中发生衍射分光, 实现条纹相位检测与移相干涉测量。采用高速光电二极管测量光强变化并数字化, 以达成对相位的高频测量并进行调制, 后使用声光驱动器进行驱动补偿。实验中用 PZT 作为模拟振动源, 在 34 m 光程差的干涉仪中实现了对振动所造成光程差变化的补偿。后续赵伟瑞等^[11]改进了这种方法, 提出斩波式自适应干涉仪, 同样将声光调制器用于振动补偿, 但分离了系统中的振动检测光路与移相检测光路, 这样做使信噪比得到优化并使干涉图的对比度得到了提高。

应用电光调整技术, Zhao 等^[12]提出了基于电光调制(EOM)的干涉仪结构, 该干涉系统中由激光器发出的激光入射晶体后, 发生双折射, 可得到两束正交偏振光, 将两束光作为参考光与测试光进行干涉。该系统通过单点相位探测器监测振动引起的相位变化并将其

转化为晶体的调制电压变化, 以此改变由晶体出射的寻常光和非常光之间的相位差, 达到振动补偿的目的。Ferrari 等^[13]也以电光调制为基础, 提出了采用共光路结构并利用方解石分光的干涉仪。由于电光调制的反馈速度远远高于声光, 因而采用电光调制的干涉系统有更好的准确性。

3) 光源可调谐的干涉系统

可调谐激光器方案使用半导体激光器作为光源与移相器, 通过改变输出的激光频率进行时域移相。Yoshino 等^[14]提出使用可调谐半导体激光器作为干涉系统的光源, 其系统结构如图 2 所示。

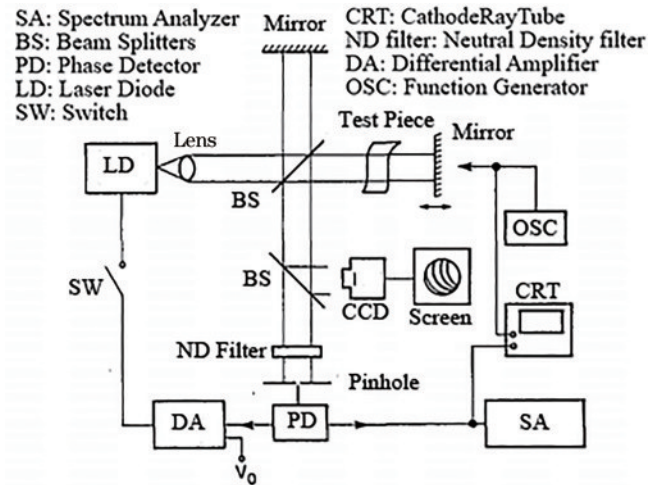


图 2 可调谐半导体激光器作为光源的干涉系统^[14]

Fig. 2 Interference system with tunable semiconductor laser as light source^[14]

由于干涉仪输出的信号强度为相位延迟的函数, 将干涉仪输出的信号强度与一个参考强度对比, 当干涉仪受振动影响时, 将这两个光强的差分信号输入至放大器, 之后形成反馈的注入电流, 控制激光频率以抑制振动的影响。苏舒等^[15]对波长调谐激光器进行了深入研究。Lu 等^[16]将可调谐激光二极管作为菲索干涉仪的光源, 再辅以反馈系统实现实时测量。Kim 等^[17]为了精确测量透明平板的绝对光学厚度, 提出了波长调谐条纹分析法, 补偿了波长调谐过程造成的不连续误差, 产生平滑的相位分布。Guo 等^[18]提出了一种基于波长调制和主动抗振动的多模干涉测量系统。该系统支持两种测量模式: 一种模式为波长扫描干涉法, 适用于结构表面; 另一模式为波长调谐干涉法, 适用于光滑连续表面。Yu 等^[19]提出了一种保持传统测量方式的双模菲索干涉仪动态光学测量方法, 在传统菲索干涉仪上增加了振动信息测量系统, 实现了振动相位提取, 并且为了更好地实现相位提取, 该课题组还设计了一种四步相位倾斜迭代算法。由于波长调谐系统通过改变波长进行移相, 不需要移动参考镜与被测件, 弥补了 PZT 无法推动大质量元件的缺点, 被广泛应用于大口径元件的测量中。

3.1.2 算法校正或补偿

自适应抗振策略通过构建闭环系统的方式达到自动探测并补偿振动的目的。这种系统的构建往往较为复杂。为此研究者们提出了另一种思路,针对已受振动影响的干涉条纹图进行算法处理以得到正确的相位分布。这类算法被称为抗振移相算法(AVPSA),大致可分为迭代与非迭代两种,至今研究者已完成诸多算法方面的工作。

1) 迭代算法

这类算法将移相量与相位均作为未知数进行迭代处理,将干涉图强度作为已知量,求解非线性方程组得出结果。这种方法对移相量没有定步长的要求,干涉仪上随机移相产生的干涉图亦可用于求解。

Okada 等^[20]提出使用迭代算法求解移相干涉图,之后 Kong 等^[21]改善了迭代的步骤,将迭代运算分成两步,第一步是对被测相位的求解,第二步是对移相量的求解,而迭代过程便在这两步之间交替进行,最后得到收敛的结果。Wang 等^[22-23]在 Kong 的工作上再进行优化,提出了先进迭代算法(AIA),其算法步骤如图 3 所示。

