

分类号_____

学校代码 10487

学号 M201670476

密级_____

华中科技大学

硕士学位论文

三色组合光源光学轮廓仪研究

学位申请人： 刘学俐

学 科 专 业： 仪器仪表工程

指 导 教 师： 刘晓军教授

答 辩 日 期： 2018 年 5 月 9 日

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree for the Master of Engineering**

**Study on the Optical Profiler of Three Color
Combined Light Source**

Candidate : Liu xueli

Major : Instruments and Meter Engineering

Supervisor : Prof. Liu Xiaojun

Huazhong University of Science & Technology

Wuhan 430074, P.R.China

May, 2018

独创性声明

本人声明所呈交的学位论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除文中已经标明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的研究成果。对本文的研究做出贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本人完全意识到本声明的法律结果由本人承担。

学位论文作者签名: 刘学俐

日期: 2018 年 5 月 2 日

学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，即：学校有权保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅。本人授权华中科技大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。

本论文属于 保密口， 在_____年解密后适用本授权书。
不保密☒。

(请在以上方框内打“√”)

学位论文作者签名: 刘学伟

日期: 2018 年 5 月 2 日

指导教师签名:

日期: 2018 年 5 月 2 日

摘要

制件表面微观形貌和结构质量与其功能特性密切相关。表面形貌测量，对表面质量及其功能特性保证具有重要意义。白光干涉表面形貌测量方法具有非接触、高效率、高精度特点，尤其适用于 MEMS、IC、微纳光学等功能表面的高精度测量。本文主要围绕现有白光干涉测量系统干涉信号对比度低、对垂直扫描采样频率要求高及测量自动化程度不高的缺点，对其光源、表面恢复和自动对焦定位等方面展开研究。主要工作内容如下：

1、设计构建了一套由 RGB 三色组合光源代替白光 LED 光源的照明系统，有效改善了光源光谱分布特性，从而大幅度提高了干涉信号对比度。

2、研究并实现了三色组合光照明下干涉信号的空间频域分析算法，其能在垂直扫描低采样频率的情况下，实现表面形貌的高精度恢复，极大提高了测量效率。

3、研究并比较了几种常用的对焦评价算子，选择出一种不受背景光强变化影响、对干涉条纹敏感的评价算子，进而基于自动对焦扫描算法，实现了轮廓仪快速、准确的自动对焦扫描功能。

4、将三色组合光源、干涉信号空间频率域分析与形貌恢复算法以及自动对焦算法应用于自主开发的光学轮廓仪，并进行实验测试，取得了良好结果。

关键词：表面形貌测量；白光干涉；三色组合光源；空间频域法；自动对焦算法

Abstract

The surface micro-morphology and structural quality of the parts are closely related to their functional properties. The surface topography measurement is of great significance for the surface quality and its functional properties. The white light interference surface topography measurement method has the characteristics of non-contact, high efficiency and high accuracy, and is particularly suitable for high-precision measurement of functional surfaces such as MEMS, IC, and micro-nano optics. This paper focuses on the shortcomings of the existing white light interferometry system, such as low contrast of the interferometric signal, high requirement on the vertical scanning sampling frequency, and low automation of the measurement, and studies on the light source, surface restoration, and autofocus positioning. The main work is as follows:

1. A lighting system with RGB three-color combination light source instead of white LED light source was designed and constructed to effectively improve the spectral distribution characteristics of the light source, thereby greatly improving the contrast of the interference signal.

2. The spatial frequency domain analysis algorithm of the interferometric signal under the three-color combined light illumination is studied and implemented. It can realize the high-precision recovery of the surface topography when scanning the low sampling frequency vertically, which greatly improves the measurement efficiency.

3. Several commonly used focus evaluation operators were studied and compared, and an evaluation operator that was not affected by changes in the background light intensity and sensitive to interference fringes was selected, furthermore, based on the autofocus scanning algorithm, a quick and accurate autofocus scanning function of the profiler is realized.

4. The three-color combined light source, spatial frequency domain analysis of interference signals, topography recovery algorithm and auto-focus algorithm were applied to the self-developed optical profiler, and experimental tests were conducted. Good results were obtained.

华中科技大学硕士学位论文

Key words: Surface topography measurement; White light interference; Three-color combination light source; Spatial frequency domain method; Autofocus algorithm

目 录

摘 要.....	I
Abstract.....	II
目 录.....	IV
1 绪论	1
1.1 课题来源.....	1
1.2 课题研究背景.....	1
1.3 国内外研究概况.....	2
1.4 主要工作.....	5
2 基于三色组合光源的白光干涉光学轮廓仪原理	6
2.1 白光干涉测量原理.....	6
2.2 垂直扫描白光干涉光学轮廓仪整体框架.....	7
2.3 本章小结.....	10
3 三色组合光源优化设计	11
3.1 白光干涉信号建模与仿真.....	11
3.2 组合光源干涉信号仿真分析.....	12
3.3 三色组合光源结构设计及实验测试.....	19
3.4 本章小结.....	24
4 三色组合光源光学轮廓仪表面恢复空间频域算法	25
4.1 传统白光干涉表面形貌恢复算法分析与比较.....	25
4.2 三色组合光源轮廓仪表面恢复空间频域法实现.....	33
4.3 本章小结.....	41

5 自动对焦算法	42
5.1 常用对焦评价算子分析与比较.....	42
5.2 基于灰度方差算子的自动对焦扫描法.....	47
5.3 本章小结.....	49
6 测试实验	50
6.1 与原有白光仪器实验结果对比分析.....	50
6.2 本章小结.....	56
7 总结与展望	57
7.1 全文总结.....	57
7.2 展望.....	58
致谢.....	59
参考文献.....	60
附录 I 攻读硕士期间发表的论文	64

1 绪论

1.1 课题来源

本研究课题是国家重大科学仪器设备开发专项“高端表面形貌测量系列仪器研究与开发”下的一个子课题，其编号为：2011YQ160013。

1.2 课题研究背景

制件表面微观形貌对其结构质量与功能特性而言，是至关重要的^[1]。表面形貌测量，对表面质量及其功能特性的保证具有重要意义。为了满足工程应用的要求，功能表面经常会被设计为特定的表面结构，以利于实际应用^[2]。表面结构与其性能水平密切相关，故对这些功能表面的形貌测量亦是非常重要的，且其测量结果可以作为制造单元的反馈，以提高零件加工工艺水平^[3]。常见功能表面三维形貌如图1-1所示。

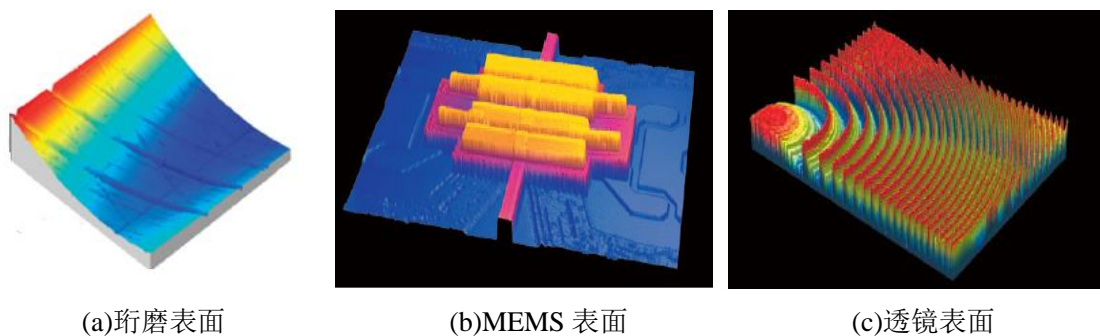


图1-1 不同功能表面三维形貌

最早的表面测量方式主要是通过触针接触式扫描工件表面来测量零件的表面形貌^[4]。在当时，触针接触式二维测量方法主要应用于制造行业，如造船、钢铁厂和汽车制造业等，基本上只需测量一条轮廓线，便可以满足测量要求，但是所获得的信息仅为表面轮廓变化。随着工业技术的不断发展，大量具有高精度表面的机械零件不断进入工程领域，表面形貌测量技术对于光学器件、航空航天、医疗设备、电子等多个领域变得越来越重要。这些新兴行业与传统制造行业不同，因为它们的表面形貌影响表面的功能（液体的流动，光的反射，表面摩擦学等），故对表面测量提出了更高的要求，二维测量已不能满足实际要求，故引出了表面三维形貌测量技

术。由于触针式测量为点扫描方式，若进行三维测量，其效率较低，且触针扫描测量为接触测量，易划伤功能表面，进而影响其性能，不能满足测量要求。所以，光学表面形貌测量仪器^[5-10]紧跟触针仪器出现在工程测量领域，其具有非接触不损伤表面以及面扫描测量速度快等优点。目前已经广泛应用于微电子学、MEMS系统、纳米技术、医疗器械、先进制造和人体工程学等领域。图1-2为三维表面形貌测量的方法及分类。

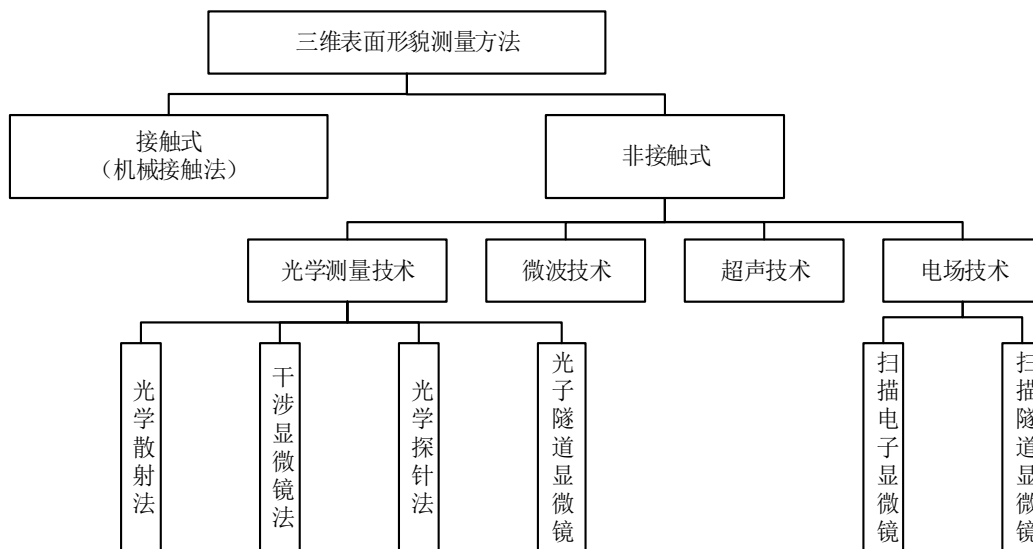


图1-2 三维形貌测量方法及分类

相对于其他的光学测量方法，干涉显微镜系列方法^[11-12]中的垂直扫描白光干涉法越来越受到人们的重视。这是一种非接触、面扫描的测量方式，具有不划伤表面、测量效率高、可测量大范围和不连续性的表面等优势，非常适用于对 MEMS、IC、微纳光学等功能表面进行高精度的测量。本文主要围绕垂直扫描白光干涉方法展开深入的研究，以提高干涉测量系统的整体性能。

1.3 国内外研究概况

早在上个世纪，白光干涉法^[13-20]就已经出现在表面形貌测量的领域中了。1881年，由美国物理学家 Michelson 研制出第一台迈克尔逊干涉仪，其光路结构如图 1-3(a)所示。1987 年，Davidson 在迈克尔逊干涉仪结构的基础上，利用 Linnik 结构，研制出一种新型的白光干涉显微结构，其光路结构如图 1-3(b)所示。1990 年，由美国斯坦福大学的 G.S.Kino 等研究人员对现有的分光路干涉结构做了进一步的改进，研制出一种新型共光路结构的 Mirau 物镜，其光路结构如图 1-3(c)所示。Mirau 干涉显微镜为共光路结构，其避免了分光路系统不必要的误差，提高了测量精度，而且其结

构得到了大大的简化，模块集成程度亦大大的提高，进而，增强了干涉显微镜模块的抗振动干扰能力。自 Mirau 干涉显微物镜出现之后，白光干涉表面测量仪器的开发与研究进入了飞速发展的阶段。

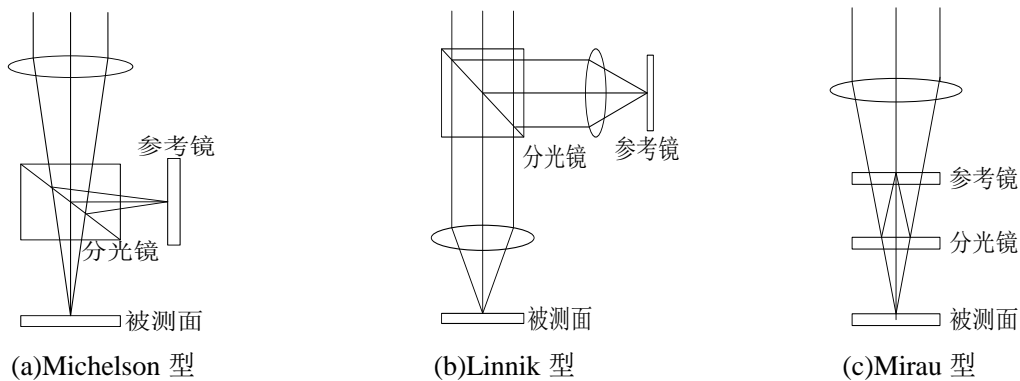


图 1-3 干涉显微镜光路结构及分类

目前，应用较为广泛的白光干涉仪是基于 Mirau 干涉法和 PZT 驱动式进行结构设计的，如图 1-4 所示。但是由于 PZT 驱动范围的限制，不能满足于某些工件对大量程测量的要求。为满足某些工件（如：大尺寸台阶、沟槽等）对大量程测量的需求，国内外均在进行着相关研究与干涉仪器的开发。

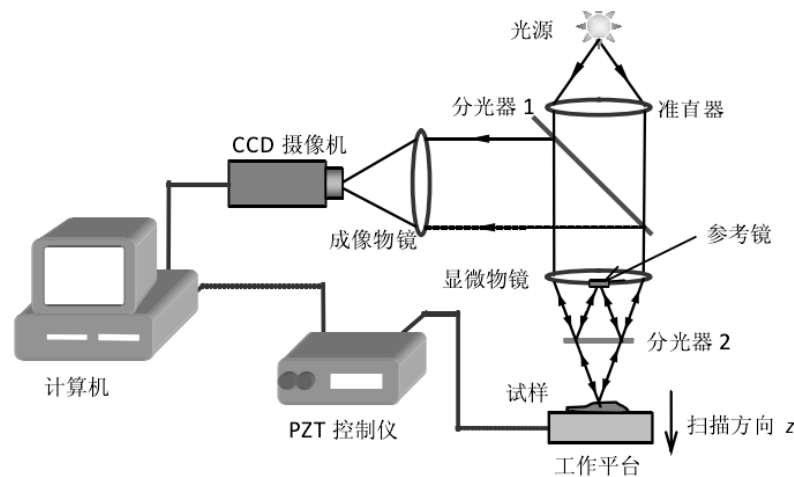


图 1-4 典型的白光干涉测量系统

国外很多测量仪器公司已经在相关领域进行了多年的研究，并且生产出了系列商品化的白光干涉仪器。例如美国 Veeco 仪器公司研发的 Wyko NT9080 光学轮廓测量系统、美国 Zygo 仪器公司研发的 Newview 6000 表面轮廓仪、英国 Taylor-Hobson 仪器公司研发的 CCI 工艺光学轮廓仪等，其中 Wyko NT 9800 光学轮廓测量仪器如图 1-5 所示。这些在垂直方向的测量范围可达十几个毫米，且在垂直方向上具有 0.1nm 级的分辨率。这些国外仪器不仅技术成熟，而且具有较高测量精度。但是其

价格非常昂贵，每台仪器售价高达 100 多万元人民币，另一方面是在应用上不够灵活，不能适应用户个性化的需求，且操作复杂。所以，这类国外商用仪器不能满足国内企业的普遍性需求。



图 1-5 Wyko NT 9080 光学轮廓测量仪

国内的一些科研院所和高校也在对白光干涉仪做一些实质性的研究。其中，由华中科技大学在国家重大科学仪器设备开发专项中独立研制的垂直扫描白光干涉仪已取得了产业化的成果^[21-23]，如图 1-6 所示。其垂直测量范围达到 4mm，垂直方向分辨率达到 1nm 级。但是其测量精度和测量效率均落后于国外商用仪器，所以，现有白光垂直扫描干涉测量系统仍有待进一步优化和完善。

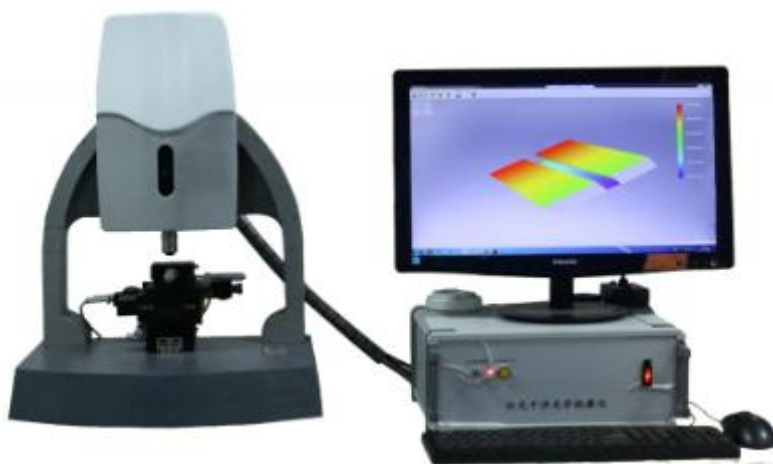


图 1-6 垂直扫描白光干涉轮廓仪

1.4 主要工作

本文主要围绕现有白光垂直扫描干涉测量系统干涉信号对比度低、对垂直扫描采样频率要求高及测量自动化程度不高的缺点，对其光源、表面恢复和自动对焦定位等方面展开研究。主要工作内容如下：

1、设计构建了一套由 RGB 三色组合光源代替白光 LED 光源的照明系统，有效改善了光源光谱分布特性，从而大幅度提高了干涉信号对比度。

2、研究并实现了三色组合光照明下干涉信号的空间频域分析算法，其能在垂直扫描低采样频率的情况下，实现表面形貌的高精度恢复，极大提高了测量效率。

3、研究并比较了几种常用的对焦评价算子，选择出一种不受背景光强变化影响、对干涉条纹敏感的评价算子，进而基于自动对焦扫描算法，实现了轮廓仪快速、准确的自动对焦扫描功能。

4、将三色组合光源、干涉信号空间频率域分析与形貌恢复算法以及自动对焦算法应用于自主开发的光学轮廓仪，并进行实验测试，取得了良好结果。

2 基于三色组合光源的白光干涉光学轮廓仪原理

本章主要介绍白光干涉测量基本原理，并对垂直扫描白光干涉轮廓仪的整体结构框架和工作原理进行阐述。

2.1 白光干涉测量原理

由于白光光源的光谱宽，相干长度小，故干涉条纹仅出现在光程差极小的范围内，因此本研究利用白光的干涉特性来进行表面微观形貌的测量。白光含有多个波长的单色光，因此白光干涉条纹是由多个波长的单色光干涉条纹非相干叠加而成^[24]。当光程差等于零时，不同波长光的条纹峰值完全重合，各单色光干涉条纹峰值非相干叠加形成白光干涉对比度最大的零级亮条纹，该位置即为各单色光干涉条纹相位相一致的点。随光程差的增加，不同波长单色光干涉的明暗条纹会相互错开，导致干涉条纹的亮度会逐渐下降，直至干涉条纹消失不见。图 2.1 所示为白光干涉光强-光程差变化曲线。

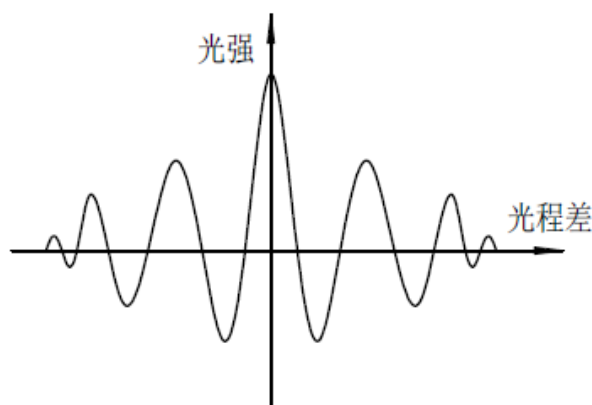


图 2-1 白光干涉光强-光程差变化曲线

由图 2-1 光强-光程差变化曲线可知，白光干涉条纹的对比度会随着光程差的变化而变化，当光程差为零的时候，出现零级条纹即亮度最大点，且次级条纹亮度明显低于零级条纹。因此这一白光干涉特性亦为零光程差点位置的寻找提供了基础。如图 2-2 是白光干涉法的原理图^[25]，Mirau 干涉物镜沿着垂直方向，向下扫描台阶样件，现取被测表面上高度不相同的两个点，并绘制扫描过程中的光强-光程差变化曲线，如图 2-2 中(b)所示，两曲线所对应的峰值位置在垂直方向上的差值 Z_1-Z_2 ，即为所取被测表面上两点的高度之差。

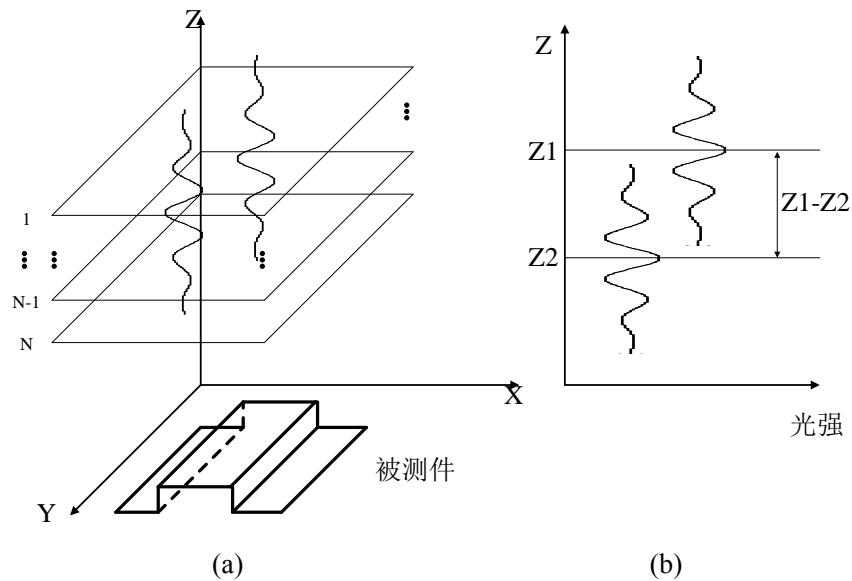


图 2-2 白光干涉法原理图

2.2 垂直扫描白光干涉光学轮廓仪整体框架

垂直扫描白光干涉光学轮廓仪整体框架如图 2-3 所示，包括光学干涉显微系统、伺服驱动系统、激光干涉计量系统、高速 CCD 及计算机处理系统等组成。

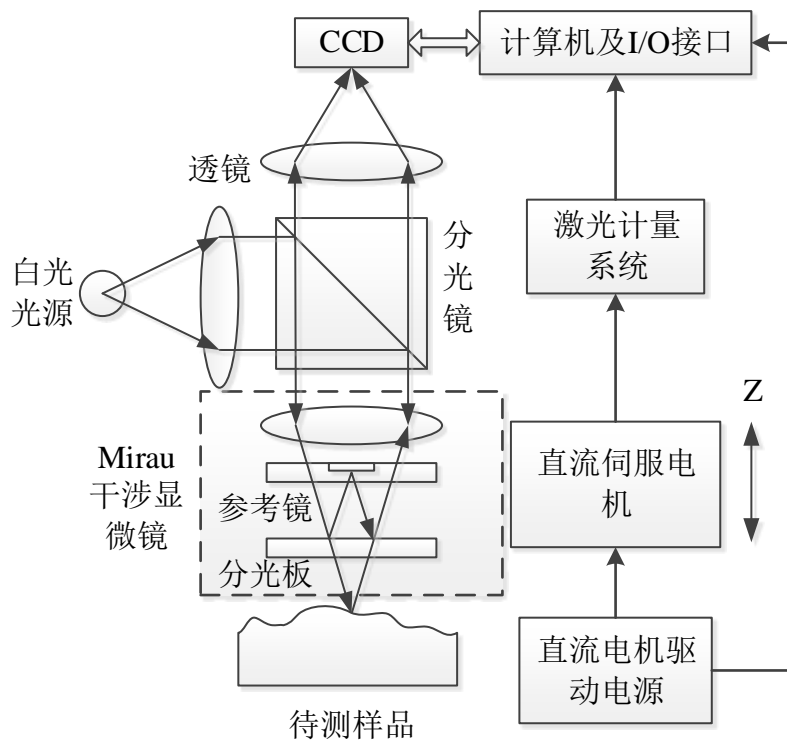


图 2-3 垂直扫描白光干涉光学轮廓仪整体框架图

垂直扫描白光干涉光学轮廓仪是利用白光 LED 光源照明，由光源发出的点光束通过分光棱镜照射进干涉显微物镜中，图 2-3 中所示的 Mirau 型物镜具有分束元件，该分光元件将光束的一部分反射到参考反射镜，而另一部分光束透射到物体。从物体和基准反射的两束光被重新组合并投射到高速 CCD 上，其产生与由干涉效应产生的合成光束强度成比例的信号，并通过合适的表面形貌恢复算法对被测样件表面高度信息进行恢复，进而得到样件表面微观形貌。

2.2.1 基于激光计量的连续垂直扫描方法

为提高白光干涉光学轮廓仪垂直扫描的测量效率，该系统选用了一种基于激光计量和伺服连续驱动的大范围形貌测量系统。该系统所采用方案是：直流伺服电机驱动光学干涉单元垂直扫描和基于激光计量外触发的 CCD 动态曝光相结合的白光干涉扫描测量方法。

该方案扫描方式与压电驱动扫描模式不同，如图 2-4 所示，传统压电式垂直扫描方式为步进和采集图像循环进行，其步进扫描和采集图像的时间不能复用。使得压电式垂直扫描测量方法的效率相对较低，不能达到对毫米级样件实现高速测量的需求。本文主要研究基于激光计量的连续垂直扫描和动态曝光方法，当直流伺服电机自上而下垂直扫描时，每到达所设定的等间距位置时，高速 CCD 进行动态曝光，即利用伺服高速连续垂直扫描和 CCD 曝光的时间复用，实现高效率的大范围表面形貌测量。所采集到干涉图像拍照位置是否准确性，直接影响到样件三维表面形貌恢复的精度，为保证相邻图片之间等距，本系统采用激光干涉计量系统监测垂直扫描过程中的位移量，当到达等距位置时，外触发高速 CCD 采集图像，以保证高速扫描过程中曝光位置的稳定性和准确性。

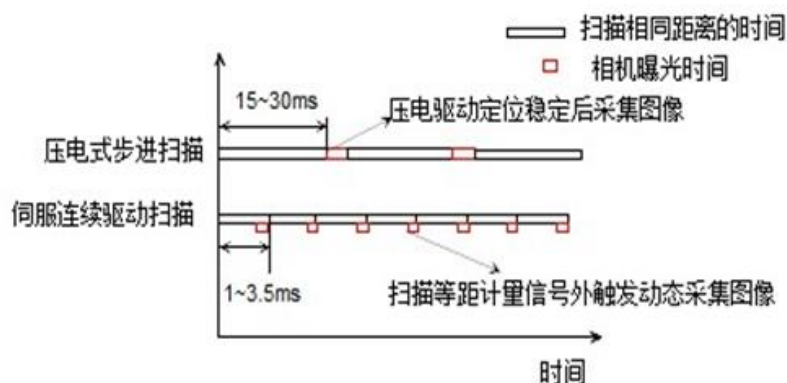


图 2-4 伺服连续驱动和动态曝光图像采集原理图

2.2.2 基本测量方案

首先打开控制箱电源,打开白光软件,调节白光光源的光强,通过直流电机上下调节光学干涉显微系统的位置,直到在相机 CCD 视场中出现清晰的干涉条纹,并依据具体的测试样品设定合适的扫描长度。然后利用计算机及 I/O 接口驱动伺服电机并结合减速机构,带动光学干涉显微系统自上而下进行连续垂直扫描,在扫描过程中,通过激光干涉计量系统实现对扫描位置的实时监控,每到达所设定的扫描间距时,外触发高速 CCD 获取动态曝光干涉图,完成扫描并获得一个干涉图序列。将所采集到的干涉图序列均转换为数字矩阵,存储到计算机固态硬盘中。最后,采用合适的三维形貌恢复算法,对所采集到的干涉条纹图序列进行处理,以恢复被测样品表面的三维形貌。然后可以在三维显示软件中对所测得结果进行相应的分析、滤波与评定,并导出报表文件,测量分析结束后,关闭系统。

现选取一单刻线标准样板($H=1.2\mu m$)干涉图序列,如图2-5(b)所示。现取系列干涉图上一像素点(240,320),绘制其光强-图幅序列曲线图,如图2-5(a)所示。并通过合适的表面形貌恢复算法对被测样件表面高度信息进行恢复,进而得到样件表面微观形貌,其恢复结果如图2-6所示。

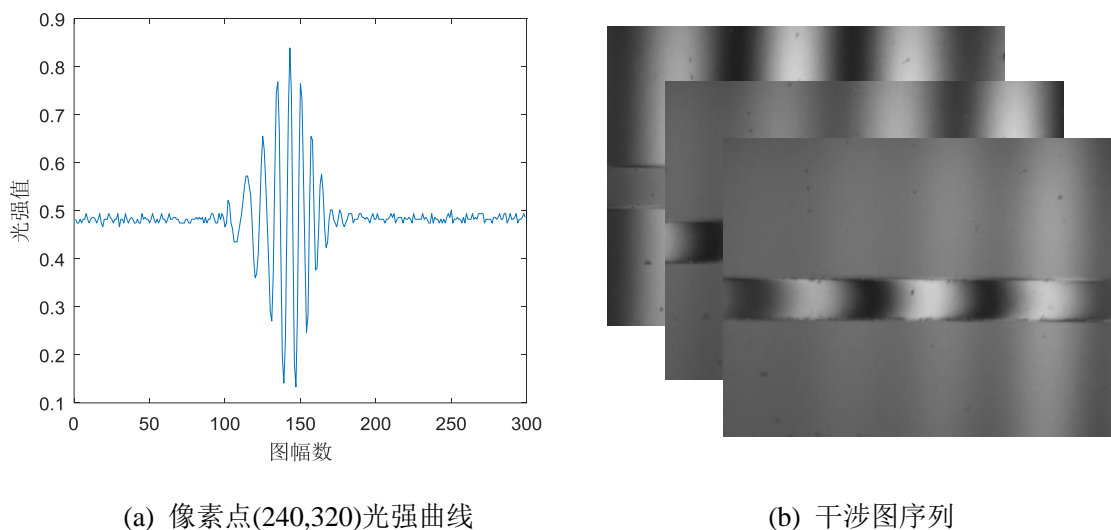


图 2-5 像素点(240,320)光强曲线图与干涉图序列

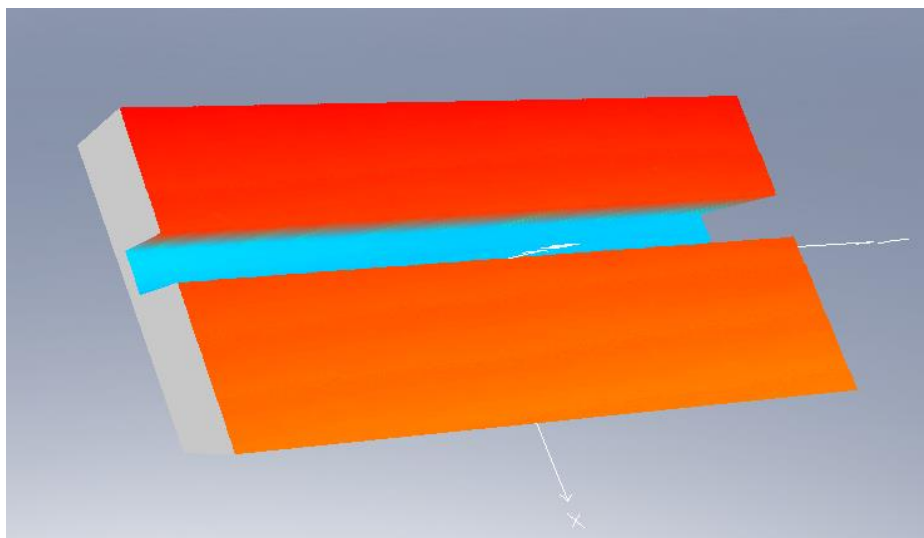


图 2-6 单刻线标准样板三维表面微观形貌图

2.3 本章小结

本章主要介绍了白光干涉及表面形貌测量的基本原理，并对垂直扫描白光干涉光学轮廓仪的整体框架、基于激光计量的连续垂直扫描方法以及基本测量方案进行了详细的阐述。

3 三色组合光源优化设计

在垂直扫描白光干涉轮廓仪中,白光 LED 光源的光谱分布特性决定着其干涉信号的质量,对干涉零级条纹的提取产生很大的影响。一般利用多个 LED 光源构成组合光源来改变光源的光谱形状,以提高零级条纹对比度。本章针对现有白光干涉测量系统干涉信号对比度低这一缺点,设计一套由 RGB 三色组合光源代替白光 LED 光源的照明系统,以改善白光 LED 光源光谱分布特性,提高干涉信号对比度。主要从三色组合光源干涉信号和光源结构设计两个方面展开研究。

3.1 白光干涉信号建模与仿真

白光干涉仪器进行等间距垂直扫描,并利用高速相机采集一系列白光干涉图。一般选取白光干涉图序列上的一个像素点(x,y),可以得到一系列的光强值,便可绘制出光程差-光强曲线,即像素点(x,y)的干涉信号。一般通过建立干涉信号的数学模型来进行白光干涉的理论研究。

我们一般认为,白光干涉表面形貌测量系统的干涉信号是由低相干光源干涉产生的一个时域调制波,其载波是一个余弦函数,包络是一个高斯函数。对其做归一化处理,可得到该白光干涉信号模型^[26]为

$$I(z) = \exp\left[-\frac{\pi^2}{2}\left(\frac{z}{L_c}\right)^2\right] \cos(2\pi z / \lambda) \quad (3-1)$$

其中, z 为光程差; λ 为波长; $L_c = \lambda^2 / \Delta\lambda$ 为相干长度, $\Delta\lambda$ 为低相干光源的光谱宽度。

由于白光干涉仪在垂直扫描过程中,所获得的干涉信号不仅受光程差单方面的影响,而且还受到干涉物镜数值孔径 NA 值的大小、因参考镜和被测表面反射率不同而引起参考光和测量光存在相位差以及高速 CCD 成像系统的光学传输函数等因素的影响。而干涉信号模型(3-1)式忽略了干涉物镜数值孔径 NA 值,且该模型不适用于光谱形状不规则的白光光源。

故提出一种新型的白光干涉信号数学模型^[27],如式(3-2)所示,该模型全面考虑了实际测量过程中影响白光干涉信号的因素^[28-29]。干涉物镜数值孔径 NA 值、参考光和测量光存在相位差、白光光源的光谱等均能利用该模型进行相应的仿真。

$$I(z) = A \int_{band} \int_0^{\theta_0} \left\{ k^2 \cos[2k(z - z_0) \cos \theta + \phi] \sin \theta \cos \theta d\theta \right\} F(k) dk \quad (3-2)$$

其中, A 为常系数, 受光强大小的影响; z 为光学干涉单元垂直扫描的位置; z_0 为样件表面测量的初始高度; k 为波数, $k = 2\pi/\lambda$; $F(k)$ 为光源的光谱分布函数; $\sin \theta_0$ 为干涉物镜的数值孔径, $\sin \theta_0 = NA$; ϕ 为参考光与测量光的相位差。

由以上分析可知, 数学模型(3-2)全面考虑了实际测量过程中影响白光干涉信号的因素, 能够更加真实的仿真出实测白光干涉信号。故选用该模型对白光干涉信号进行仿真分析。干涉显微镜选用 20 倍的 Nikon Mirau 显微镜($NA=0.4$), 然后对数学模型(3-2)进公式推导, 得出干涉信号的表达式。通过计算机仿真得到的白光 LED 干涉信号如图 3-1 所示。

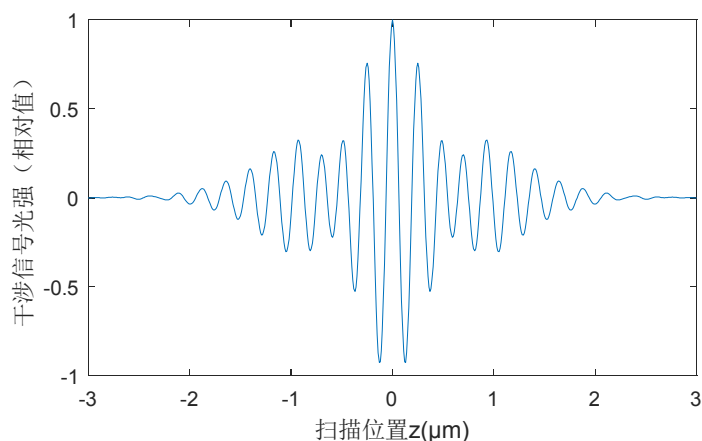


图 3-1 计算机仿真的白光 LED 干涉信号图

3.2 组合光源干涉信号仿真分析

测量系统采用连续垂直扫描、相机动态曝光采集图像的测量模式, 其与步进式测量相比, 提高了测量效率, 但 CCD 获得的光强为动态积分光强, 使得所采集图像干涉条纹对比度降低, 影响到所恢复表面信息的准确性。因此, 提高测量光与参考光干涉信号的调制度, 成为该研究的一个关键性问题。在实际的应用中, 一般采用组合光源的方式来改善光源光谱的分布形状, 并通过优化光源参数以提高图像干涉条纹对比度。组合光源是采用两或三个低相干光源组合的方式照明, 且光源互不相干。

3.2.1 组合光源原理

为了便于评价干涉信号的好坏,提出了零级条纹对比度 V 这一概念^[30],即零级干涉条纹强度 $I(0)$ 和次零级干涉条纹强度 $I(\lambda)$ 之差与零级干涉条纹强度 $I(0)$ 的比值,定义式为

$$V = 1 - \frac{I(\lambda)}{I(0)} \quad (3-3)$$

由式(3-3)易知,零级干涉条纹强度 $I(0)$ 和次零级干涉条纹强度 $I(\lambda)$ 的差值越大,零级条纹对比度 V 越大,即干涉信号的调制度越大,干涉信号就越好。

为方便分析,将单色光干涉条纹的分布函数简化为

$$I(x) = I_0 [1 + \cos(2\pi x/\lambda)] \quad (3-4)$$

其中, I_0 为背景光强; λ 为该单色光的波长; x 为光程差。

剔除单色光信号模型中的直流部分,即背景光强。干涉信号的交流部分可表示为

$$I_{ac}(x) = \cos(2\pi x/\lambda) \quad (3-5)$$

1) 单光源照明方式

当照明所用的光源光谱分布为高斯型曲线时,干涉信号模型可表示为式(3-1)。由(3-3)可得

$$V = 1 - \exp\left[-\frac{\pi^2}{2}\left(\frac{\lambda}{L_c}\right)^2\right] \quad (3-6)$$