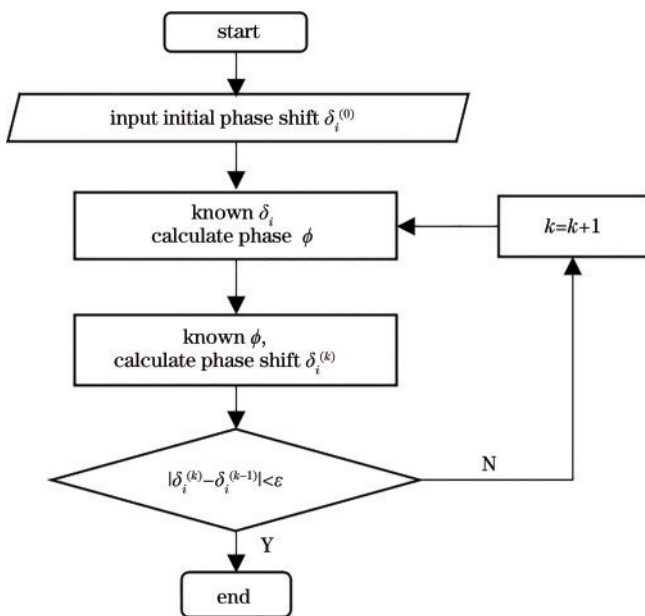


图 3 AIA 算法流程图

Fig. 3 Flow chart of AIA algorithm

该算法优化了多余的迭代变量,只把移相量传递到下一迭代的步骤中,加速了迭代的收敛。Liu 等^[24]提出了改进的三步迭代算法,在一个迭代周期内,用三个独立的步骤分别计算了波前相位、 x 方向和 y 方向移相,能够在较大的频率范围内抑制振幅大于波长的振动对表面测量的影响。后续研究者对各种实验情景提出了不同的算法。针对背景光强波动和调制度不均匀的情况,Zhang 等^[25-26]提出了两种迭代算法,无需对干涉图进行预处理并缩短了迭代步骤,以较少的计算时间获得较高的计算精度。Liu 等^[27]针对干涉图之间不

同对比度的情况,提出利用干涉图数据构造代数方程组,使用迭代法求解方程组,以此从受振动影响的干涉图中提取波前相位。Kihm^[28]为了克服倾斜移相干涉测量中大数值孔径表面的离轴移相误差,提出了一种基于迭代最小二乘拟合的相位恢复方法。Deck^[29]为了消除谐波误差与随机移相误差的干扰,提出了一种基于最小二乘迭代模型的移相算法。Chen 等^[30]提出了一种任意条纹模型通用的迭代算法,弥补了 AIA 算法适用条纹模式固定的缺陷。Ordonez 等^[31]在 AIA 的基础上加入双权 M 估计对迭代的移相量进行优化,以保证能在 10 次迭代内得出结果。

振动除了能造成平动移相误差,还可能造成参考面或被测面倾斜,从而产生倾斜移相,这类误差需要在自适应抗振系统中加入至少三个相位探测器才能提取,较为复杂,因此建立针对性的数学模型并使用迭代算法处理较为便捷^[32-34]。除单色光外,迭代算法也被运用在以白光为光源的干涉测量中^[35]。

2) 非迭代算法

这类算法旨在对每一幅移相干涉图中的每个像素进行分析,获取波面相位并进行补偿。Schwider 等^[36]发现振动会在相位包裹图中引入有特征的误差,该误差的特征在于其空间频率为条纹的两倍,称为“波纹”,如图 4 所示。为了将误差分量移除,提出多项式拟合算法,该算法在处理移相干涉图时能提取出误差分量^[37]。后续 Meneses-Fabian 等^[38]也提出了基于多项式拟合的非迭代算法,使用 k 阶多项式进行拟合,再结合最小二乘法计算出移相步长。

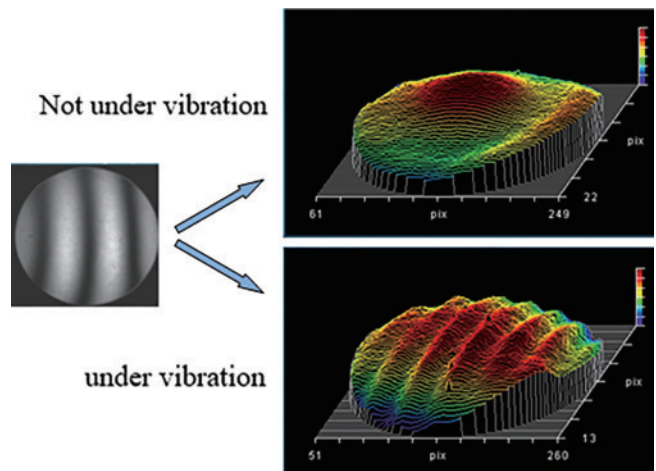
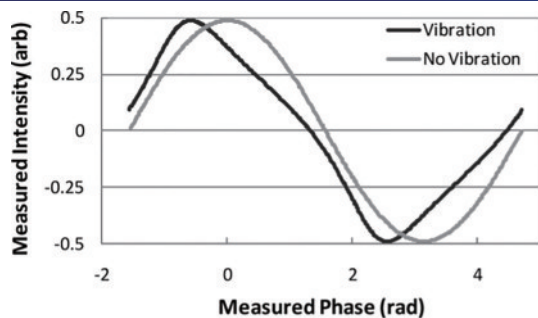


图 4 振动引入前后的恢复相位误差^[36]

Fig. 4 Recovery phase error before and after vibration introduction^[36]

Deck^[39-40]提出了“相位误差图”的概念,并以此提出了振动补偿算法。该图为被测表面二维干涉图的一维表示,其横坐标为像素点对应的测得相位,纵坐标为任意一幅移相干涉图中像素点对应的光强,如图 5 所示。根据移相干涉术的原理,如果移相过程不受振动影响,则恢复相位中不含有误差,那么图中曲线是一条

图 5 相位误差图^[40]Fig. 5 Phase-error pattern^[40]

理想的正弦曲线,即图中的灰色曲线;反之,如果恢复相位中含有振动误差,就会产生一条扭曲畸变的正弦曲线,即图中的黑色曲线。可以根据曲线的畸变情况修正相位。该方法对于对移相方法和干涉图形状没有要求,因此适用范围较广。然而,该算法要求干涉图的背景和对比度必须是均匀的,且不存在高阶谐波误差,否则补偿效果会有所下降。

此外,还有不少文献对移相误差做积分近似或线性近似^[41-42],对光强不稳定、振动导致的移相不准确所造成的非线性误差进行了校正^[43-48]。

经典的移相干涉理论认为移相算法存在需要至少 3 张干涉图的限制^[49-50],Zhang 等^[51-53]基于李萨如椭圆拟合方案提出了数种非迭代算法,将需要的干涉图数量减少至 2 张,这些方法在获得相对准确的相位分布情况下,计算时间更少,且适用于不同的背景光强、调制度分布和噪声。该类方法也被 Li 等^[54]用于干涉条纹小于 1 根的情况。