由上式可知 $V > 0$,但是,由于零级条纹与次零级条纹的强度之差很小,即零级条纹对比度 V 值很小。例如选取波长为 $\lambda = 638nm$,相干长度为 $L_c = 25\mu m$ 的低相干光源进行仿真,该单色光源照明的干涉信号仿真如图 3-2 所示,将光源参数代入式(3-6)可得 $V = 0.0052$,即零级条纹与次零级条纹的强度之差千分之五,由于实际测量的过程中,白光干涉信号受到诸多因素的影响,导致 V 几乎等于零。通常采用组合光源的方式来改善光源光谱分布,并通过优化光源参数以提高干涉条纹对比度。

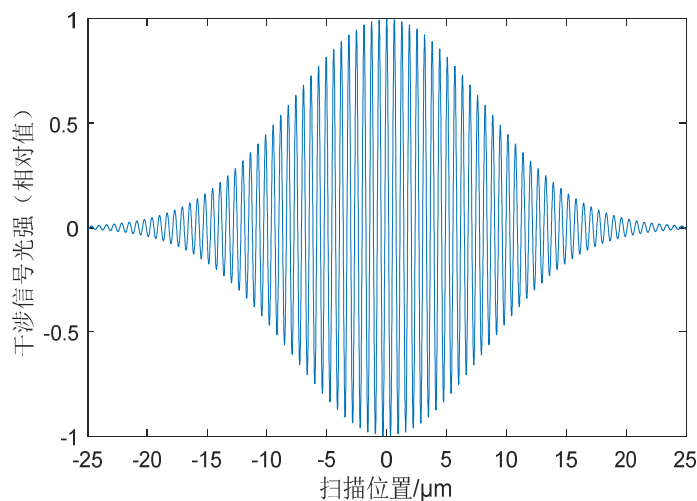


图 3-2 单光源照明干涉信号仿真图

2) 两光源组合照明方式

现选用波长分别为 λ_1 、 λ_2 ($\lambda_1 > \lambda_2$) 两个高斯调制的光源组合照明, 由光干涉的三个要素可知, 两光源互不相干, 其干涉信号即为两光源干涉信号的非相干叠加, 故两色组合光源干涉信号为

$$I_{ac}(z) = \exp\left[-\frac{\pi^2}{2}\left(\frac{z}{L_{c1}}\right)^2\right] \cos(2\pi z / \lambda_1) + \exp\left[-\frac{\pi^2}{2}\left(\frac{z}{L_{c2}}\right)^2\right] \cos(2\pi z / \lambda_2) \quad (3-7)$$

其中 $\lambda_1, L_{c1}; \lambda_2, L_{c2}$ 分别为两照明光源的波长和相干长度, 设 $L_{c1} = L_{c2} = L_c$, 并将 L_c 代入到公式(3-7)中, 可得

$$I_{ac}(z) = 2 \exp\left[-\frac{\pi^2}{2}\left(\frac{z}{L_c}\right)^2\right] \cos(2\pi z / \lambda_b) \cos(2\pi z / \lambda_a) \quad (3-8)$$

其中 $\lambda_a = \frac{2\lambda_1\lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2}$, $\lambda_b = \frac{2\lambda_1\lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_2}$, 显然可得, 零级干涉条纹的光强为 $I_{ac}(0) = 2$,

次零级干涉条纹的光强为

$$I_{ac}(\lambda_a) = 2 \exp\left[-\frac{\pi^2}{2}\left(\frac{\lambda_a}{L_c}\right)^2\right] \cos(2\pi\lambda_a / \lambda_b) \quad (3-9)$$

因为当 L_c 较大时, 有 $\exp\left[-\frac{\pi^2}{2}\left(\frac{\lambda_a}{L_c}\right)^2\right] \approx 1$, 故式(3-9)可化简为

$$I_{ac}(\lambda_a) = 2 \cos(2\pi\lambda_a / \lambda_b) \quad (3-10)$$

将 $I_{ac}(0)$ 和 $I_{ac}(\lambda_a)$ 代入式(3-3)，可得零级条纹对比度为

$$V = 1 - \cos(2\pi\lambda_a / \lambda_b) \quad (3-11)$$

在合理的范围内优化光源参数，以提高白光垂直扫描干涉条纹图的质量，即在保证 $\cos(2\pi\lambda_a / \lambda_b)$ 不为零的前提下，保证 V 值尽量大，即在满足式(3-12)的前提下，尽量增大两光源的中心波长之差。

$$\lambda_1 \leq \frac{5}{3} \lambda_2 \quad (3-12)$$

现选用波长为 $\lambda_1 = 638nm$ 、 $\lambda_2 = 455nm$ 的两光源，设其相干长度 $L_c = 25\mu m$ ，该两组合光源照明干涉信号仿真如图 3-3 所示，则可得零级条纹对比度 $V = 0.4893$ ，该结果与由单光源照明的干涉信号相比，大幅度提高了零级条纹对比度 V ，即提高了所获得干涉条纹图的对比度。

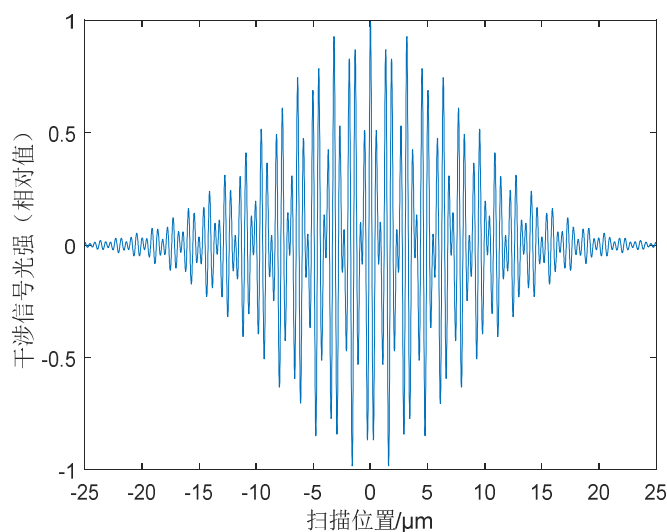


图 3-3 两组合光源照明干涉信号仿真图

3) 三光源组合照明方式

现选用波长分别为 λ_1 、 λ_2 、 λ_3 三个高斯调制的光源组合照明，其干涉信号即为三光源干涉信号的非相干叠加，首先设 $k_1 > k_2 > k_3$, $k_i = 2\pi / \lambda_i$ ($i=1,2,3$), $k = 1/2(k_1 + k_3)$, $\Delta k = 1/2(k_1 - k_3)$, $\Delta k' = k_2 - k$, $L_{c1} = L_{c2} = L_{c3} = L_c$ ，则可简化三色组合光

源干涉信号为

$$I_{ac}(x) = \exp\left[-\frac{\pi^2}{2}\left(\frac{x}{L_c}\right)^2\right](\cos k_1 x + \cos k_2 x + \cos k_3 x) =$$

$$\exp\left[-\frac{\pi^2}{2}\left(\frac{x}{L_c}\right)^2\right][4\cos^2 \Delta k x + 4\cos \Delta k x \cos \Delta k' x + 1]^{1/2} \cos(kx + \varphi(x)) \quad (3-13)$$

$$\text{其中 } \varphi(x) = \operatorname{tg}^{-1} \frac{\sin \Delta k' x}{2\cos \Delta k x + \cos \Delta k' x}。$$

由式(3-13)可得，三色组合光源零级干涉条纹光强度为 $I_{ac}(0) = 3$ ，次零级干涉条纹光强度为

$$I_{ac}\left(\frac{2\pi}{k}\right) = \sqrt{4\cos^2 2\pi \frac{\Delta k}{k} + 4\cos 2\pi \frac{\Delta k}{k} \cos 2\pi \frac{\Delta k'}{k} + 1} \quad (3-14)$$

将 $I_{ac}(0)$ 和 $I_{ac}\left(\frac{2\pi}{k}\right)$ 代入公式(3-3)，可得三组合光源的零级条纹对比度为

$$V = 1 - \frac{1}{3} \sqrt{4\cos^2 2\pi \frac{\Delta k}{k} + 4\cos 2\pi \frac{\Delta k}{k} \cos 2\pi \frac{\Delta k'}{k} + 1} \quad (3-15)$$

为保证 V 值尽可能大，且 λ_1 、 λ_2 、 λ_3 为合理的光源参数，可得其关系为

$$\lambda_2 = \frac{4\lambda_1}{3}, \lambda_3 = 2\lambda_1 \quad (3-16)$$

故需尽量保证三光源的波长 λ_1 、 λ_2 、 λ_3 满足关系式(3-16)，以获得最佳的零级条纹对比度 V ，例如，选用波长分别为 $\lambda_1 = 638nm$ 、 $\lambda_2 = 517nm$ 、 $\lambda_3 = 455nm$ 的三个光源，设其相干长度 $L_c = 25\mu m$ ，该三组合光源照明干涉信号仿真如图 3-4 所示，则可得零级条纹对比度 $V = 0.7854$ ，显然，结果明显优于单光源与两组合光源照明的情况，极大的提高了零级条纹对比度 V 值，故干涉条纹图的质量得到了很大程度上的优化。

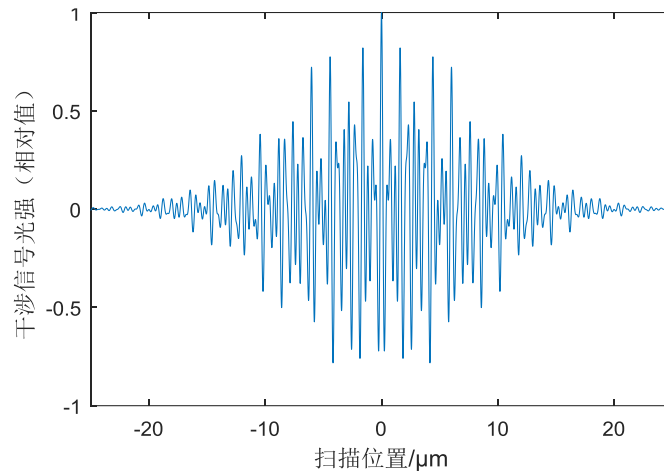


图 3-4 三组合光源照明干涉信号仿真图

由以上理论分析可知，三组合光源照明下的干涉信号零级条纹对比度最大，故该测量系统选用三组合光源的照明方式，以提高所恢复表面信息的准确性。

3.2.2 三色组合光源仿真分析与比较

通过上一节对组合光源原理的分析，可知组合光源照明方式大幅度提高了零级条纹对比度，结合实际光源的参数，选用 RGB 三色白光源进行仿真分析，以获得组合光源零级条纹对比度 V 值，并进行结果对比分析。所选光源参数如表 3-1 所示。

表 3-1 RGB 三色光源参数

光源	波长 λ / nm	光谱宽度 $\Delta\lambda / nm$	相干长度 $L_c / \mu m$
红光 LED	638.4	16.2	25
绿光 LED	517.5	33.1	8.1
蓝光 LED	454.6	25.6	8.1

以下对所选的 RGB 三色光源进行干涉信号仿真分析。

1) 单光源照明仿真分析

表 3-1 中三个白光源的光谱分布均为高斯型曲线，所以其干涉信号模型可表示为式(3-1)，利用 matlab 对三光源分别进行仿真可得，图 3-5 所示为红光 LED 仿真干涉信号，图 3-6 所示为绿光 LED 仿真干涉信号，图 3-7 所示为蓝光 LED 仿真干涉信号。

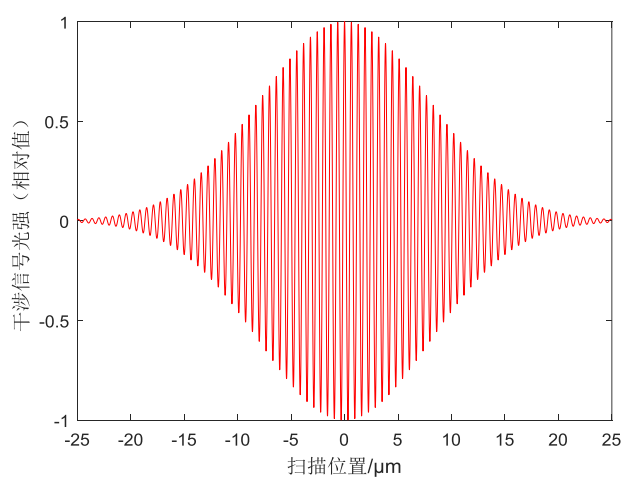


图 3-5 红光 LED 干涉信号仿真图

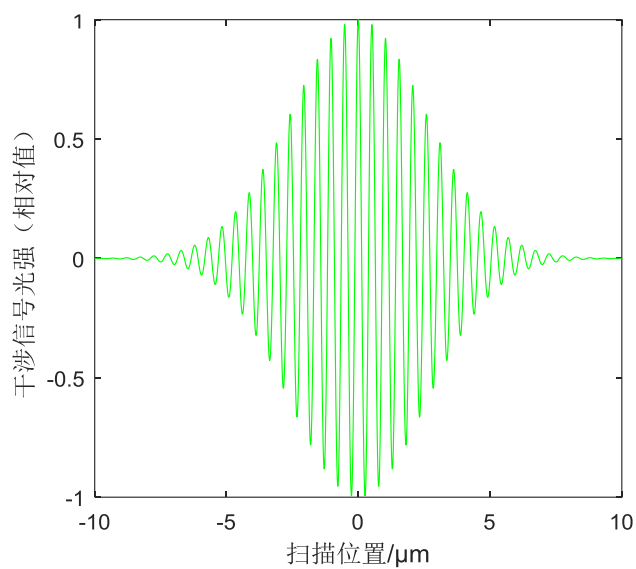


图 3-6 绿光 LED 干涉信号仿真图

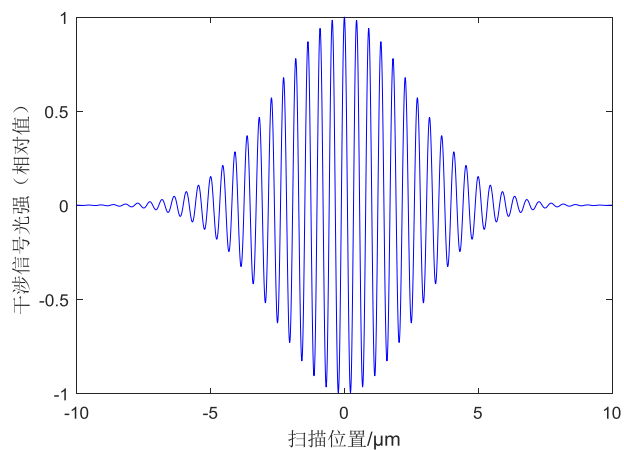


图 3-7 蓝光 LED 干涉信号仿真图

由 RGB 三色光源的干涉信号仿真图可得，三个光源零级条纹对比度分别为： $V_R = 0.0036$ ， $V_G = 0.0209$ ， $V_B = 0.0175$ 。由于在实际测量中，干涉信号会受到系统振动等多方面的影响，导致 $V_R = V_G = V_B \approx 0$ 。

2) 三色组合光源照明仿真分析

由上一节分析可知，当选用波长分别为 λ_1 、 λ_2 、 λ_3 的三个光源做组合光源照明时，三光源中心波长关系应尽量满足式 $\lambda_2 = \frac{4\lambda_1}{3}$ ， $\lambda_3 = 2\lambda_1$ 。本系统选择用红光 LED、绿光 LED 和蓝光 LED 组合照明，因为三光源互不相干涉，所以其干涉信号为三个白光光源干涉信号的非相干叠加。三色组合光源干涉信号仿真如图 3-8 所示。

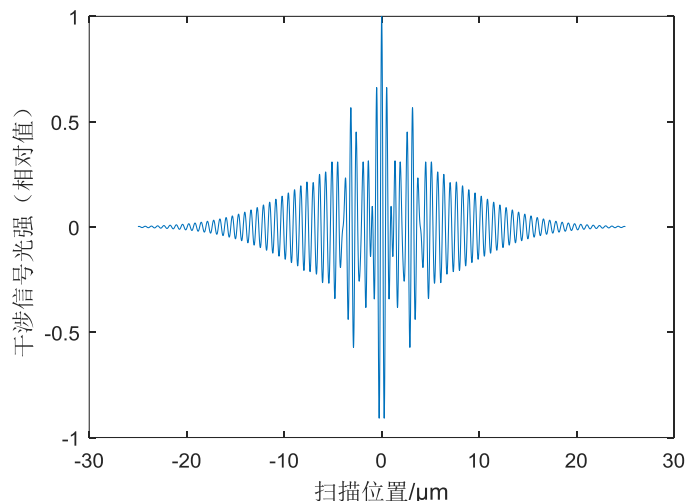


图 3-8 三色组合光源干涉信号仿真图

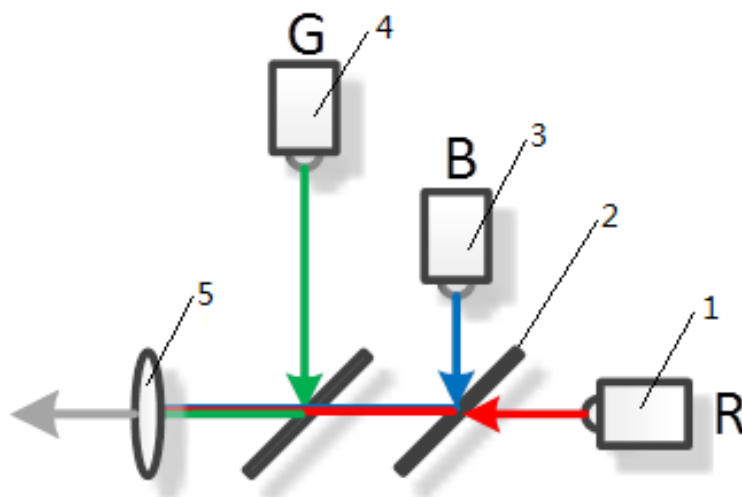
由三色组合光源的干涉信号仿真图可得，其零级条纹对比度为 $V_{RGB} = 0.3683$ ，由图 3-1 所示计算机仿真的白光干涉信号图可得，白光零级条纹对比度为 $V = 0.2431$ 。计算可得，三色组合光源的零级条纹对比度相较白光 LED 单光源照明提高了 52%，大幅度提高了干涉信号的抗干扰能力，进而证明了三色组合光源照明方式在实际应用上的优势。

3.3 三色组合光源结构设计及实验测试

由以上分析可知，三色组合光源的应用，提升了轮廓仪系统的整体性能。虽然大幅度提高了干涉图的质量。但同时也给干涉模块的准直带来了困难。所以三色组合光源的光路及机械结构的设计合理性，直接影响到测量结果的准确性。

3.3.1 光路结构设计

该光路设计的目的，是将 RGB 光源三路合光，且保证光路易于调整。光路结构示意图如图 3-9 所示。



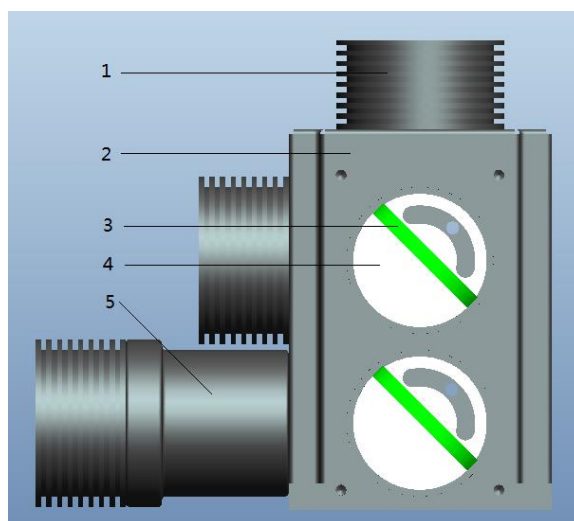
1-红光 LED 2-分光平片 3-蓝光 LED 4-绿光 LED 5-平凸透镜