此外,研究者们提出了许多新颖的方案,获得了较好的效果。Ri 等^[55]提出将 N 步移相算法与采样叠栅法结合,提出了时空移相算法,该算法具有非常好的抗噪能力,这在其后续发表的文献中被证实^[56]。Han 等^[57]提出了干涉图的二次空间滤波算法,该算法既能实现干扰信号分离,又能实现随机移相估计。Liu 等^[58]提出时域谱分析的方法,通过检测频谱的模量,从时域傅里叶谱峰提取波前相位。Servin 等^[59]最先提出将多个移相干涉图组合成单载频条纹图,后使用滤波器对其进行解调,并将该方法命名为“压缩干涉术(SI)”,该方法中单载频条纹图又被称为“时空条纹图”,图像在空间域包含被测相位信息,在时间域包含移相信息,由于有移相过程,时空条纹图的频域背景瓣与信号瓣之间相隔较远,因此很容易提取相位。Zhu 等^[60]通过推导,将组合时空条纹图的移相干涉图的张数减至 2 张。Liu 等^[61]提出空间载波辅助法,先获取时域移相干涉图,后获取空间载频干涉图以获得波前相位,并将其作为初始值协助迭代运算快速收敛。

时域移相的抗振算法经历了一系列发展,由早期针对移相器的线性误差与非线性误差,到针对振动产生的波纹误差与小幅的移相误差,再到无需预设移相

量的迭代算法求解相位,最后到如今能够针对倾斜移相误差。由此可见,解决多样化的移相误差是时域移相抗振算法的发展趋势。

3.2 单帧处理技术

单帧处理旨在从单幅干涉图中提取相位,因此只需要单次曝光。由于没有移相过程,可避免环境振动的干扰且能够节省测量时间。然而单纯处理单幅干涉图时,面对零频区域与驻点会出现计算误差,因此精度会有所下降。常见的单帧处理算法有条纹追迹法^[62]、载频移相法^[63]、傅里叶变换法^[64]等。条纹追迹法主要依据图像处理技术识别出干涉图中条纹光强的极大与极小值对应的干涉级次与坐标位置,之后使用泽尼克多项式对提取的相位进行拟合,从而得到相位分布。载频移相法与傅里叶变换法皆要求引入比被测相位最大空间频率更高的线性载频,如图 6 所示,不同之处在于载频移相将相邻像素之间的载频量视为移相量,重构 5 帧或更多帧的移相干涉图,并利用定步长移相算法进行相位恢复。而傅里叶变换法则需要对干涉图进行傅里叶变换,通过频域滤波得到包含相位信息的旁瓣后再通过逆变换获得相位分布,类似的频域分析方法于白光干涉抗噪方面亦有应用^[65]。在硬件方面,载频处理技术也有应用,Duan 等^[66]提出了一种用于抗振动光学测量的双通道干涉仪,整个光学系统由主通道和辅助通道组成,主通道负责形成正常的干涉条纹,辅助通道则引入空间载频,并提出了相应的移相算法进行相位提取,消除了引入载频造成的回溯误差。Zheng 等^[67]将圆载频引入点衍射同步干涉仪,提出圆载波压缩干涉术,有效抑制了由环境振动误差导致的纹波误差。

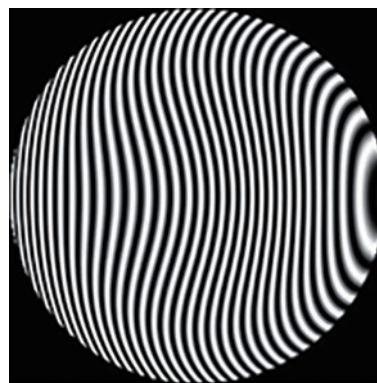


图 6 线性载频干涉图

Fig. 6 Linear carrier frequency interferogram

此外,钱克矛等^[68]提出将单帧处理与移相干涉图结合。用单帧技术处理每一幅移相干涉图,得到各自的恢复相位,提取其中的可靠区域计算出每幅干涉图之间的相位差,算出移相量后,再用最小二乘法从移相干涉图中恢复相位,从而排除振动引入的移相量误差的影响。吴高峰^[69]提出了基于单帧干涉条纹数学模型的相位求解方法,通过引入遗传算法,优化了单帧干涉图

相位提取的过程。

3.3 空域(同步)移相技术

在时域移相中,振动会通过时间序列上的移相过程将误差引入干涉图中,因此若能够在同一时刻采集多幅具有固定相位差的干涉图,便可避免环境振动对移相过程所造成的影响。同步移相技术能在同一时刻采集多幅干涉图,这种移相方案不仅能用于静态测量,还被广泛应用于动态测量中,该技术发展至今已有的方案,大体分为以下两类。

3.3.1 元器件分光方案

这种方法使用分光元件将干涉信号分成多束,通过波片、偏振片与分光镜的组合对每束光分别进行移相,常用的元器件有分光棱镜、沃拉斯顿棱镜^[70]及衍射元件等。

Smythe 等^[71]提出一种使用偏振分光棱镜(PBS)和非偏振分光棱镜(BS)的同步移相方案,是该类方案的雏形。Koliopoulos 等^[72]使用与之相近的结构设计了同步移相干涉仪。Sivakumar 等^[73]提出了基于三个 BS 分光的同步移相结构,图 7 为其结构图。