图 3-9 三色组合光源光路结构示意图

如图 3-9 所示光路示意图中，三个光源分别选用红光 LED($GT-P04R1410140$)，绿光 LED($GT-P04G6410160$)和蓝光 LED($GT-P04B3410110$)，两个普通分光平片($GCC-411102$)其参数为波长 $\lambda=450-650nm$ ，直径为 $\phi=25.4mm$ 。一个 K9 平凸透镜($PCX0806$)其焦距 $f=75mm$ ，直径 $\phi=25.4mm$ 。两分光平片的作用是将 RGB 三路光进行合光，可通过旋转分光平片角度，来进行光路的调整（为便于光路调整及安装固定，选用分光平片而未用分光棱镜）。RGB 三个光源发出的点光束利用两个分光平片，实现三路合光，经过平凸透镜后变成平行光并打入干涉模块。其中，因为平凸透镜的焦距 $f=75mm$ ，故需保证三个点光源距透镜的距离相等且等于 $75mm$ ，通过调节 RGB 三光源功率，来保证三色光 1:1:1 整合。

3.3.2 机械结构设计

依据光路结构，设计出三色组合光源的机械结构，如图 3-10 所示。



1-光源固定支架 2-干涉镜筒 3-分光平片 4-分光片调节架 5-光源套筒

图 3-10 三色组合光源机械结构图

三色组合光源机械结构如图 3-10 所示，其中，RGB 三个光源均固定在光源固定支架上，分光平片用虫胶粘在分光片调节架上，可以通过转动调节架来调整分光平片的角度，光源套筒的作用是保证三个光源距透镜的距离相等。通过调整光路及三色光源的光强，实现三色光(光强度 1:1:1)聚合。

干涉模块整体机械结构如图 3-11 所示。

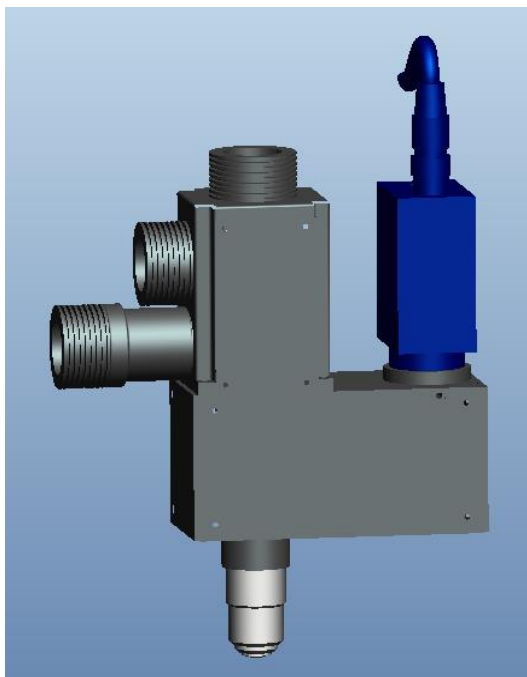
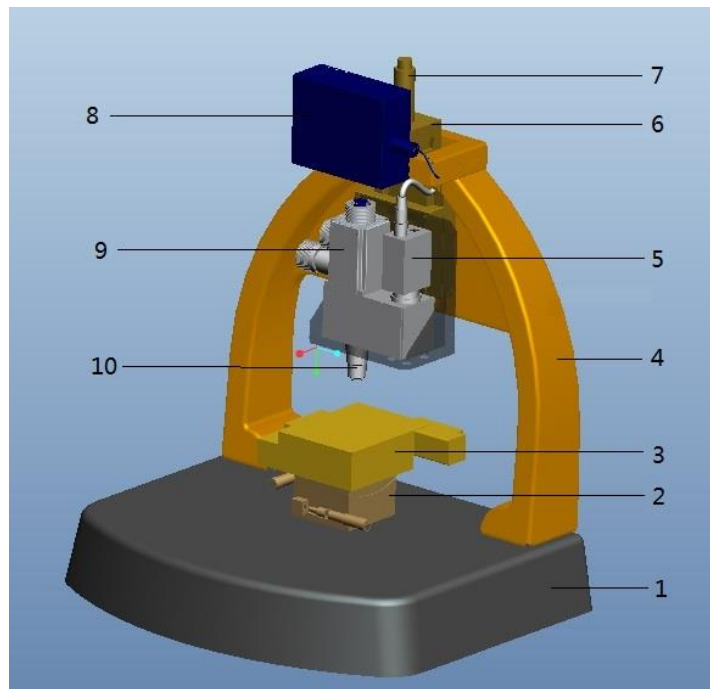


图 3-11 干涉模块整体机械结构图

依据图 2-3 所示的垂直扫描白光干涉光学轮廓仪整体框架图，对三色组合光源光学轮廓仪整体机械结构进行设计，其整体结构如图 3-11 所示，主要包括：底座、调角器、二维工作台、龙门支架、高速 CCD、Z 轴工作台、直流伺服电机、激光干涉计量系统、三色组合光源以及 Mirau 干涉物镜等组成，具体装配位置如图 3-12 中所示。



1- 底座 2-调角器 3-二维工作台 4-龙门支架 5-高速 CCD 6-Z 轴工作台
7-直流伺服电机 8-激光干涉计量系统 9-三色组合光源 10-Mirau 干涉物镜

图 3-12 三色组合光源光学轮廓仪机械结构图

3.3.3 实验测试分析

现分别采用白光 LED 光源和 RGB 三色组合光源对样件表面进行连续垂直扫描测量，并将所测得的结果进行对比分析。白光 LED 实测干涉信号如图 3-13 所示，RGB 三色组合光源实测干涉信号如图 3-14 所示。

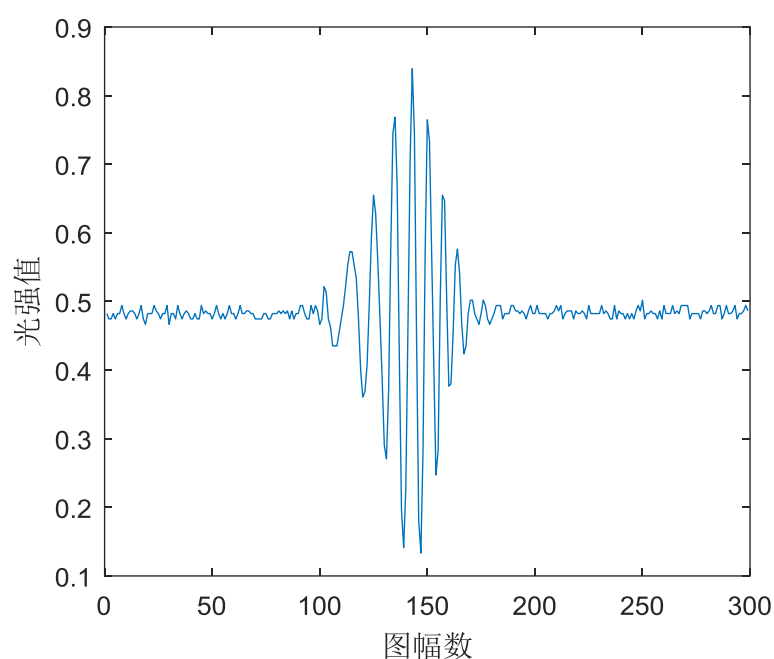


图 3-13 实测白光 LED 干涉信号

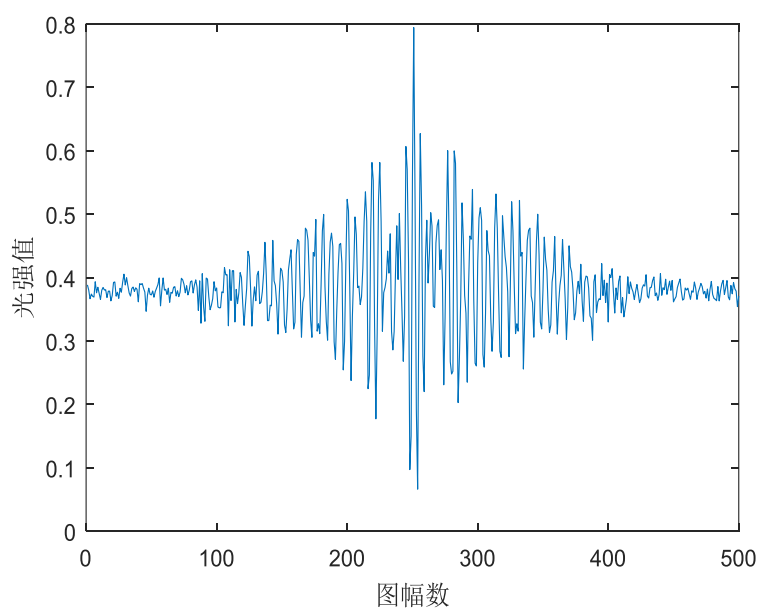


图 3-14 实测三色组合光源干涉信号

将图 3-13 和图 3-14 分别与计算机仿真的白光干涉信号图(图 3-1)和三色组合光源干涉信号仿真图(图 3-8)作比较,发现实测干涉信号与仿真干涉信号有较高的匹配度。两种光源结果比较如表 3-2 所示。

表 3-2 两种光源结果比较

类型	仿真结果	实测结果
白光光源	$V = 0.2431$	$V = 0.1247$
三色组合光源	$V = 0.3683$	$V = 0.2053$

由表 3-2 结果分析可知，在实际测量过程中，干涉信号由于受到系统振动、光照不均等干扰的影响，导致其明显低于仿真干涉信号零级条纹对比度。从实测结果可以看出，三色组合光源明显优于白光 LED 光源照明下的干涉信号零级条纹对比度，所以三色组合光源的使用，提高了轮廓仪在测量过程中干涉信号的质量，进一步验证了三色组合光源照明方式在实际测量应用中的优势。

3.4 本章小结

本章针对现有白光干涉测量系统干涉信号对比度低的缺点，对不同光源的干涉信号进行建模与仿真比较，设计出一套由 RGB 三色组合光源代替白光 LED 光源的照明系统，以改善白光 LED 光源光谱分布特性，提高干涉信号对比度。并通过白光 LED 光源与三色组合光源干涉的实测干涉信号进行对比分析，验证了方案的可行性和准确性，亦证明了三色组合光源照明方式在实际测量应用中的优势。最后，对三色组合光源的光器件选型、光路结构及机械结构设计等内容进行了详细的阐述。

4 三色组合光源光学轮廓仪表面恢复空间频域算法

在照明光源和轮廓仪硬件系统均被确定的情况下，白光干涉信号的处理算法直接决定着被测样件表面形貌恢复的精度。一般情况下，往往通过提高仪器的采样频率即减小其采样步距，来保证零光程差点定位的准确性，但是这不仅仅对垂直驱动扫描系统提出了更高的要求，而且大幅度降低了测量效率。本章针对现有白光干涉测量系统对垂直扫描采样频率要求高的缺点，研究白光干涉信号的空间频域分析算法，以在保证表面恢复精度的前提下，降低采样频率，进而提高测量速度和效率。

4.1 传统白光干涉表面形貌恢复算法分析与比较

评价白光干涉表面形貌恢复算法的关键在于零级条纹是否能够准确的被定位。传统的白光干涉表面形貌恢复算法可以分为：时域定位算法、包括插值法、重心法、希尔伯特变换等；频域定位算法，包括傅立叶变换法、空间频域法、小波变换法等；以及结合白光干涉信号和相位特征的白光相移干涉法等。下面对常用的几种干涉算法进行分析与比较。

4.1.1 插值法

插值法^[31]是依据白光干涉信号零级条纹最亮的性质，首先从序列干涉图中取一像素点 (x, y) ，该点光强值为 $I(x, y)_i$ ，其中 i 为图幅数。通过比较所获得的序列 $I(x, y)_i$ 的大小，得到序列的光强最大值 $I(x, y)_{\max}$ ，及其所对应的图幅数 i_{\max} ，并通过 i_{\max} 周围的三个灰度值，对零光程差点进行修正，公式(4-1)为插值法表达式。通过计算干涉图所有像素点的高度值 h ，以恢复样件表面形貌。

$$h = i_{\max} + \frac{I_{i-1} - I_{i+1}}{2I_{i-1} - 4I_i + 2I_{i+1}} \quad (4-1)$$

由式(4-1)可知，插值法计算简单，速度快。但是为了能够让所恢复高度值 h 具有较高精度，需要提高仪器的采样频率即减小其采样步距。但这不仅对垂直驱动扫描系统提出了更高的要求，而且加长的扫描时间，进而导致测量效率大大降低。且仪器噪声等干扰因素对算法精度影响较大。

4.1.2 重心法

由图 3-1 所示计算机仿真的白光干涉信号图, 可知, 理论上白光干涉条纹是左右对称的, 干涉条纹的中心即重心, 也就是零级条纹位置, 其对应于零光程差点。依据该原理, 我们可以求出序列干涉图每一像素点的重心, 即对应于零光程差点位置, 得到相对高度值, 以恢复表面三维形貌信息^[32]。现取干涉图一像素点 (x, y) , 并以该点为例, 其中, 图幅数记为 i , 图幅总数记为 N , $I(z_i)$ 表示序列光强值, z_i 表示序列采样高度值, 进而求得相对高度值 h , 式(4-2)为重心法表达式。

$$h = \frac{\sum_{i=1}^N I(z_i) \times z_i}{\sum_{i=1}^N I(z_i)} \quad (4-2)$$

由于在垂直扫描过程中, 随干涉模块自上向下运动, 导致背景光强不断变化, 故引起干涉信号不对称, 严重影响了重心法的精度。所以在计算时应将背景光强剔除掉, 以提高计算精度。现以 $M(z_i)$ 代替 $I(z_i)$, 以去除直流部分的影响^[33]。

$$M(z_i) = \sqrt{\left(I(z_i) - \frac{\sum_{i=1}^N I(z_i)}{N} \right)^2} \quad (4-3)$$

将式(4-3)代入式(4-2), 可得重心法表达式为

$$h = \frac{\sum_{i=1}^N M(z_i) \times z_i}{\sum_{i=1}^N M(z_i)} \quad (4-4)$$

重心法虽然降低了对系统采样频率的要求, 但是对干涉信号对称性要求极高, 且对干扰信号极为敏感。由于在实际测量过程中干扰信号的存在, 导致其计算精度受到严重的影响。

4.1.3 傅立叶变换法

傅立叶变换法^[34-35]是通过时域与频域转换以求取包络曲线，再对包络曲线做最小二乘高斯拟合，取拟合后曲线最高点作为零光程差的位置。以达到零级条纹定位的目的。一般情况下，求包络系列方法将白光干涉信号认为是振动幅度被调制曲线进行调制的余弦函数，其式可表达为

$$I_s(x) = a(x) \cos[\omega_0 x + \phi(t)] \quad (4-5)$$

对(4-5)式作傅立叶变换，可得其频谱为

$$X(j\omega) = \frac{1}{2} [A(j\omega + \omega_0) + A(j\omega - \omega_0)] \quad (4-6)$$

傅立叶变换法首先对连续的白光干涉信号进行采样，得到一个离散时间序列干涉条纹图，然后对其进行离散傅立叶变换，可得到其频谱曲线，将频谱中的直流部分，即背景光强部分剔除掉，提取出频谱的正频部分，再对该部分频谱信号做傅立叶逆变换，便得到了白光干涉的包络曲线。该算法首先是将时域信号转换为频域信号，取其正频部分，再将其逆变换到时域，得到包络曲线，并对其进行最小二乘高斯拟合，该算法的精度相较插值法和重心法有所提高，但其计算量也大大的增加了。

4.1.4 白光相移干涉法

白光相移干涉算法^[36-37]是由单色光相移法发展而来，故首先对单色光相移法进行简要的介绍。相移法(PSI)是通过等距驱动干涉模块进行移相，高速 CCD 将采集到多张不同相位的单色光干涉图，提取出干涉图每一个像素点的光强值，代入相应公式便可解出每一像素点所对应的相位，即可求的每一像素点的相对高度值。

现对五步相移法进行介绍，首先设扫描步距为 $\lambda/8$ ，单色光波长为 λ ，与之相对应的高速 CCD 进行图像的采集，按照所设定的步距采五幅图像，扫描完成。取五幅干涉图上一像素点 (x, y) 的灰度值，分别为 I_1 、 I_2 、 I_3 、 I_4 、 I_5 。则有其表达式为

$$\begin{aligned} I_1 &= I_0 + c\gamma(z) \cos(\phi - \pi) = I_0 - c\gamma(z) \cos(\phi) \\ I_2 &= I_0 + c\gamma(z) \cos(\phi - \pi/2) = I_0 + c\gamma(z) \sin(\phi) \\ I_3 &= I_0 + c\gamma(z) \cos(\phi) \\ I_4 &= I_0 + c\gamma(z) \cos(\phi + \pi/2) = I_0 - c\gamma(z) \sin(\phi) \\ I_5 &= I_0 + c\gamma(z) \cos(\phi + \pi) = I_0 - c\gamma(z) \cos(\phi) \end{aligned} \quad (4-7)$$

依据五个光强值，可求的该点相位 φ 为

$$\varphi = \arctan \left[\frac{2(I_2 - I_4)}{2I_3 - I_1 - I_5} \right] \quad (4-8)$$

可得表面相对高度值为

$$Z(x, y) = \frac{\varphi}{4\pi} \lambda \quad (4-9)$$

因为单色光相移法存在相位模糊，限制了它的应用，使其只能应用于光滑表面或连续结构表面的测量中。

考虑到单色光相移法的不足，由 Harasaki、Schmit 和 Wyant 提出了一种将包络峰值求解法和相移干涉法相结合的白光相移干涉法(WLPSI)，该算法可以达到纳米级的测量精度，并消除了相位模糊问题，实现高精度大量程测量。假设每步扫描步长为 $\lambda/8$ ，则表面高度为

$$z_{phase}(x, y) = \frac{\lambda}{8} N + \frac{\beta}{2} \left[\frac{\Delta\phi\lambda}{2\pi} \right] \quad (4-10)$$

式中， N 为扫描步数， β 为数值孔径校正因子。实际上更通用的公式为

$$z_{phase}(x, y) = \frac{\lambda}{8} N + \frac{\beta}{2} \left[\frac{(\Delta\phi + 2k\pi)\lambda}{2\pi} \right] \quad (4-11)$$

其中， k 是条纹阶数，可以通过相位解包裹得到。零光程差位置和最大条纹对比度位置之间的相位差 $\Delta\phi$ 可以用五步相移法得到

$$\tan(\Delta\phi) = 2 \sin \alpha \frac{(I_2 - I_4)}{2I_3 - I_5 - I_1} \quad (4-12)$$

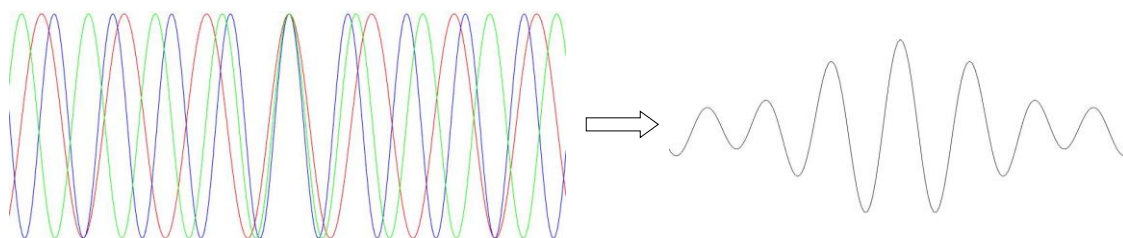
式中

$$\sin \alpha = \sqrt{\frac{4(I_4 - I_2)^2 - (I_1 - I_5)^2}{4(I_4 - I_2)^2}} \quad (4-13)$$

白光相移干涉法不仅消除了相位模糊问题，而且实现高精度大量程测量。现在该算法应用较为广泛，但其对硬件系统要求较高，如果轮廓仪干涉系统中存在像差和材料色散，则其条纹包络曲线的形状会受到严重的干扰，进而影响到表面信息的恢复精度。

4.1.5 空间频域算法

当光学轮廓仪干涉系统中存在像差和材料色散时，零级条纹相对于零光程差点的位置发生偏移，而高阶色散会严重干扰了条纹包络曲线形状，大幅度降低了传统表面恢复算法的精度。干涉条纹是由其所包含的各波长光产生的干涉条纹非相干叠加的结果，白光干涉条纹形成示意图如图 4-1 所示。1995 年，由 Zygo 公司提出了一种频域分析算法，即空间频域算法(FDA)，该算法是依据零级条纹对应于干涉信号各成分在频域其相位一致的点而提出的^[38-40]。在空间频率域中执行时，相角作为波数的函数可以被明确计算。



(a) 各波长干涉条纹图

(b) 白光干涉条纹图

图 4-1 白光干涉条纹形成示意图

若采用单波长光照明，且已知干涉条纹的空间频率 k ，空间频率是指相位的变化率（以弧度为单位），这个量也被称为波数。下式给出了干涉仪中的波数 k ，相位 ϕ 和光程差 Z 之间的关系。

$$\phi = kZ \quad (4-14)$$

其中，光程差 Z 亦为波数的函数。

现在考虑一般情况，一个多色或白光光源有一系列的波数，多个单一波长的干涉条纹的非相干叠加以产生最终的白光干涉条纹。因此，白光干涉的相对相位均可以对公式(4-15)在中心波数 k_0 处进行泰勒级数展开得到。

$$\phi = \phi_0 + (k - k_0) \frac{d\phi}{dk} \Big|_{k_0} + \frac{(k - k_0)^2}{2} \frac{d^2\phi}{dk^2} \Big|_{k_0} + \dots \quad (4-15)$$

其中，第一个常数项 ϕ_0 是 $k = k_0$ 时的相位，即 $\phi_0 = k_0 Z_0$ ；第二项为相位随波数变化一阶部分，其表达式为

$$\left. \frac{d\phi}{dk} \right|_{k_0} = Z_0 + k \left. \frac{dz}{dk} \right|_{k_0} = G_0 \quad (4-16)$$

G_0 是 $k = k_0$ 时的群速度光程差，并且仅在干涉仪色散被完全补偿的时候，它等于相速度光程差 Z_0 。现在相位作为波数函数可以被写为

$$\phi = k_0 Z_0 + (k - k_0) G_0 + \frac{(k - k_0)^2}{2} \left. \frac{dG}{dk} \right|_{k_0} + \dots \quad (4-17)$$

由式(4-17)可知，频域包含了大量的信息。

在实际测量中，采集数据集不应该太窄，否则采样窗口将被卷积到计算中并可能使相位失真。现取序列干涉图上的一像素点，其对应光强为 $I(Z)$ ，然后做归一化傅里叶变换可得

$$P(k) = \int_{-\infty}^{\infty} I(Z) \exp(-ikZ) dZ \quad (4-18)$$

在进行傅立叶变换之后，取其正频部分，如图 4-2 所示的幅频曲线图，表示 P_j 随 k_j 变化的曲线，其中箭头 A 所指为 $|P_j|$ 的最大值，对应于中心波数 k_0 位置。其相频曲线如图 4-3 所示，即 ϕ_j 随 k_j 变化的曲线，在箭头 A 所指位置，即对应于 $|P_j|$ 最大值所对应的相位值，则波数与相位值的对应关系为

$$\phi(k) = \tan^{-1} \{ \text{Im}[P(k)] / \text{Re}[P(k)] \} \quad (4-19)$$

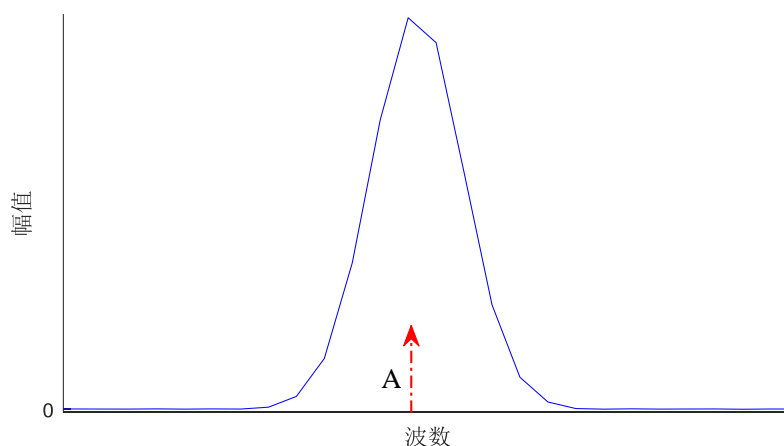


图 4-2 幅频曲线示意图

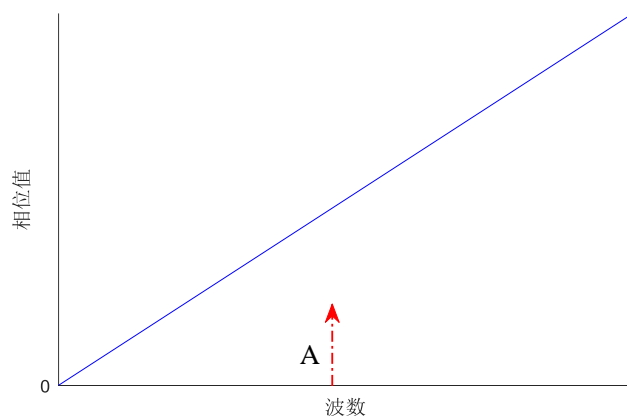


图 4-3 相频曲线示意图

傅里叶变换数据中的大部分有用信息都包含在幅频谱相对强度较大的区域，在该区域内，相位值与波数呈线性关系。从该区域收集一系列的 (ϕ_j, k_j) ，用于计算式(4-17)中的参数。相位数据中的相位模糊问题通过递归应用式(4-20)被去除。

$$\phi_j = \phi_j - 2\pi \text{Int} \left\{ (\phi_j - \phi_{j\pm 1}) / 2\pi \right\} \quad (4-20)$$

一般情况下可将二阶以上色散因素忽略，故可得式(4-21)所示关系，即群速度光程差为相位与波数之间关系的斜率。然后，选用最小二乘线性拟合 (ϕ_j, k_j) ，以求得拟合直线一次项斜率即群速度光程差 G_0 ，一般取绝对值。

$$G_0 = \left. \frac{d\phi}{dk} \right|_{k_0} \quad (4-21)$$

群速度光程差和被测表面的实际形貌信息之间的关系由群速度折射率 n_G 决定。群速度光程差的相对变化量 ΔG 对应于被测表面高度的相对变化量 Δh ，其关系式为

$$\Delta h = \frac{\Delta G}{2n_G} \quad (4-22)$$

利用该算法对于干涉图所有的像素点进行计算，便可恢复被测样件表面的三维形貌信息。

空间频域算法，对采样间隔要求比较低，可通过降低采样频率，以提高测量效率，进而实现高精度大量程的表面形貌测量。

4.1.6 三色组合光源下采样频率对算法恢复精度的影响比较

一般情况下，白光干涉仪器的采样频率即采样步距越小，其零光程差点定位越准确，但在实际应用当中，这不仅对垂直驱动扫描系统提出了更高的要求，而且由于扫描步距很小，会需要更长的扫描时间，进而导致测量效率大大降低。因此，在保证恢复精度的前提下，降低采样频率以提高测量效率，成为白光干涉算法研究的一个重点。

本小节将以上介绍的几种算法在三色组合光源照明下，以不同的扫描步距进行仿真，其中，仿真台阶高度为 $3\mu\text{m}$ ，扫描步距设定为： $30\text{nm} \sim 180\text{nm}$ ，并对各算法依次进行仿真分析，仿真结果如图 4-4 所示。

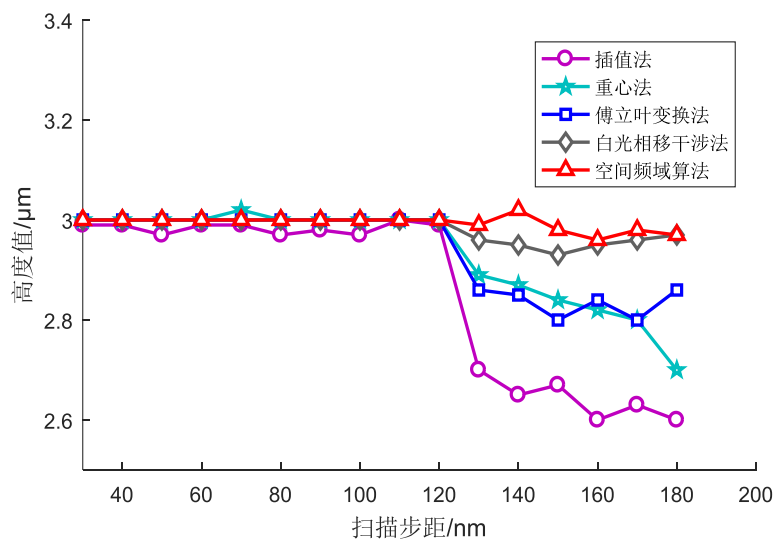


图 4-4 各算法在不同扫描步距下的结果仿真图

由上图可知，在扫描步距在 $30\text{nm} \sim 120\text{nm}$ 范围内时，几种算法均具有较高的表面形貌恢复精度。但当扫描步距超过 120nm 的时候，插值法、重心法和傅立叶变换法测量结果的置信度明显降低。其中，插值法是通过采样强度值的极大值与其周围三个点的光强值来获得零级条纹位置，算法精度受采样频率的影响很大；重心法对干涉信号的对称性要求很高，当扫描步距逐渐变大时，会影响其对称性，进而使结果精度降低；傅立叶变换法是通过寻找干涉信号包络曲线的峰值来获得零级条纹位置，亦不适用于欠采样的情况。其中，空间频域算法和白光相移算法恢复精度较高，且在不满足采样定理的情况下，依然有较高的测量精度。其中，白光相移法是将包络峰值求解法和相移干涉法结合起来，但是轮廓仪干涉系统中存在像差和材料色散，这会严重干扰条纹包络曲线的形状，进而影响到表面信息的恢复精度。而空间

频域算法是依据零级条纹对应于干涉信号各成分在频域其相位一致的点而提出的。在空间频率域中执行时，相角作为波数的函数可以被明确计算。与条纹包络曲线无关。由于群速度光程差为拟合直线的一次项系数，表面反射等原因引起的常量相位变化对测量结果无影响。通过以上理论和仿真分析，可知空间频域算法是一种比较理想的表面形貌恢复算法。

4.2 三色组合光源轮廓仪表面恢复空间频域法实现

在 4.1.6 小节中，主要研究并比较了三色组合光源照明下，采样频率对各干涉算法对表面形貌恢复精度的影响，可知空间频域算法对采样频率敏感度低，亦不受轮廓仪干涉系统中像差和材料色散的影响，是一种比较理想的白光干涉表面形貌恢复算法。本节将空间频域算法应用于三色组合光源光学轮廓仪测量系统，利用三色组合光源干涉信号幅频曲线具有三个峰值的性质，对该表面恢复方法进行改进，以提高表面恢复精度，并进行相应的仿真及实验测试。

4.2.1 算法仿真分析

在频率域中，干涉条纹零光程差位置所对相应各频率光的相位 ϕ 相同，故应找到各个频率光所对应的相位曲线。对于干涉图中任一点 (x, y) ，若得到各波长条纹的空间频率 k_i 及其对应于该点的相对相位 ϕ_i ，即能够得到如图 4-1(a)所示的各波长光所对应的干涉条纹图，进而计算出相应于零光程差位置的高度。在 4.1.5 小节中，对空间频域算法的原理进行了详细的介绍。其干涉信号处理过程如图 4-5 所示。

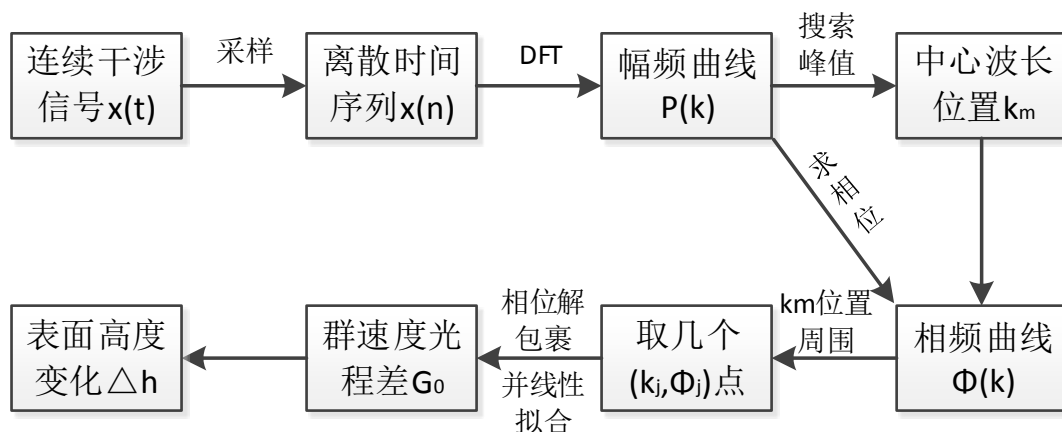


图 4-5 干涉信号处理流程图

现仿真一个高度为 $3\mu\text{m}$ 的台阶，假设扫描间距为 120nm ，移动 256 个位置，每个位置对应一个光强值，即可得干涉信号离散时间序列 $x(n)$ ，如图 4-6 所示。

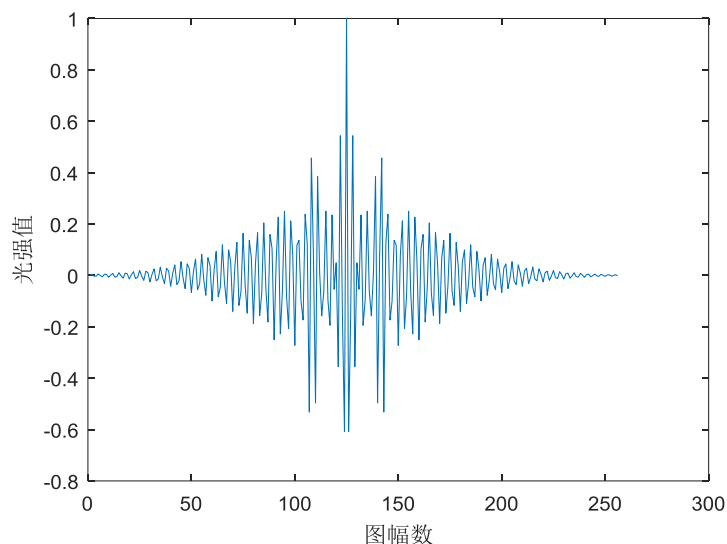


图 4-6 仿真干涉信号离散时间序列图

对离散时间序列 $x(n)$ 其作离散傅立叶变换，如式(4-18)，可得到其强度曲线，然后，由式(4-19)可求其相位曲线，强度曲线和相位曲线分别如图 4-7、图 4-8 所示。图中横坐标为扫描序号 N ，其与波数 k_j 相对应，两者转换关系为

$$k_j = 2\pi N/t \quad (4-23)$$

其中， t 为扫描步距。

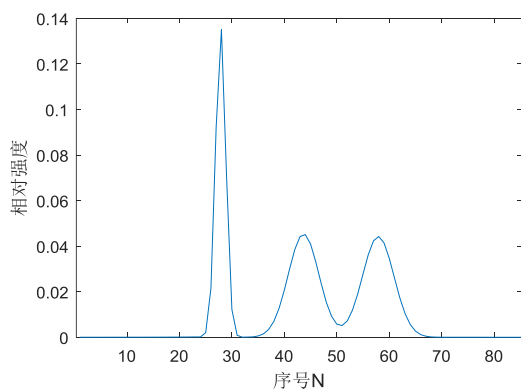


图 4-7 强度曲线图

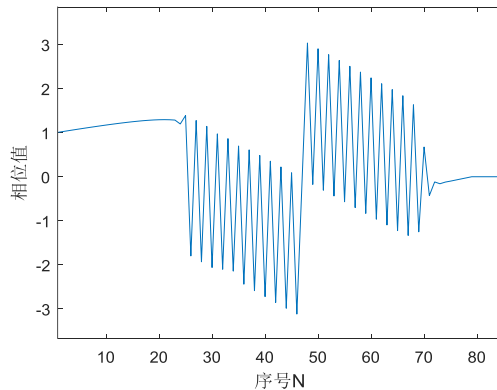


图 4-8 相位曲线图

因为仿真干涉信号为三色组合光源干涉信号，故其强度曲线中出现三个峰值，其分别对应横坐标序号 N_1 , N_2 , N_3 ，对应于相位曲线图中的三个相位值 ϕ_1 , ϕ_2 , ϕ_3 ，分别在 ϕ_1 , ϕ_2 , ϕ_3 的周围取 5-7 个相位值，并分别由式(4-20)对其进行相位解包裹，然后进行线性最小二乘拟合，以求得拟合直线一次项斜率即群速度光程差 G_0 ，如图 4-9 所示为 N_1 所对应的解包裹后的相位拟合直线，其中 N_2 , N_3 位置亦均对应一拟合直线，可分别计算出三个群速度光程差 G_1 , G_2 , G_3 ，进而求其平均值 G_0 ，作为该像素点的群速度光程差。需要注意的是，只有在数据由相当一部分的白光干涉图表示时，傅立叶变换才会有效。如果数据集太窄，采样窗口将被卷积到计算中并可能使相位失真。

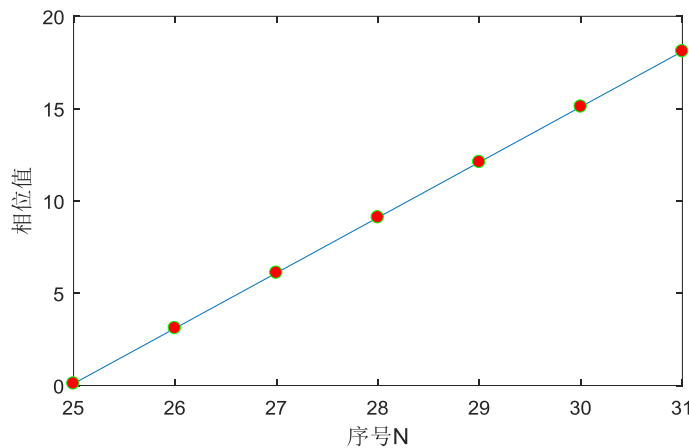


图 4-9 解包裹后的相位拟合直线图

由公式(4-22)（取群速度系数 $n_G = 1$ ）可求得高度值 $H = 3.00001\mu m$ ，所以计算精度满足测量需求。

本研究是利用三色组合光源干涉信号幅频曲线具有三个峰值的性质，对空间频域算法进行改进，改进措施为：计算出三个光源分别作用时的群速度光程差 G_1 , G_2 , G_3 后，求其平均值 G_0 ，作为该像素点的群速度光程差，以提高群速度光程差的计算精度，从而保证表面形貌恢复精度。

4.2.2 实验测试分析

本节是基于图 3-11 中所示的三色组合光源光学轮廓仪进行实验测试分析。该测量系统是利用三色组合光源照明,三色组合光通过分光棱镜照射进干涉显微物镜中,其中 Mirau 型物镜具有分束元件,该分光元件将光束的一部分反射到参考反射镜,而另一部分光束透射到物体,从物体和基准反射的两束光被重新组合并投射到高速 CCD 上,其产生与由干涉效应产生的合成光束强度成比例的信号。在三色组合光源光学轮廓仪干涉显微物镜的连续垂直扫描过程中,相机采集一系列强度数据帧,并存储到计算机存储器中。存储的数据由干涉图阵列组成,每个像素点系列灰度值均表示该扫描位置的光强度变化,即对连续的干涉信号进行等间距的采样,以得到离散时间序列,进而通过空间频域算法对被测样件表面高度信息进行恢复。

现使用三色组合光源光学轮廓仪对 $H = 1.2\mu\text{m}$ 的标准单刻线样板进行实验测量,该样板高度值由 Taylor Hobson 轮廓仪进行实测标定,其测量值为 $1.242\mu\text{m}$ 。轮廓仪相关参数为:相机分辨率为 640×480 ,扫描步距设置为 120nm 。现通过垂直扫描,存储了 256 张图像,每个点包含 256 个数据的长度。图 4-10 中显示了其中一个像素点的干涉信号图。