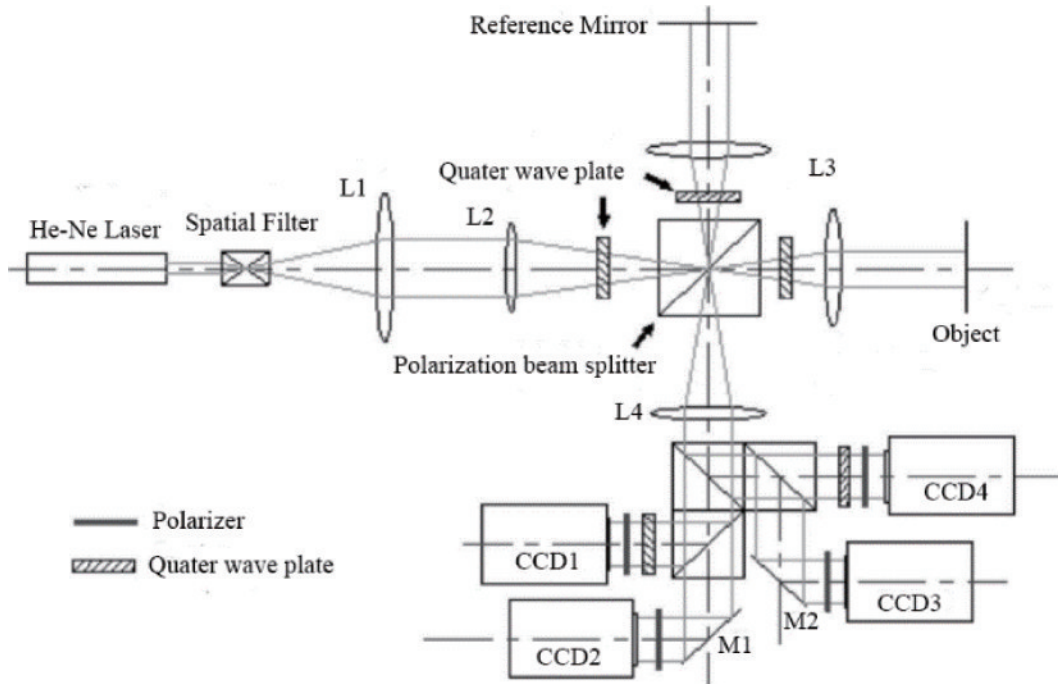


图 7 基于 BS 分光的同步移相^[73]

Fig. 7 Parallel phase shifting based on beam splitter (BS)^[73]

干涉光经过 3 个 BS 后被分为 4 束,使用波片与偏振片对每束光进行移相,之后通过 4 个 CCD 采集图像。由于每幅干涉图所在的光路都需要一个 CCD 进行采集,这样系统中 CCD 的数量增多,成本较大;且需要控制多个 CCD 同时采集图像。Yamazaki 等^[74]提出了一种对信号强度偏差和空间相位变化皆具有鲁棒性的时域差分相位检测方法,系统结构类似于上述同步移相干涉系统,利用单台摄像机在不同时间检测到的差分相位信号,消除相位恢复算法中的常数项以获取相位。

随着半导体与集成电路不断发展,CCD 具有了较高的空间分辨率,使单个 CCD 采集多幅干涉图成为可能,这样结构复杂与多个 CCD 响应不一致的问题迎刃而解,如图 8 中 Kihm 等^[75]提出的结构。Toto-Arellano 等^[76]提出了一种类似图 8 的三干涉仪耦合结构,并使用偏振阵列作为移相器产生移相干涉图,记录在单个相机的靶面上。

Kwon 等^[77]与 Kujawinska 等^[78]利用光栅进行分光

并使用不同衍射级次进行移相。后续这种思路被钱克矛等^[79]改进为光栅分光、偏振同步移相,其使用了一种特殊的二维朗奇(Ronchi)光栅,该结构能方便地获得光强分布大致相同的移相干涉图,并能更好地利用 CCD 靶面面积。同样利用衍射元件分光的思路也被多名研究者沿用^[80-82]。Liu 等^[83]在衍射元件分光的基础上,提出改用双波长光源进行同步移相干涉,利用同步干涉图中相同的光程差变化,使用最小二乘法分别迭代计算两种波长的移相量,之后通过取均值的方式得到下一循环需输入的光程差,以此加快迭代的收敛,证明了其测量结果比单波长噪声更小。

3.3.2 像素化偏振掩膜板方案

该方法要求制作一个掩膜板并置于 CCD 靶面的正前方,如图 9 所示,该掩膜板上排列着许多的单元且其空间尺寸与 CCD 的像素一致,相邻的 4 个单元为一个组,组中的每个单元都能使透过的光产生固定的移相量。将每个组看作为一个像素整体,CCD 靶面的每个像素点都能记录下固定移相后的干涉图。之后用拆

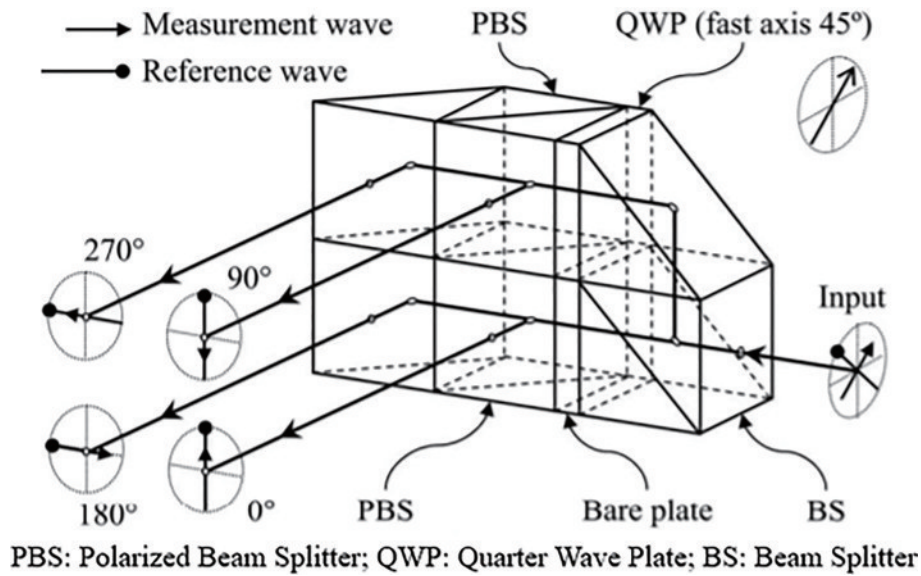


图 8 单个 CCD 接收 4 幅同步移相干涉图^[75]

Fig. 8 Receiving four parallel phase-shifting interferograms with single CCD^[75]

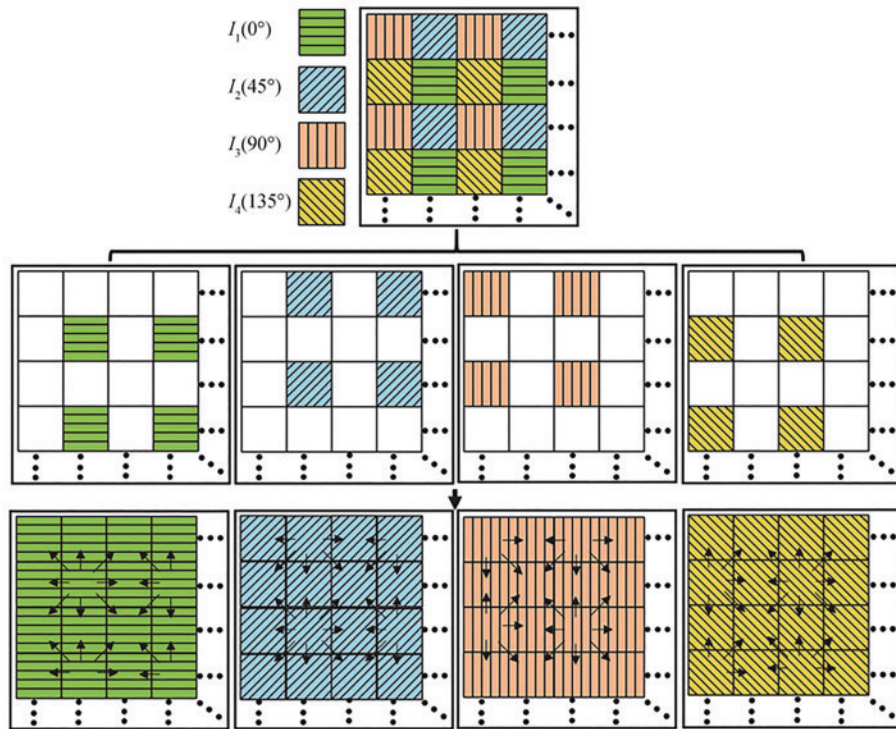


图 9 像素化偏振掩模板^[84]

Fig. 9 Pixelated polarization mask^[84]

解重组的算法处理采集的图像,便可以从一幅干涉图中分出 4 幅具有固定移相的干涉图。

这种方法的优点在于可以减少使用的 CCD 数量,使得系统与干涉图的采集变得简便。而缺点是从一幅图中提取出了 4 幅干涉图,因此每幅干涉图的分辨率仅为 CCD 分辨率的 1/4。由于像素化偏振掩模板的制作工艺较为复杂且直接关联到干涉图的质量,因此该方案适用于 CCD 靶面面积需求较小的场合^[85]。除掩模板外,将液晶置于 CCD 前,利用液晶改变光的偏振

态也能达成同步移相干涉^[86]。

空域移相技术以其优越的抗振特性可适用于车间环境下的测量,虽然振动不会对空域移相中的移相量造成随机误差,但起偏器的方位角偏差仍会产生空域上的移相误差,而空域移相技术采用的定步长移相算法要求精确的移相量,因此空域上的移相误差仍能导致相位的提取结果产生误差。

3.4 外部设备抗振(主动抗振)

被动抗振技术旨在尽可能消除振动误差的影响。

而主动抗振是指使用外部设备减少干涉仪受到的振动。该类设备中较为常见的有光学实验室中的气浮隔振平台、外部隔罩等。图 10 为气浮光学平台实物图。

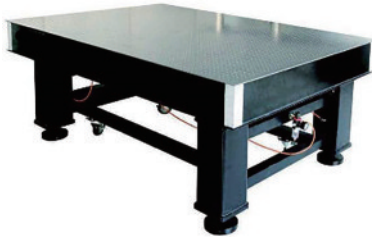


图 10 气浮隔振光学平台
Fig. 10 Air floating vibration isolation optical platform

在该类抗振平台中,空气弹簧为重要组件,因此合理设计气浮平台中的空气弹簧以及气浮平台的整体布局能增强平台的抗振性能^[87-88]。崔文辉等^[89]基于调谐液柱阻尼器设计了水平方向超低频减振的气浮平台,提升了超精密实验的结果精度。使用外部设备主动抗振的本质是使干涉仪工作在开环状态,虽能较好地抑制高频振动,但对于低频大振幅振动的抑制效果普遍不及上述各类被动抗振技术。

4 总结与展望

表面形貌的好坏反映了光学元件的加工质量,在过去的几十年里,移相干涉测量被广泛应用在光学元件检测等领域,并取得了巨大的发展。从简单的平面、球面,到较为复杂的非球面、自由曲面,再到透明薄膜、微纳结构表面等,都可以用干涉法进行测量。为了使精密制造中工程面测量结果尽量不受环境振动的干扰,本文总结了移相干涉测量中的抗振策略,对现有的抗振技术进行了评述。策略分为主动抗振与被动抗振两大类,主动抗振仅在开环状态下削弱环境振动的幅值,相较而言被动抗振具有更强的抗振能力。而在被动抗振中,空域移相技术在抗振方面的效果最为明显,适应大多数干涉测量的需求。其他技术仍有一定的提升空间,比如自适应抗振系统对于倾斜移相造成的误差较难克服,不连续表面造成的低对比度干涉图对抗振算法的要求更严格。如今深度学习技术炙手可热,科研人员已将数字全息与深度学习结合,将该技术用于全息图相位恢复和全息图像重建^[90],只要训练集选取得当,深度学习方法能够有效克服实验环境恶劣所带来的影响^[91],经过适当训练的神经网络能够对瞬态场景进行高质量的 3D 形状重建^[92]。对于自适应光学波前传感技术,已有研究者提出了双帧干涉波前测量的神经网络(phase U-Net)^[93],算法抗振处理的本质是对移相干涉图进行处理以获得准确的被测件面形相位信息,受振动影响的干涉图在经过适当训练的神经网络处理后也有恢复出准确面形的可能性。相信在不久的将来,这些新兴技术能与抗振技术相结合,推动移