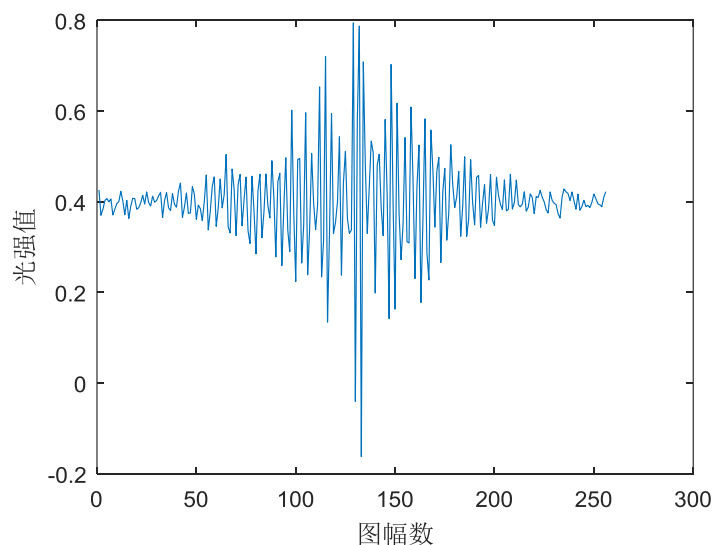


图 4-10 单刻线样板上一个像素点的干涉信号图

在得到该离散时间序列 $x(n)$ 后,对其作离散傅立叶变换,可得到该干涉信号的强度曲线,其正频部分,如图 4-11 所示。

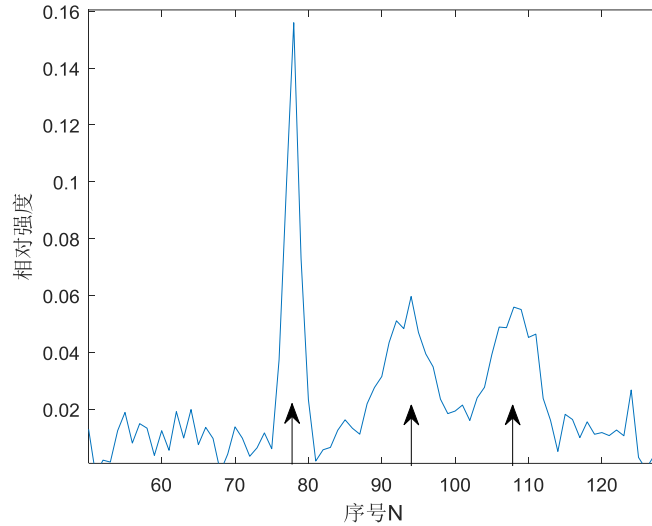


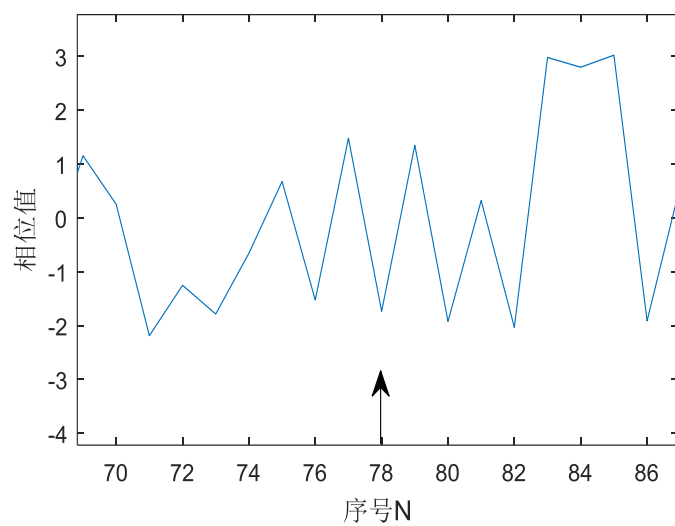
图 4-11 强度曲线正频部分

测量系统选用三色组合光源照明，故其强度曲线图中共有三个峰值，分别对应于序号 N_1 , N_2 , N_3 。由于傅里叶变换数据中的大部分有用信息都包含在幅频谱相对强度较大的区域。现需确定三个峰值位置，以确定其中心波长位置。已知光源的波长和扫描步距，则可以预测该区域的位置。可通过关系表达式(4-24)，计算得到其位置。

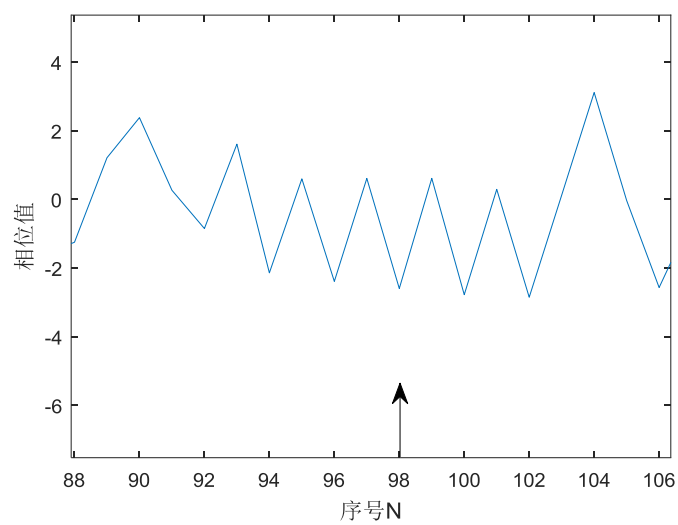
$$n = 2tL/\lambda \quad (4-24)$$

其中， t 为扫描步距， L 为扫描序列总数， λ 为波长， n 为扫描序号数。

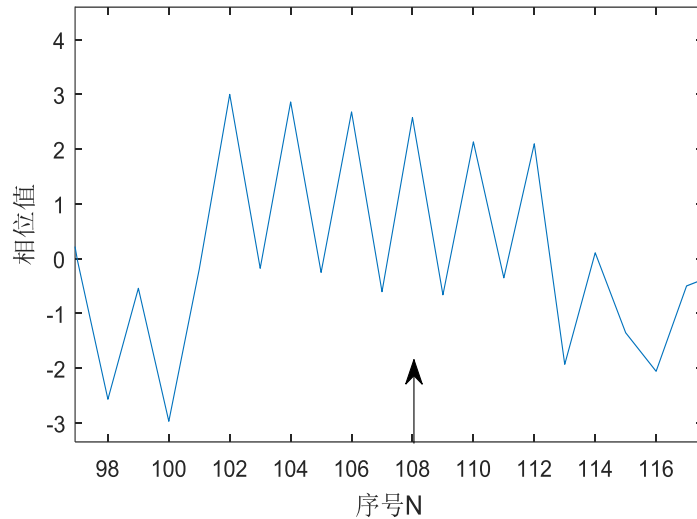
由于傅里叶变换数据中的大部分有用信息都包含在幅频谱相对强度较大的区域，所以在预测峰值周围适当区域内，进行峰值搜索以找到中心波长位置，且在其附近不大的范围内， ϕ_j 与 k_j 成线性关系，故从该区域收集一系列的 (ϕ_j, k_j) 进行相位解包裹。如图 4-11 中箭头所示，即 N_1 , N_2 , N_3 三个位置。其分别对应于相位曲线图的三个相位值，如图 4-12 中(a), (b), (c)所示。



(a) N_1 位置所对应相位曲线图



(b) N_2 位置所对应相位曲线图

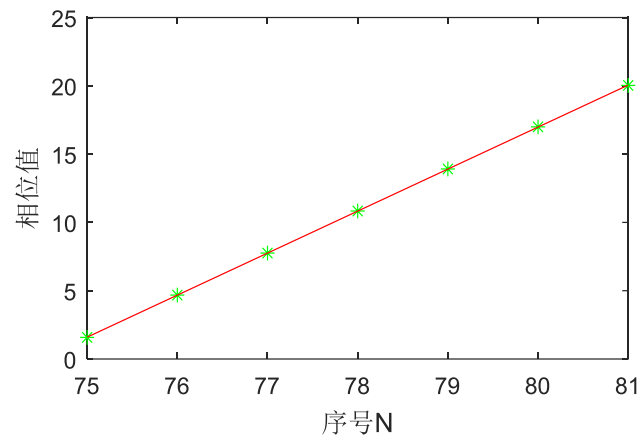


(c) N_3 位置所对应相位曲线图

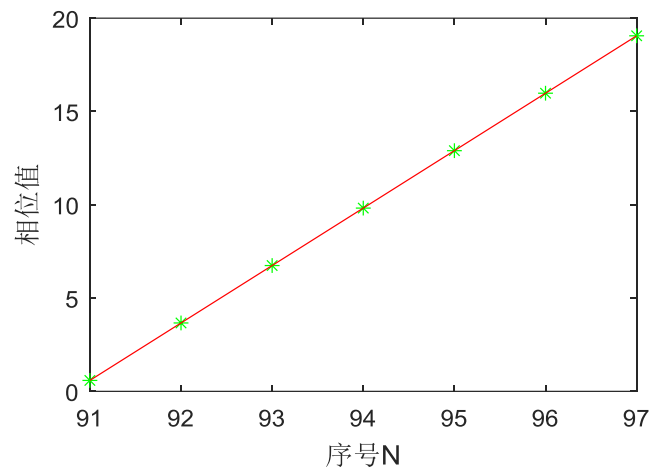
图 4-12 相位曲线图

在图 4-9 中 N_1 , N_2 , N_3 箭头所指向的区域内分别取 5-7 个相位值, 并进行相位解包裹和线性最小二乘拟合, 峰值位置 N_1 区域拟合直线如图 4-13(a)所示, 峰值位置 N_2 区域拟合直线如图 4-13(b)所示, 峰值位置 N_3 区域拟合直线如图 4-13(c)所示, 由图可知, 三个峰值附近相位值与扫描序号 N 之间均保持良好的线性关系, 利用式 (4-23) 将扫描序号转换为波数, 并分别求出其斜率 $G_1 = 58.78nm$, $G_2 = 58.89nm$, $G_3 = 58.85nm$ 。求其平均值, 可得群速度光程差 $G_0 = 58.84nm$ 。

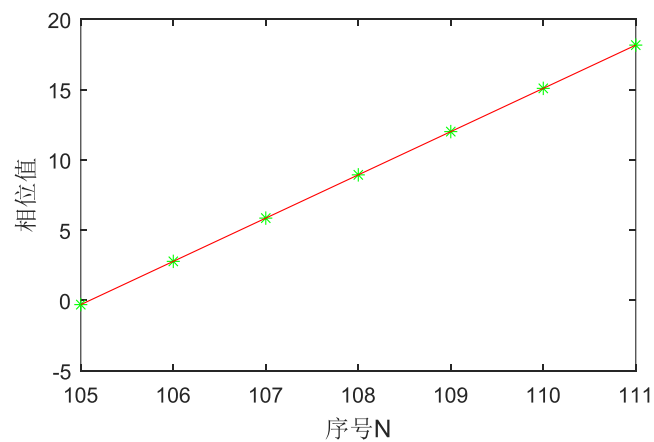
按照如上过程, 对每一个像素点进行计算, 由公式 (4-22) 可求的单刻线样板表面高度值, 进而可得该单刻线标准样板表面三维形貌, 如图 4-14(a)所示, 图 4-14(b)所示为单刻线标准样板截面图, 所标注高度值为测量结果 $H = 1.2471\mu m$, 且已知其标称值为 $1.242\mu m$, 故该结果完全满足测量要求。



(a) N_1 区域拟合直线图

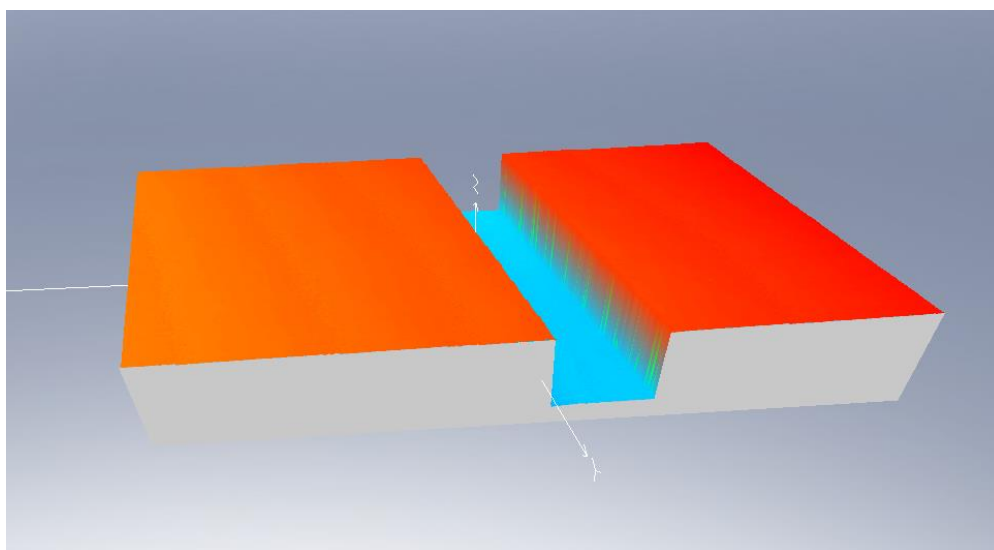


(b) N_2 区域拟合直线图

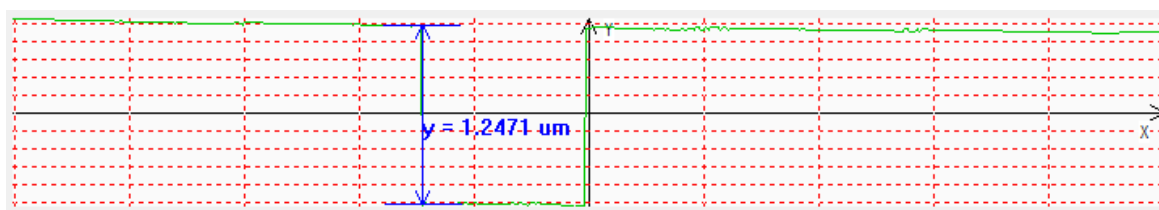


(c) N_3 区域拟合直线图

图 4-13 解包裹后的相位拟合直线图



(a)单刻线标准样板表面三维形貌



(b)单刻线样板截面图

图 4-14 单刻线标准样板图

4.3 本章小结

本章针对现有白光干涉测量系统垂直扫描采样频率要求高的缺点，对常用的几种白光干涉表面形貌恢复算法进行研究，并仿真比较不同算法在不同扫描步距下的测量精度，其中，空间频域算法在采用较大扫描步距时，亦能保证较高表面恢复精度。并将该算法应用于三色组合光源光学轮廓仪测量系统中，极大的提高测量速度和效率。

5 自动对焦算法

大部分干涉轮廓仪采用人工对焦的方式来寻找干涉区域，但由于白光干涉相干长度短，且干涉条纹的宽度受被测表面的倾斜程度的影响，导致在实际测量过程中，经常会由于调节速度过于快、眼睛疲劳等问题，错过干涉区域，而且该方式具有操作繁琐、效率低、准确性差和对操作人员要求高等缺点。本章针对现有白光干涉测量系统测量自动化程度不高的缺点，研究三色组合光源光学轮廓仪测量系统自动对焦定位功能，进而实现了轮廓仪快速、准确的自动对焦扫描功能。

5.1 常用对焦评价算子分析与比较

自动对焦技术一般应用于传统的非干涉成像系统，通过评价算子值的大小来判断对焦程度，即图像越清晰，评价算子的值越大。而对于白光干涉系统，自动对焦的目的是寻找干涉条纹出现的区域。本节主要介绍几种常用的评价算子，并对各算子进行分析与比较。

5.1.1 灰度方差评价算子

图像在接近对焦时，其相邻像素点的灰度值差异变大，而在离焦时，其相邻像素点的灰度值差异变小，而且干涉条纹出现的区域在对焦点附近。所以在干涉区域比无干涉区域的灰度值差异更大一些。根据这一性质，可由图像方差统计量构造出灰度方差评价算子^[41]。

对于分辨率为 $M \times N$ 的干涉图，其图像灰度方差值 f 可表达式为

$$f = \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} [g(x, y) - \mu]^2 \quad (5-1)$$

其中， $g(x, y)$ 为图像像素点 (x, y) 处的灰度值， μ 为图像灰度的平均值，其表达式为

$$\mu = \frac{\sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} g(x, y)}{M \times N} \quad (5-2)$$

5.1.2 梯度评价算子

这类算子基于图像的梯度或者一阶差分，它运行的前提是假设干涉区域图片的特征边缘比非干涉区域图片尖锐。比如 Tenengrad 评价方法^[42]。

为了提高计算结果的鲁棒性，Tenengrad 评价方法选用 Sobel 算子来计算图像垂直和水平两个方向的梯度值，梯度模板滤波结果的平方和定义为 f 。

$$f = \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} [S(x, y)]^2 \quad (5-3)$$

其中， $S(x, y)$ 是在像素 (x, y) 点与 Sobel 算子的卷积结果， $S(x, y)$ 的表达式为

$$S(x, y) = \sqrt{G_x^2(x, y) + G_y^2(x, y)} \quad (5-4)$$

其中，Sobel 算子如式(5-5)所示。

$$\begin{aligned} G_x &= g(x-1, y+1) + 2g(x, y+1) + g(x+1, y+1) \\ &\quad - g(x-1, y-1) - 2g(x, y-1) - g(x+1, y-1) \\ G_y &= g(x+1, y-1) + 2g(x+1, y) + g(x+1, y+1) \\ &\quad - g(x-1, y-1) - 2g(x-1, y) - g(x-1, y+1) \end{aligned} \quad (5-5)$$

5.1.3 Laplace 评价算子

由于图像的离焦过程可看做低通滤波过程，因此离焦模糊的图像高频成分少，这类方法是通过二阶差分或者称 Laplace 算子，计算图像中的高频分量。

若运用标准 Laplace 算子，当 x 和 y 方向的二阶导数互为相反数时，算子失效。因此可以用二阶导数的平方，来代替原有的 Laplace 算子，防止此种失效的发生。改进的 Laplace 算子计算图像垂直和水平两个方向的滤波结果之和，即为

$$f = \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} \left[\frac{\partial^2 g(x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 g(x, y)}{\partial y^2} \right] \quad (5-6)$$

其中， $g(x, y)$ 为图像像素点 (x, y) 处的灰度值。

5.1.4 小波变换评价算子

这类方法是基于离散小波变换。离焦位置的图像模糊是由对焦图像与点扩散函

数（PSF）的卷积导致的。这个过程可以看成是一个未知参数的低通滤波器。在图像离焦过程中，小波变换高频系数变大，低频系数变小。因此可以根据这种特性，可将其用到自动对焦算法中。小波变换系数比就是其中一种方法^[44]，表达式为

$$f = \frac{M_H^2}{M_L^2} \quad (5-7)$$

其中， M_H 和 M_L 的表达式为

$$M_H^2 = \sum_{I=1}^K \left[\sum_{(x,y) \in S_{LHI}} W_{LHI}^2(x,y) + \sum_{(x,y) \in S_{HLI}} W_{HLI}^2(x,y) + \sum_{(x,y) \in S_{HHI}} W_{HHI}^2(x,y) \right] \quad (5-8)$$

$$M_L^2 = \sum_{(x,y) \in S_{LLK}} W_{LLK}^2(x,y) \quad (5-9)$$

其中， $S_{LHI}, S_{HLI}, S_{HHI}$ 为分解层 I 高频段的分解窗口，与之相对应的高频系数为 W_{LHI} 、 W_{HLI} 和 W_{HHI} 。 K 层的低频系数为 W_{LLK} 。

5.1.5 信息熵评价算子

由香农信息论可知，一张图像上所包含信息量的多少可由信息熵对其进行量化分析。对于干涉系统，当图像处于干涉区域即近焦区域时，图片细节信息量明显高于非干涉区域。当图像上干涉条纹增多时，相邻像素灰度值离散程度变大，其信息熵亦变大，当图像上干涉条纹减少时，相邻像素灰度值离散程度变小，其信息熵亦变小^[45]。图像信息熵 f 表达式为