相干涉测量抗振技术的进一步发展。

参 考 文 献

- [1] Bruning J H, Herriott D R, Gallagher J E, et al. Digital wavefront measuring interferometer for testing optical surfaces and lenses[J]. *Applied Optics*, 1974, 13(11): 2693-2703.
- [2] Yamaguchi I, Zhang T. Phase-shifting digital holography [J]. *Optics Letters*, 1997, 22(16): 1268-1270.
- [3] Sun Y, Shen H, Li X, et al. Wavelength-tuning point diffraction interferometer resisting inconsistent light intensity and environmental vibration: application to high-precision measurement of a large-aperture spherical surface[J]. *Applied Optics*, 2019, 58(5): 1253-1260.
- [4] Vishnyakov G N, Ivanov A D, Levin G G, et al. Phase-shift speckle-shearing interferometry[J]. *Quantum Electronics*, 2020, 50(7): 636-642.
- [5] 陈华强, 周胜, 丁锦红, 等. 基于多步相移法和偏振干涉光学层析光路的三维温度场测量[J]. *光学学报*, 2022, 42(7): 0712004.
Chen Q H, Zhou S, Ding J H, et al. Three-dimensional temperature field measurement based on multi-step phase shift method and polarization interference optical tomography optical path[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42 (7): 0712004.
- [6] 刘乾. 抗振动移相干涉测量算法与实验研究[D]. 绵阳: 中国工程物理研究院, 2015.
Liu Q. Anti-vibration phase-shifting interferometry algorithm and experimental study[D]. Mianyang: China Academy of Engineering Physics, 2015.
- [7] Ruiz P D, Huntley J M, Shen Y, et al. Vibration-induced phase errors in high-speed phase-shifting speckle-pattern interferometry[J]. *Applied Optics*, 2001, 40(13): 2117-2125.
- [8] Freschi A A, Frejlich J. Adjustable phase control in stabilized interferometry[J]. *Optics Letters*, 1995, 20(6): 635-637.
- [9] 吴子明. 主动抗振技术研究: 单点探测与 PZT 补偿[D]. 南京: 南京理工大学, 2003.
Wu Z M. Research on active seismic technology-single point detection and pzt compensation[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2003.
- [10] Cole G C, Burge J H, Dettmann L R. Vibration stabilization of a phase-shifting interferometer for large optics[J]. *Proceedings of SPIE*, 1997, 3134: 438-446.
- [11] 赵伟瑞, 曹根瑞. 斩波式自适应移相干涉技术[J]. *光学学报*, 2002, 22(7): 858-862.
Zhao W R, Cao G R. Chopping adaptive phase-shifting interferometry[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, 22(7): 858-862.
- [12] Zhao C Y, Burge J H. Vibration-compensated interferometer for surface metrology[J]. *Applied Optics*, 2001, 40(34): 6215-6222.
- [13] Ferrari J A, Flores J L, Ayubi G A, et al. Robust interferometer with external phase-shift control[J]. *Optics Express*, 2017, 25(24): 29965-29970.

- [14] Yoshino T, Nara M, Mnatzakanian S, et al. Laser diode feedback interferometer for stabilization and displacement measurements[J]. *Applied Optics*, 1987, 26(5): 892-897.
- [15] 苏舒. 基于波长调谐的自适应移相干涉检测系统研究[D]. 上海: 东华大学, 2020.
Su S. Research on adaptive phase-shifting interference detection system based on wavelength tuning[D]. Shanghai: Donghua University, 2020.
- [16] Lu Q J, Han S. Optical surface measurements of a wavelength-tuned Fizeau interferometer based on an optical power, real-time feedback and compensation system [J]. *Results in Physics*, 2020, 16: 102846.
- [17] Kim Y. Interferometric profilometry of absolute optical thickness of transparent plate using wavelength tuning fringe analysis[J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2019, 33(6): 2841-2846.
- [18] Guo T, Guo X Y, Wei Y Y. Multi-mode interferometric measurement system based on wavelength modulation and active vibration resistance[J]. *Optics Express*, 2021, 29(22): 36689-36703.
- [19] Yu C Y, Zong Y, Duan M L, et al. Dual-mode Fizeau interferometer with four-step phase-tilting iteration for dynamic optical measurement[J]. *Optics Express*, 2021, 29(18): 28148-28166.
- [20] Okada K, Sato A, Tsujiuchi J. Simultaneous calculation of phase distribution and scanning phase shift in phase shifting interferometry[J]. *Optics Communications*, 1991, 84(3/4): 118-124.
- [21] Kong I B, Kim S W. Portable inspection of precision surfaces by phase-shifting interferometry with automatic suppression of phase-shift errors[J]. *Optical Engineering*, 1995, 34(5): 1400-1404.
- [22] Wang Z Y, Han B. Advanced iterative algorithm for randomly phase-shifted interferograms with intra- and inter-frame intensity variations[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2007, 45(2): 274-280.
- [23] Wang Z Y, Han B. Advanced iterative algorithm for phase extraction of randomly phase-shifted interferograms [J]. *Optics Letters*, 2004, 29(14): 1671-1673.
- [24] Liu Q, Wang Y, He J G, et al. Modified three-step iterative algorithm for phase-shifting interferometry in the presence of vibration[J]. *Applied Optics*, 2015, 54(18): 5833-5841.
- [25] Zhang Y, Tian X B, Liang R G. Random two-step phase shifting interferometry based on Lissajous ellipse fitting and least squares technologies[J]. *Optics Express*, 2018, 26(12): 15059-15071.
- [26] Zhang Y, Tian X B, Liang R G. Timesaving phase retrieval approach based on difference map normalization and fast iterative algorithm[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2019, 121: 18-28.
- [27] Liu Q, He H B, Yuan D C, et al. Vibration-resistant phase retrieval method with contrast compensation for phase-shifting interferometry[J]. *Journal of Optics*, 2017, 19(4): 045702.
- [28] Kihm H. Phase recovery of high numerical-aperture spherical surfaces in tilt phase-shift interferometry[J]. *Optical Engineering*, 2016, 55(7): 074101.
- [29] Deck L L. Model-based phase shifting interferometry[J]. *Applied Optics*, 2014, 53(21): 4628-4636.
- [30] Chen Y C, Qian K M. General iterative algorithm for phase-extraction from fringe patterns with random phase-shifts, intensity harmonics and non-uniform phase-shift distribution[J]. *Optics Express*, 2021, 29(19): 30905-30926.
- [31] Ordonez S, Servin M, Padilla M, et al. Tukey's robust M-estimator for phase demodulation of interferograms with nonuniform shifts[J]. *Applied Optics*, 2020, 59(20): 6224-6230.
- [32] Liu Q, Wang Y, Ji F, et al. A three-step least-squares iterative method for tilt phase-shift interferometry[J]. *Optics Express*, 2013, 21(24): 29505-29515.
- [33] Duan M L, Zong Y, Zhu R H, et al. Phase-tilt iteration: accurate and robust phase extraction from random tilt-shift interferograms[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2021, 142: 106595.
- [34] 卢文倩, 李建欣, 段明亮, 等. 基于倾斜相位的抗振动干涉面形测量[J]. *光学学报*, 2021, 41(2): 0212005.
Lu W Q, Li J X, Duan M L, et al. Anti-vibration interferometric shape measurement based on tilt phase[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(2): 0212005.
- [35] 毕书贤, 段明亮, 宗毅, 等. 高精度动态白光干涉测量方法[J]. *光学学报*, 2022, 42(5): 0512002.
Bi S X, Duan M L, Zong Y, et al. High-precision dynamic white-light interferometry[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(5): 0512002.
- [36] Schwider J, Burow R, Elssner K E, et al. Digital wave-front measuring interferometry: some systematic error sources[J]. *Applied Optics*, 1983, 22(21): 3421-3432.
- [37] Schwider J. Phase shifting interferometry: reference phase error reduction[J]. *Applied Optics*, 1989, 28(18): 3889-3892.
- [38] Meneses-Fabian C. Two-step phase-shifting interferometry for illumination highly non-uniform by fitting 2D polynomials of degree K [J]. *Journal of Optics*, 2019, 21(5): 055703.
- [39] Deck L L. Suppressing vibration errors in phase-shifting interferometry[J]. *Proceedings of SPIE*, 2007, 6704: 670402.
- [40] Deck L L. Suppressing phase errors from vibration in phase-shifting interferometry[J]. *Applied Optics*, 2009, 48(20): 3948-3960.
- [41] Groot P D. Derivation of algorithms for phase-shifting interferometry using the concept of a data-sampling window[J]. *Applied Optics*, 1995, 34(22): 4723-4730.
- [42] van Wingerden J, Frankena H J, Smorenburg C. Linear approximation for measurement errors in phase shifting interferometry[J]. *Applied Optics*, 1991, 30(19): 2718-2729.
- [43] Hibino K, Oreb B F, Farrant D I, et al. Phase-shifting algorithms for nonlinear and spatially nonuniform phase shifts[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1997, 14(4): 918-930.
- [44] Schmit J, Creath K. Extended averaging technique for

- derivation of error-compensating algorithms in phase-shifting interferometry[J]. *Applied Optics*, 1995, 34(19): 3610-3619.
- [45] Hariharan P, Oreb B F, Eiju T. Digital phase-shifting interferometry: a simple error-compensating phase calculation algorithm[J]. *Applied Optics*, 1987, 26(13): 2504-2506.
- [46] Hibino K, Oreb B F, Farrant D I, et al. Phase shifting for nonsinusoidal waveforms with phase-shift errors[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1995, 12(4): 761-768.
- [47] 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.
- [48] Onodera R, Ishii Y. Phase-extraction analysis of laser-diode phase-shifting interferometry that is insensitive to changes in laser power[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1996, 13(1): 139-146.
- [49] Zhang Y, Tian X B, Liang R G. Three-step random phase retrieval approach based on difference map normalization and diamond diagonal vector normalization [J]. *Optics Express*, 2018, 26(22): 29170-29182.
- [50] Zhang Y, Tian X B, Liang R G. Random three-step phase retrieval approach based on difference map Gram-Schmidt orthonormalization and Lissajous ellipse fitting method[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2019, 121: 11-17.
- [51] Zhang Y. Random phase retrieval approach using Euclidean matrix norm of sum and difference map and fast least-squares algorithm[J]. *Optics Communications*, 2020, 460: 125174.
- [52] Zhang Y, Tian X B, Liang R G. Two-step random phase retrieval approach based on Gram-Schmidt orthonormalization and Lissajous ellipse fitting method [J]. *Optics Express*, 2019, 27(3): 2575-2588.
- [53] Zhang Y, Tian X B, Liang R G. Phase extraction from two randomly phase shifted interferograms by combining advanced principal component analysis and Lissajous ellipse fitting[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2020, 132: 106134.
- [54] Li Z H, Wu Q C, Yao Y, et al. A precise three-step phase retrieval algorithm suitable for the interferograms with less than one fringes numbers[J]. *Optik*, 2021, 231: 166428.
- [55] Ri S E, Wang Q H, Xia P, et al. Spatiotemporal phase-shifting method for accurate phase analysis of fringe pattern[J]. *Journal of Optics*, 2019, 21(9): 095702.
- [56] Ri S E, Takimoto T, Xia P, et al. Accurate phase analysis of interferometric fringes by the spatiotemporal phase-shifting method[J]. *Journal of Optics*, 2020, 22(10): 105703.
- [57] Han X X, Xie L N, Wang Y, et al. Two-step phase-shifting algorithm based on the quadratic spatial filtering of interferograms[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2020, 12(6): 6901812.
- [58] Liu Q, Yue X B, Li L L, et al. Robust phase-shifting interferometry resistant to multiple disturbances[J]. *Journal of Optics*, 2018, 20(4): 045701.
- [59] Servin M, Cywiak M, Malacara-Hernandez D, et al. Spatial carrier interferometry from M temporal phase shifted interferograms: squeezing Interferometry[J]. *Optics Express*, 2008, 16(13): 9276-9283.
- [60] Zhu R G, Li B, Zhu R H, et al. Phase extraction from two phase-shifting fringe patterns using spatial-temporal fringes method[J]. *Optics Express*, 2016, 24(7): 6814-6824.
- [61] Liu Q, Yuan D C, He H B. Enhancement of vibration desensitising capability of iterative algorithms for phase-shifting interferometers[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2017, 98: 31-36.
- [62] 戴福隆, 王朝阳. 条纹图像的数字化自动分析处理技术之一: 条纹中心法[J]. *光子学报*, 1999, 28(8): 700-706.
- Dai F L, Wang Z Y. Automatic fringe patterns analysis using digital processing techniques: I. fringe center method[J]. *Acta Photonica Sinica*, 1999, 28(8): 700-706.
- [63] Servin M, Cuevas F J. A novel technique for spatial phase-shifting interferometry[J]. *Journal of Modern Optics*, 1995, 42(9): 1853-1862.
- [64] Takeda M, Ina H, Kobayashi S. Fourier-transform method of fringe-pattern analysis for computer-based topography and interferometry[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1982, 72(1): 156-160.
- [65] 杜海龙, 段照斌, 孙晓东. 基于 Fourier 频谱分析的白光干涉信号解算方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(9): 0907001.
- Du H L, Duan Z B, Sun X D. White light interference signal processing method based on Fourier frequency spectrum analysis[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(9): 0907001.
- [66] Duan M L, Zong Y, Xu Y X, et al. Dual-channel interferometer for vibration-resistant optical measurement [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2020, 127: 105981.
- [67] Zheng D H, Chen L, Li J P, et al. Circular carrier squeezing interferometry: suppressing phase shift error in simultaneous phase-shifting point-diffraction interferometer [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2018, 102: 136-142.
- [68] Qian K M, Wang H X, Gao W J, et al. Phase extraction from arbitrary phase-shifted fringe patterns with noise suppression[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2010, 48(6): 684-689.
- [69] 吴高峰. 基于单帧条纹模型的相位复原技术研究[D]. 成都: 中国科学院光电技术研究所, 2017.
- Wu G F. Research on phase reconstruction based on model of single interferogram[D]. Chengdu: Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, 2017.
- [70] Shaked N T, Rinehart M T, Wax A. Dual-interference-channel quantitative-phase microscopy of live cell dynamics[J]. *Optics Letters*, 2009, 34(6): 767-769.
- [71] Smythe R, Moore R. Instantaneous phase measuring interferometry[J]. *Optical Engineering*, 1984, 23(4): 234361.
- [72] Koliopoulos C L. Simultaneous phase-shift interferometer