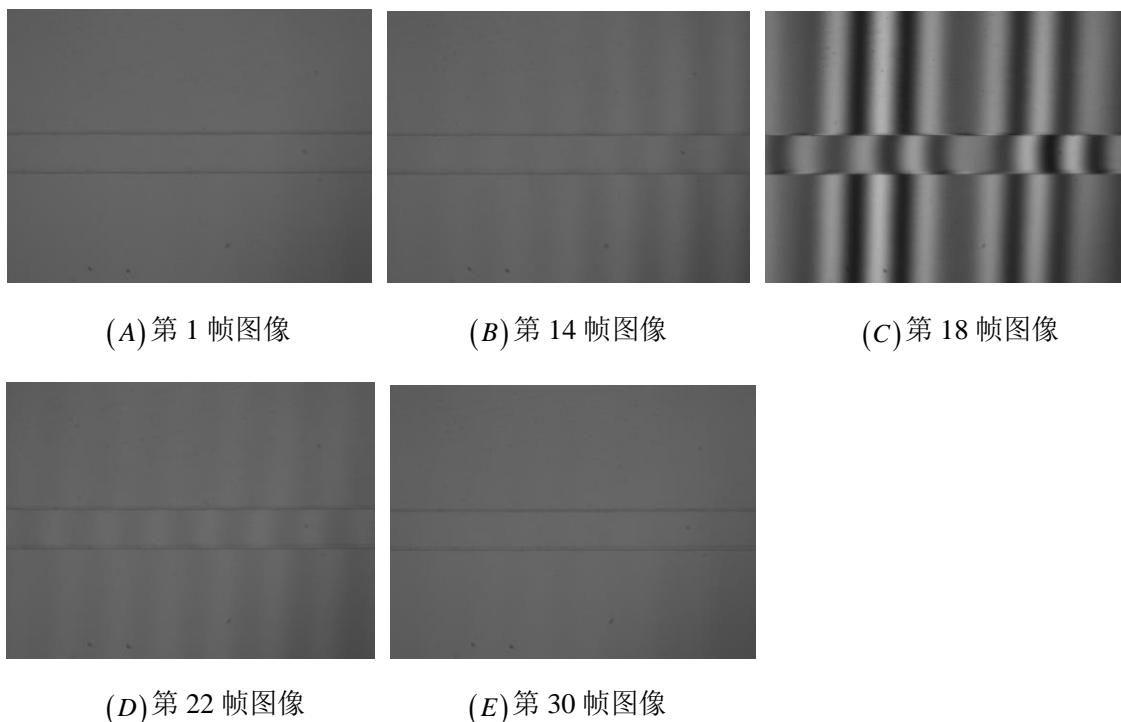
$$f = - \sum_{i=0}^{255} p(i) \log p(i) \quad (5-10)$$

其中，将图像灰度值量化为 256 个灰度级， $i(0-255)$ 表示灰度值， $p(i)$ 表示在一张图片中，灰度值 i 的像素点所占的概率。

5.1.6 评价算子对焦性能分析与比较

上节叙述了几种常用的对焦评价算子，为了比较上述几种评价算子的鲁棒性和

计算效率, 选取出一图像序列, 并使用上述几种对焦评价算子对图像序列进行评价。被测件是一标准单刻线样板 ($H=1.2\mu\text{m}$), 图像序列中有 30 幅图像, 其分辨率为 480×640 , 扫描间距为 $1\mu\text{m}$, 干涉显微物镜放大倍率为 20 倍, 如图 5-1 所示, 选取序列中 5 幅图像, 其中, 图(A)为垂直扫描的起始位置, 此时图像内未出现干涉条纹; 图(B)为干涉条纹进入图像的初始位置; 图(C)为干涉条纹完全进入图像位置, 此时的评价算子值最大; 图(D)为干涉条纹扫描过单刻线样板表面, 即干涉条纹的结束位置; 图(E)为垂直扫描的结束位置。



(A)扫描起始位置 (B)干涉条纹初始位置 (C)干涉条纹完全覆盖位置
(D)干涉条纹结束位置 (E)扫描结束位置

图 5-1 多刻线样板垂直扫描序列

分别选用不同的评价算子对该标准单刻线样板图像序列进行分析, 并绘制其归一化的对焦评价曲线, 如图 5-2 所示。其中, 所选用的五种评价算子分别是: 灰度方差评价算子、梯度评价算子、Laplace 评价算子、小波变换评价算子以及信息熵评价算子。

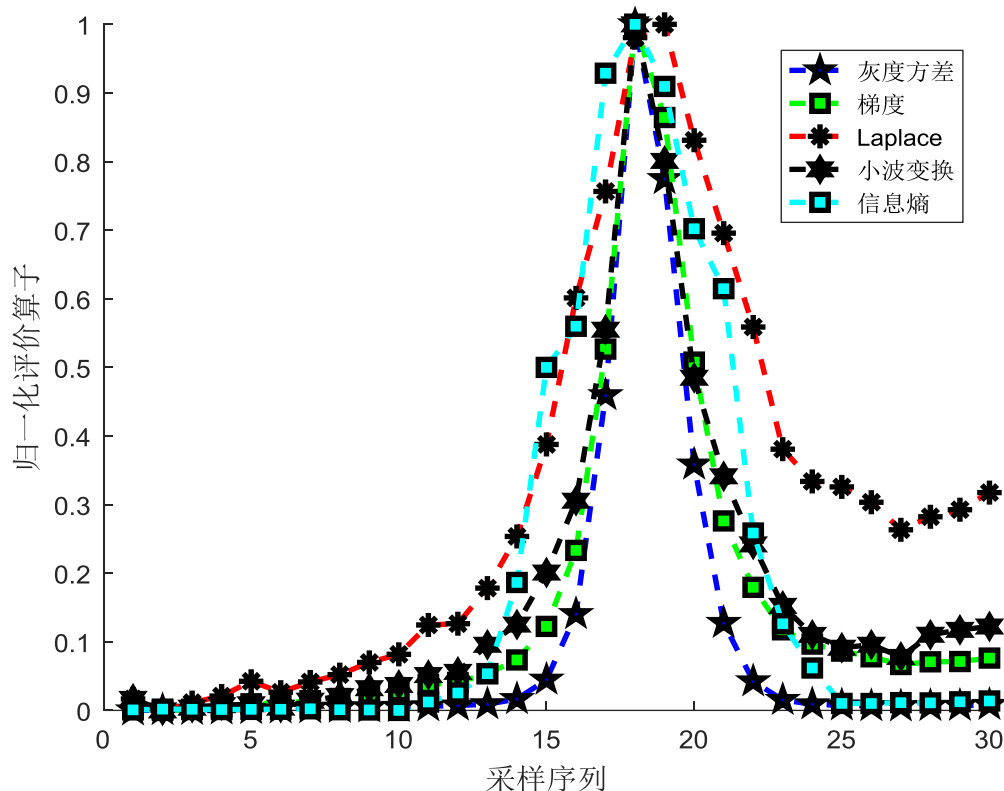


图 5-2 五种评价算子归一化对焦评价曲线

五种评价算子均在在 MATLAB 平台下运行, 选用不同的评价算子对一帧图像进行计算, 其运行时间如表 5-1 所示。

表 5-1 五种算子的运行时间

算法种类	灰度方差	梯度	Laplace	小波变换	信息熵
运行时间(ms)	19	13	14	95	8

对图 5-2 中所示的几种评价算子的归一化对焦评价曲线进行比较分析, 其中 Laplace、梯度、小波变换评价曲线均受到垂直扫描过程中的背景光强变化及光照不均匀等的影响, 导致评价曲线左右不对称。信息熵和灰度方差评价算子不受光源噪声的影响, 性能较好。但信息熵算子评价价值变化存在起伏, 故其对干涉条纹敏感度较差, 所以灰度方差评价算子最优。且由表 5-1 可知, 灰度方差算子评价一帧图像所用时间亦在合理范围内, 故灰度方差评价算子是一种较为理想的对焦评价算子。

5.2 基于灰度方差算子的自动对焦扫描法

通过 5.1 节对几种常用对焦评价算子的分析与比较，选择出一种不受背景光强变化影响、对干涉条纹敏感的评价算子—灰度方差评价算子。本节主要是基于灰度方差评价算子，将自动对焦扫描法应用于三色组合光源光学轮廓仪，进而实现轮廓仪快速、准确的自动对焦扫描功能。

自动对焦扫描算法实现的关键是搜索出轮廓仪垂直扫描过程中的干涉条纹完全覆盖的位置，即对焦评价曲线峰值附近位置，进而通过设定合理的扫描长度并完成扫描测量。如图 5-3 是利用灰度方差算子对一标准单刻线样板($H = 1.2\mu\text{m}$)的 30 幅图像序列进行评价，所绘制出的对焦评价曲线图，其中箭头所指峰值点即为干涉条纹完全覆盖的位置。

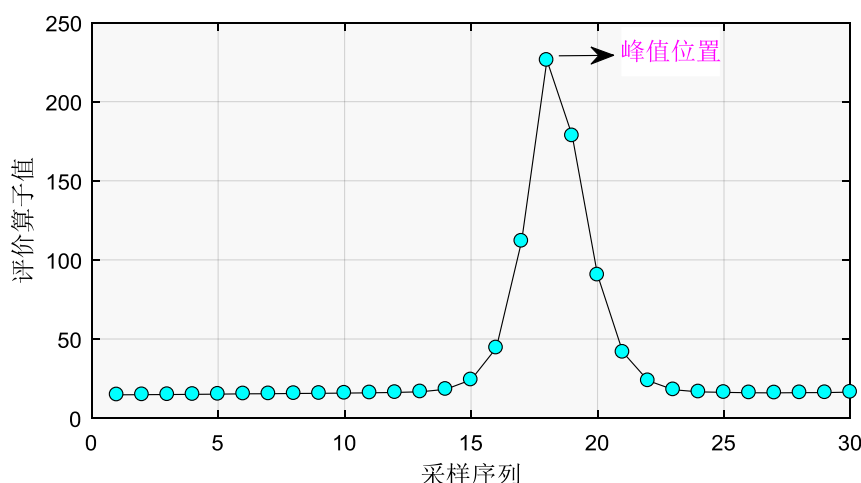


图 5-3 灰度方差算子对焦评价曲线图

常用的自动对焦搜索策略包括：穷举搜索法、函数逼近法、黄金分割搜索法以及爬山搜索法。其中爬山搜索法在自动对焦领域的应用较为广泛，相比其他搜索法，爬山法搜索路径最短，所需进行计算次数最少，故其对干涉条纹的辨识速度最快。其搜索流程如图 5-4 所示，首先将样件置于干涉物镜下，直流伺服电机带动干涉模块自上而下以大步距进行扫描，每移动一个步距，计算一次图像的评价值。如果评价值在增大，则继续沿该方向继续扫描。当出现一个评价值小于前者时，则认为此时干涉物镜已经越过了干涉条纹完全覆盖位置，此时开始向上扫描，并减小扫描步距，当出现评价值小于前者时，再开始反向扫描，并再次减小扫描步距，如此反复，直到扫描步距减小到最小值的时候，判断此点为干涉条纹完全覆盖位置，结

束搜索。在图 5-4 中，箭头所指方向为电机移动方向， A 和 B 为评价价值减小的位置， C 为干涉条纹完全覆盖位置。

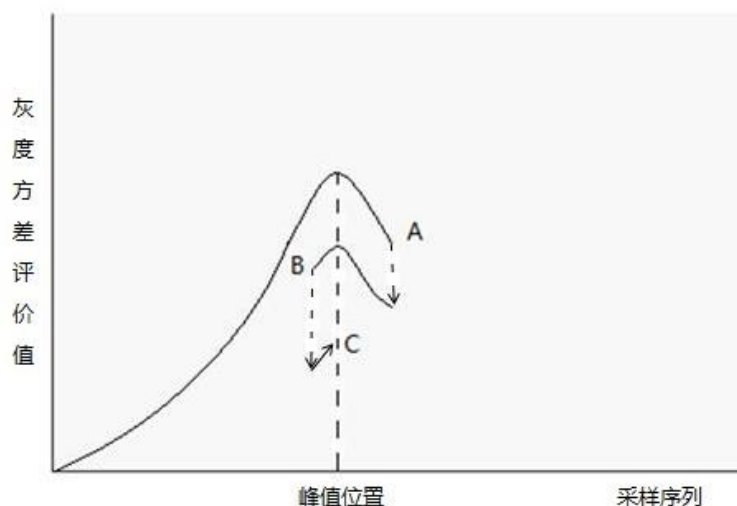


图 5-4 爬山搜索法示意图

由以上分析可知，爬山搜索法相比其他搜索算法，其效率最高，故本节将灰度方差评价算子和爬山搜索法两者相结合，以实现三色组合光源光学轮廓仪的自动对焦扫描策略。

自动对焦扫描策略，首先初始化系统，将被测样件置于 Mirau 干涉物镜的焦前位置，并启动直流电机，自上而下以 $100nm$ 的步长进行垂直扫描，并由高速 CCD 进行采集图像，计算其灰度方差评价价值 $f(n)$ ，比较评价价值 $f(n)$ 与 $f(n-1)$ （其中 $f(n-1)$ 是指该点其前一位置的评价价值），若 $f(n)$ 大于 $f(n-1)$ 则继续以大步长沿原方向进行扫描，当出现 $f(n)$ 值小于 $f(n-1)$ 时，则可以判断出，此时干涉物镜已经错过了对焦曲线峰值位置。然后，以 $20nm$ 的步长反方向进行扫描，继续进行判断 $f(n)$ 与 $f(n-1)$ 的大小关系，若 $f(n)$ 大于 $f(n-1)$ 则继续以小步长沿该方向进行扫描。当出现 $f(n)$ 值小于 $f(n-1)$ 时，则可以判断其前一位置为峰值位置，该位置即为干涉条纹完全覆盖位置，此时直流电机停止运动。然后设定合理的扫描长度，对该样件表面进行等步距连续垂直扫描，并通过空间频域算法恢复其表面形貌，完成测量。其具体流程图如图 5-5 所示。

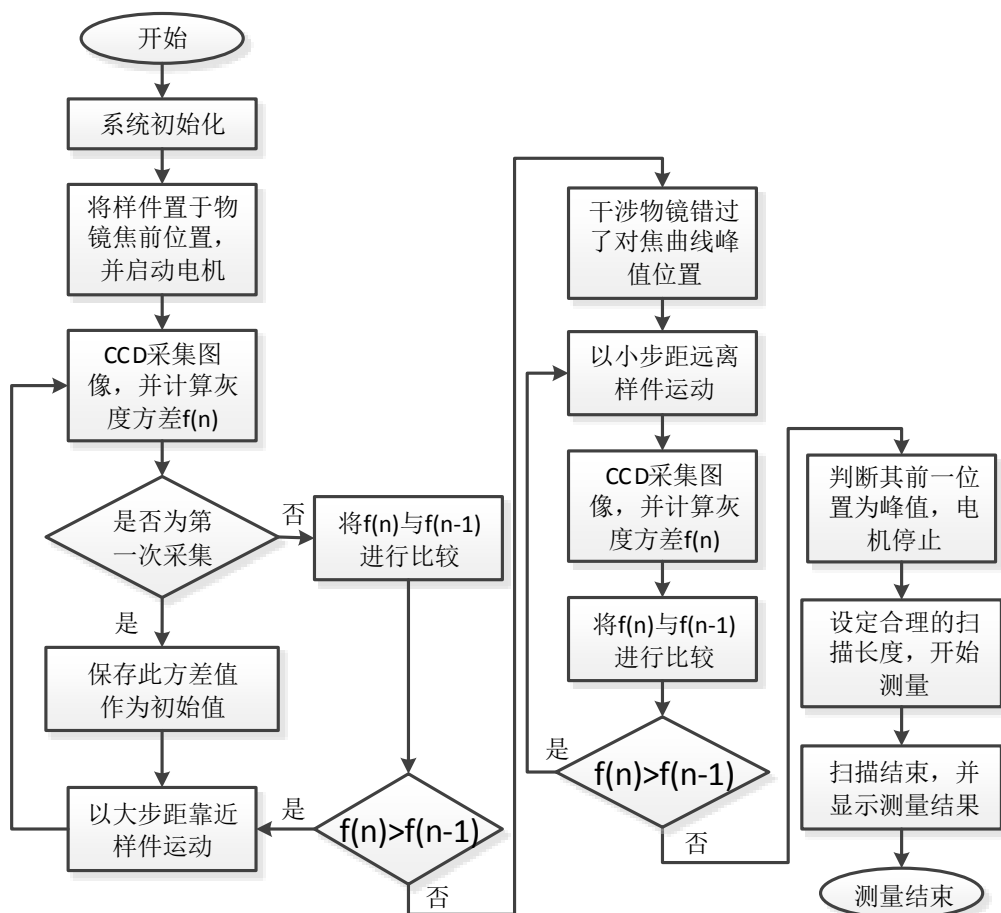


图 5-5 轮廓仪自动对焦扫描法原理图

现将自动对焦扫描法应用于三色组合光源光学轮廓仪, 提高了测量系统的自动化程度, 同时有效解决了传统人工对焦方式所具有的操作繁琐、效率低、准确性差和对操作人员要求高等缺点。并进行了实验测试, 轮廓仪的测量效率得到了极大程度的提高。

5.3 本章小结

本章针对现有白光干涉测量系统测量自动化程度不高的缺点, 研究并比较了几种常用的对焦评价算子, 分别选用不同算子对一图像序列进行评价并绘制其归一化对焦评价曲线, 对比不同评价算子的性能及执行效率, 选择出一种不受背景光强变化影响、对干涉条纹敏感的评价算子-灰度方差评价算子, 进而基于自动对焦扫描算法, 实现了轮廓仪快速、准确的自动对焦扫描功能。并详细阐述了自动对焦定位功能的实现原理及操作流程。

6 测试实验

本章主要是将三色组合光源、干涉信号空间频率域分析与形貌恢复算法以及自动对焦算法应用于自主开发的光学轮廓仪，从测量效率和测量精度两个方面与实验室原有白光干涉仪器进行实验对比分析，并对三色组合光源光学轮廓仪的系统稳定性进行测试。三色组合光源光学轮廓仪实物如图 6-1 所示。



图 6-1 三色组合光源光学轮廓仪实物图

6.1 与原有白光仪器实验结果对比分析

本节主要针对三色组合光源光学轮廓仪测量效率和测量精度两个方面，与实验室原有白光干涉仪器进行实验对比分析。一般通过计算测量的重复性和示值误差来衡量仪器的精度，其中重复性是指在保证测量环境相同的前提下，短时间内测量值的变化情况，本文用多次重复测量的极差与实际值的比值表示相对重复性误差。示值误差可简称为测量仪器的误差，即测量仪器示值与对应输入量的真值之差。输入量的真值一般无法确定，实际中用高一等级的仪器测量值作为被测样件的实际值，因此测量仪器示值减去实际值就是仪器的示值误差。相对误差可表示为：

$$e = \frac{|H_{\text{示值}} - H_{\text{实际}}|}{H_{\text{实际}}} \times 100\% \quad (6-1)$$

6.1.1 测量效率对比分析

本小节主要从自动对焦定位功能和空间频域算法的应用两个方面，对三色组合光源光学轮廓仪和实验室原有白光干涉仪器的测量效率进行比较分析。

其一，三色组合光源光学轮廓仪测量系统实现了自动对焦定位功能，以代替传统的人工对焦方式。该功能不仅提升了仪器的自动化水平，而且也极大的提高了对焦效率，进而提高了轮廓仪的整体测量效率。并通过大量的实验测试，验证了该对焦方案的可行性和准确性。

其二，三色组合光源光学轮廓仪测量系统实现了三色组合光照明下干涉信号的空间频域分析算法，以代替实验室原有白光干涉仪器恢复表面形貌所用的插值法。该算法的应用在保证表面恢复精度的前提下，降低对采样频率的要求，进而极大的提高测量速度和效率。其中在 6.1.1 和 6.1.2 小节中，三色组合光源光学轮廓仪的垂直扫描步距为 120nm，实验室原有白光干涉仪器的垂直扫描步距为 20nm。