- [J]. Proceedings of SPIE, 1992, 1531: 119-127.
- [73] Sivakumar N R, Hui W K, Venkatakrishnan K, et al. Large surface profile measurement with instantaneous phase-shifting interferometry[J]. Optical Engineering, 2003, 42(2): 367-372.
- [74] Yamazaki K, Takashima Y. Time differential phase detection method for robust industrial non-destructive inspections[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2018, 57(9S1): 09SB04.
- [75] Kihm H, Kim S W. Fiber-diffraction interferometer for vibration desensitization[J]. Optics Letters, 2005, 30(16): 2059-2061.
- [76] Toto-Arellano N I. 4D measurements of biological and synthetic structures using a dynamic interferometer[J]. Journal of Modern Optics, 2017, 64(sup4): S20-S29.
- [77] Kwon O Y. Multichannel phase-shifted interferometer[J]. Optics Letters, 1984, 9(2): 59-61.
- [78] Kujawinska M, Robinson D W. Multichannel phase-stepped holographic interferometry[J]. Applied Optics, 1988, 27(2): 312-320.
- [79] 钱克矛, 缪泓, 伍小平. 一种用于动态过程测量的实时偏振相移方法[J]. 光学学报, 2001, 21(1): 64-67.
Qian K M, Miao H, Wu X P. A real-time polarization phase shifting technique for dynamic measurement[J]. Acta Optica Sinica, 2001, 21(1): 64-67.
- [80] Millerd J E, Brock N J. Methods and apparatus for splitting, imaging, and measuring wavefronts in interferometry: US7170611 B2[P]. 2007-01-30.
- [81] 左芬, 陈磊, 徐晨. 同步移相干涉的测量性能[J]. 中国激光, 2007, 34(12): 1682-1687.
Zuo F, Chen L, Xu C. Measurement performance of simultaneous phase-shifting interferometer[J]. Chinese Journal of Lasers, 2007, 34(12): 1682-1687.
- [82] Yaghoubi S H S, Ebrahimi S, Dashtdar M, et al. Common-path, single-shot phase-shifting digital holographic microscopy using a Ronchi ruling[J]. Applied Physics Letters, 2019, 114(18): 183701.
- [83] Liu Q, Li L L, Zhang H, et al. Simultaneous dual-wavelength phase-shifting interferometry for surface topography measurement[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2020, 124: 105813.
- [84] Liang D, Zhang Q, Wang J, et al. Single-shot Fresnel incoherent digital holography based on geometric phase lens[J]. Journal of Modern Optics, 2020, 67(2): 92-98.
- [85] Zhang Y, Tian X B, Liang R G. Fringe-print-through error analysis and correction in snapshot phase-shifting interference microscope[J]. Optics Express, 2017, 25(22): 26554-26566.
- [86] Hegyi A, Martini J. Hyperspectral imaging with a liquid crystal polarization interferometer[J]. Optics Express, 2015, 23(22): 28742-28754.
- [87] 马亚强. 精密实验室微振动气浮隔振平台设计研究与应用[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2020.
Ma Y Q. Design and application of micro vibration dynamic air floating vibration isolation platform in precision laboratory[D]. Handan: Hebei University of Engineering, 2020.
- [88] 申伟, 杨颖鹏, 张华. 光学平台减振系统用空气弹簧的设计及试验研究[J]. 橡胶工业, 2021, 68(6): 437-443.
Shen W, Yang Y P, Zhang H. Design and experimental research of air spring for vibration reduction system of optical platform[J]. China Rubber Industry, 2021, 68(6): 437-443.
- [89] 崔文辉, 朱健强, 何媛琦, 等. 基于最优调谐液柱阻尼器的气浮光学平台稳定性研究[J]. 光学学报, 2021, 41(21): 2122001.
Cui W H, Zhu J Q, He Y Q, et al. Stability of air floating optical platform based on optimal tuned liquid column damper[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(21): 2122001.
- [90] Rivenson Y, Zhang Y B, Günaydin H, et al. Phase recovery and holographic image reconstruction using deep learning in neural networks[J]. Light: Science & Applications, 2018, 7(2): 17141.
- [91] Yin W, Chen Q, Feng S J, et al. Temporal phase unwrapping using deep learning[J]. Scientific Reports, 2019, 9: 20175.
- [92] Feng S J, Zuo C, Yin W, et al. Micro deep learning profilometry for high-speed 3D surface imaging[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2019, 121: 416-427.
- [93] 李自强. 基于深度学习的自适应光学波前传感技术[D]. 成都: 中国科学院光电技术研究所, 2021.
Li Z Q. Study on the wavefront sensing technology in adaptive optics based on deep learning[D]. Chengdu: Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, 2021.