6.1.2 $H=1.242\mu\text{m}$ 单刻线样板对比测量

在相同的实验条件下，分别使用三色组合光源光学轮廓仪和实验室原有白光干涉仪器对同一个 $H=1.2\mu\text{m}$ 的标准单刻线样板（Taylor Hobson 轮廓仪的实测高度值为 $1.242\mu\text{m}$ ）进行 20 次重复测量，并将实验得出的表面刻线台阶高度进行对比分析。如表 6-1 为三色组合光源光学轮廓仪测量样板台阶高度数据表，表 6-2 为原有白光干涉仪器测量样板台阶高度数据表。

表 6-1 三色组合光源光学轮廓仪测量样板台阶高度数据表

测量序号	测量结果(μm)	测量偏差(μm)	测量序号	测量结果(μm)	测量偏差(μm)
1	1.2535	0.012	11	1.2510	0.009
2	1.2503	0.008	12	1.2528	0.011
3	1.2473	0.005	13	1.2522	0.010
4	1.2518	0.010	14	1.2562	0.014
5	1.2512	0.009	15	1.2533	0.011
6	1.2529	0.011	16	1.2497	0.008
7	1.2531	0.011	17	1.2542	0.012
8	1.2488	0.007	18	1.2468	0.005

续表 6-1

9	1.2507	0.009	19	1.2518	0.010
10	1.2493	0.007	20	1.2467	0.005

计算得测量结果的平均值为： $H = 1.2512\mu m$

测量结果的极差为： $S = 0.0095\mu m$

最大相对示值误差为： $0.014/1.242 \approx 1.1\%$

相对重复性误差为： $0.0095/1.242 \approx 0.7\%$

表 6-2 原有白光干涉仪器测量样板台阶高度数据表

测量序号	测量结果(μm)	测量偏差(μm)	测量序号	测量结果(μm)	测量偏差(μm)
1	1.2651	0.023	11	1.2578	0.016
2	1.2587	0.017	12	1.2618	0.020
3	1.2627	0.021	13	1.2612	0.019
4	1.2591	0.017	14	1.2616	0.020
5	1.2628	0.021	15	1.2583	0.016
6	1.2629	0.021	16	1.2637	0.022
7	1.2521	0.010	17	1.2562	0.014
8	1.2668	0.025	18	1.263	0.021
9	1.261	0.019	19	1.2545	0.013
10	1.2632	0.021	20	1.2505	0.009

计算得测量结果的平均值为： $H = 1.2602\mu m$

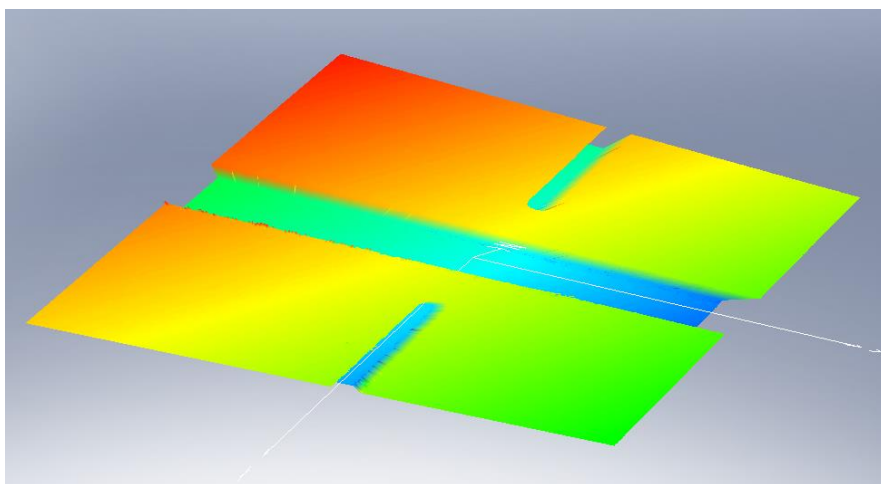
测量结果的极差为： $S = 0.0163\mu m$

最大相对示值误差为： $0.025/1.242 \approx 2.0\%$

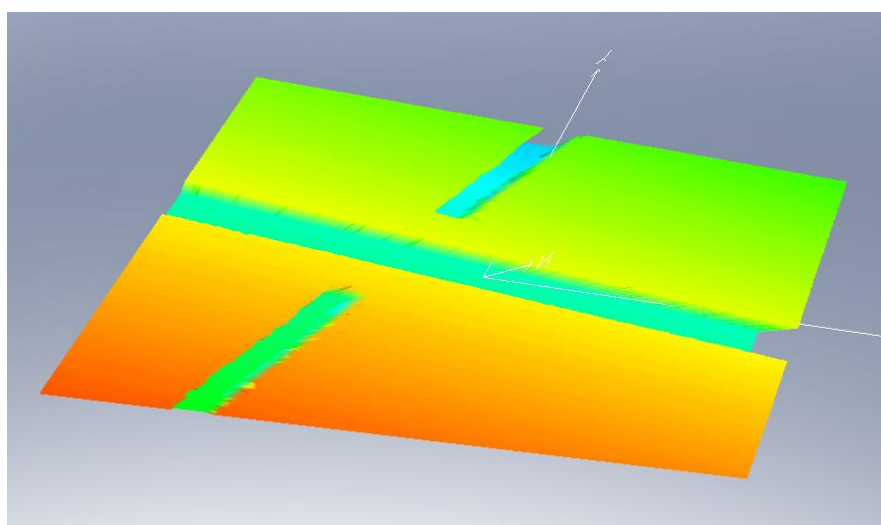
相对重复性误差为： $0.0163/1.242 \approx 1.3\%$

通过对比实验结果可知，三色组合光源光学轮廓仪进行多次重复测量的示值误差和重复性误差均低于实验室原有白光干涉仪器，故三色组合光源光学轮廓仪的测量精度高于原有白光干涉仪器。图 6-2 为单刻线标准样板的三维表面形貌，其中，

图 6-2(a)为三色组合光源光学轮廓仪测量结果,图 6-2(b)为原有白光干涉仪器测量结果。



(a)



(b)

图 6-2 $H=1.242\mu\text{m}$ 的单刻线标准样板三维表面形貌

6.1.3 $Ra=0.778\mu\text{m}$ 多刻线样板对比测量

在相同的实验条件下,分别使用三色组合光源光学轮廓仪和实验室原有白光干涉仪器对同一个 $Ra=0.8\mu\text{m}$ 的标准多刻线样板(Taylor Hobson 轮廓仪的实测粗糙度值为 $0.778\mu\text{m}$) 进行 20 次重复测量,并将实验得出的表面粗糙度进行对比分析。如表 6-3 为三色组合光源光学轮廓仪测量样板粗糙度数据表,表 6-4 为原有白光干涉

仪器测量样板粗糙度数据表。

表 6-3 三色组合光源光学轮廓仪测量样板粗糙度数据表

测量序号	测量结果(μm)	测量偏差(μm)	测量序号	测量结果(μm)	测量偏差(μm)
1	0.7867	0.009	11	0.7892	0.011
2	0.7842	0.006	12	0.7901	0.012
3	0.7835	0.006	13	0.7857	0.008
4	0.7836	0.006	14	0.7875	0.010
5	0.7903	0.012	15	0.7885	0.011
6	0.7851	0.007	16	0.7904	0.012
7	0.7881	0.010	17	0.7843	0.006
8	0.7915	0.014	18	0.7899	0.012
9	0.7898	0.012	19	0.7918	0.014
10	0.7847	0.007	20	0.7891	0.011

计算得测量结果的平均值为: $Ra = 0.7877\mu\text{m}$

测量结果的极差为: $S = 0.0083\mu\text{m}$

最大相对示值误差为: $0.014/0.778 \approx 1.8\%$

相对重复性误差为: $0.0083/0.778 \approx 1.1\%$

表 6-4 原有白光干涉仪器测量样板粗糙度数据表

测量序号	测量结果(μm)	测量偏差(μm)	测量序号	测量结果(μm)	测量偏差(μm)
1	0.8123	0.034	11	0.8168	0.039
2	0.8118	0.034	12	0.8159	0.038
3	0.8115	0.034	13	0.8103	0.032
4	0.8127	0.035	14	0.8165	0.039
5	0.8101	0.032	15	0.8155	0.038
6	0.8109	0.033	16	0.8156	0.038

续表 6-4

7	0.8049	0.027	17	0.8140	0.036
8	0.8105	0.033	18	0.8161	0.038
9	0.8162	0.038	19	0.8080	0.030
10	0.8152	0.037	20	0.8189	0.041

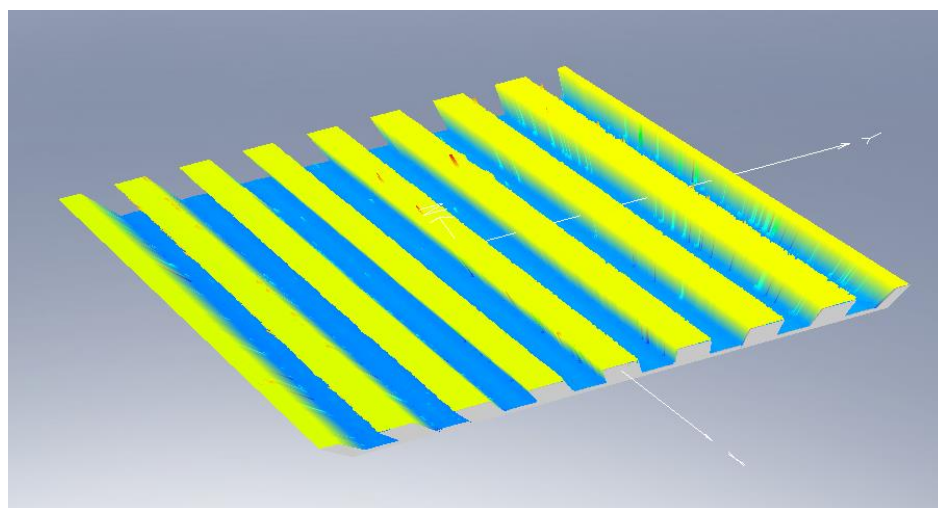
计算得测量结果的平均值为: $Ra = 0.8132\mu m$

测量结果的极差为: $S = 0.014\mu m$

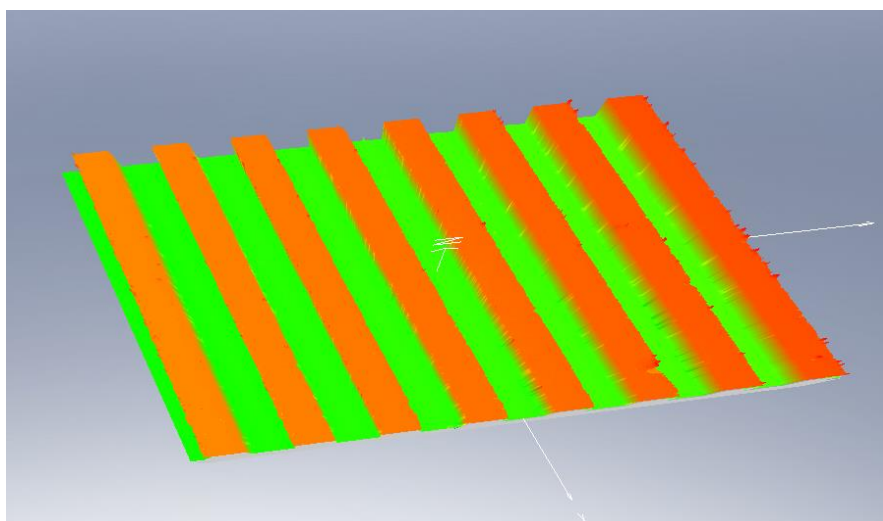
最大相对示值误差为: $0.041/0.778 \approx 5.3\%$

相对重复性误差为: $0.014/0.778 \approx 1.8\%$

通过对比实验结果可知, 三色组合光源光学轮廓仪进行多次重复测量的示值误差和重复性误差均低于实验室原有白光干涉仪器, 故三色组合光源光学轮廓仪的测量精度高于原有白光干涉仪器。图 6-3 为多刻线标准样板的三维表面形貌, 其中, 图 6-3(a)为三色组合光源光学轮廓仪测量结果, 图 6-3(b)为原有白光干涉仪器测量结果。



(a)



(b)

图 6-3 $Ra=0.778\mu m$ 的多刻线标准样板三维表面形貌

6.2 本章小结

本章主要是将三色组合光源光学轮廓仪与实验室原有的白光干涉仪器进行了实验对比分析，通过实验对比分析可知，三色组合光源光学轮廓仪在测量效率和测量精度两个方面均优于原有白光干涉仪器，进一步验证了改进后的轮廓仪测量系统的优势。

7 总结与展望

7.1 全文总结

随着制造工艺和技术的不断发展,衍生出各种各样的功能性表面,其微观表面形貌对于产品的功能特性而言是密切相关的,表面形貌测量,对表面质量及其功能特性保证具有重要意义,亦受到了机械加工领域的重视。进而出现了越来越多的表面形貌测量仪器,其中的白光干涉表面形貌测量方法具有非接触、高效率、高精度特点,尤其适用于 MEMS、IC、微纳光学等功能表面的高精度测量,其所恢复三维表面形貌亦可作为制造单元的反馈,进而提高制造工艺水平。本文主要围绕现有白光干涉测量系统干涉信号对比度低、垂直扫描采样频率要求高及测量自动化程度不高的缺点,对其光源、表面恢复和自动对焦定位等方面展开了相关研究。主要研究内容如下:

1、针对现有白光干涉测量系统干涉信号对比度低的缺点,对不同光源的干涉信号进行建模与仿真比较,设计出一套由 RGB 三色组合光源代替白光 LED 光源的照明系统,以改善白光 LED 光源光谱分布特性,提高干涉信号对比度。通过白光 LED 光源与三色组合光源干涉的实测干涉信号进行对比分析,验证了方案的可行性和准确性,亦证明了三色组合光源照明方式在实际测量应用中的优势。并完成了三色组合光源的光器件选型、光路结构及机械结构设计等内容。

2、针对现有白光干涉测量系统垂直扫描采样频率要求高的缺点,对常用的几种白光干涉表面形貌恢复算法进行研究,并仿真比较不同算法在不同扫描步距下的测量精度,其中,空间频域算法在采用较大扫描步距时,亦能保证较高表面恢复精度。并将该算法应用于三色组合光源光学轮廓仪测量系统中,极大的提高测量速度和效率。

3、针对现有白光干涉测量系统测量自动化程度不高的缺点,研究并比较了几种常用的对焦评价算子,分别选用不同算子对一图像序列进行评价并绘制其归一化对焦评价曲线,对比不同评价算子的性能及执行效率,选择出一种不受背景光强变化影响、对干涉条纹敏感的评价算子-灰度方差评价算子,进而基于自动对焦扫描算法,实现了轮廓仪快速、准确的自动对焦扫描功能。并详细阐述了自动对焦定位功能的实现原理及操作流程。

4、将三色组合光源、干涉信号空间频率域分析与形貌恢复算法以及自动对焦算法应用于自主开发的光学轮廓仪，并进行实验测试，取得了良好结果。

7.2 展望

本文基于三色组合光源光学轮廓仪测量系统，对其照明光源、三维形貌恢复算法以及自动对焦算法进行了深入研究，并取得一定的成果，但是仍有一些不足，需要在以下几个方向继续研究：

1、继续优化三色组合光源光学轮廓仪系统结构，使其机械结构和光路结构更加稳定，并且易于调整。硬件方面，更换相机为彩色 CCD，以提高测量过程中的视觉效果。以提高 CCD 视场内干涉条纹图像的清晰度和稳定性。

2、继续优化三维形貌恢复算法，扩大仪器的应用范围。通过大量实验，分析其对工程表面（如漫反射、大角度倾斜表面等）测量效果不佳的原因，并改进其恢复算法，以提高算法的适应性。

3、继续优化自动对焦算法，由于被测样件的材料和微观表面结构不同，故在自动对焦过程中，其阈值的选取亦会有所不同，可进一步通过大量实验，寻找对焦过程中阈值选取的规律，并在软件中提供阈值设置窗口，以方便用户在使用仪器时，可以根据被测样件选取合适的阈值。

4、继续开发和完善三色组合光源光学轮廓仪的软件部分，由于 CCD 视场大小的限制，故其测量范围受到了很大的限制，为实现轮廓仪的大范围测量，需要开发三维图像的拼接算法。

致谢

时间如白驹过隙匆匆而过，两年的硕士生活转眼即将结束，我也将要步入社会工作，告别自己十九年的学生生涯。两年前，自己拿到华科录取通知书时的心情至今仍记忆犹新。两年虽短，我却每一天都过的很充实，收获颇丰。

告别燕大，华科大便又成了一个新的起点。身为一名硕士生的我，便把科研放在了第一位，形貌测量实验室也便成了我的家，在这里有一位睿智和蔼的老师，有很多上进可爱的同学，还有搞不完的科研，学不完的知识。每天枯燥的科研生活却又不乏乐趣，自此，“开心科研”便成了我的座右铭。

在此，首先感谢我的母校-华中科技大学，给予了我舒适的学习生活环境、各类优质的学习资源，让我得以在科研之路上，轻松前行。

感谢我的导师—刘晓军教授，自己很荣幸能成为您的学生，亦很感激您对我的赏识。在两年的硕士生活里，您严谨的科研态度深深地感染着我，一丝不苟的处世态度亦深深地影响着我。在生活中，您也教会了我很多为人处事的道理，让我受益终生，谢谢您，刘老师。

然后，感谢实验室各位可爱的同学们，因为你们的存在，给我的科研生活增添了很多色彩。感谢袁腾飞、魏川、曾春阳三位师兄对我软件学习方面的帮助，因为有你们，让我少走了很多弯路。感谢师兄雷自力、王杰、李千、焦宇恒、郭小庭、周朋、胡迟、胡卓，同届同学程向、罗健以及师弟柴长春对我毕业论文工作的无私帮助。同时感谢我的室友周迪一、王荣彪以及肖鹏飞，因为有你们的陪伴和帮助，使我在科研之余拥有一个温馨的寝室环境。

最后，感谢我父母的养育之恩和姐姐的照顾，在我成长的过程中，是你们一直默默地支持着我，在我处于低谷的时候，亦是你们提供给我前进的动力，你们无私的爱，给予了我前进的勇气和力量，谢谢你们这么多年来对我不求回报的付出。

感谢所有关心、帮助和支持过我的人们！

作者：刘学俐

2018.05 于华中科技大学

参考文献

- [1] Tsukahara H, Tsukahara H. Three-dimensional measurement technologies for advanced manufacturing. *Fujitsu Scientific & Technical Journal*, 2007(1): 76~86
- [2] 戴蓉, 谢铁邦, 常素萍. 垂直扫描白光干涉表面三维形貌测量系统[J]. *光学技术*. 2006(4): 545-547.
- [3] 李荣彬, 张志辉, 李建广. 超精密加工的三维表面形貌预测. *中国机械工程*, 2000(08): 11~14
- [4] 刘斌, 冯其波, 匡萃方. 表面粗糙度测量方法综述[J]. *光学仪器*. 2004(5): 54-58.
- [5] 杨坤, 曾爱军, 王向朝, et al. Method for rapid measuring retardation of a quarter-wave plate based on simultaneous phase shifting technique[J]. *Chinese Optics Letters*. 2008(9): 673-675.
- [6] 杨晶. 扫描隧道显微镜和扫描电子显微镜的联用[J]. *科技创新导报*. 2008(4): 2-3.
- [7] 周光亚, 沈亦兵, 侯西云, 等. 象散法高精度离焦检测系统研究[J]. *浙江大学学报(自然科学版)*. 1998(6): 46-50.
- [8] Chetwynd DG, Liu X, Smith ST. A controlled-force stylus displacement probe[J]. *Precision Engineering*. 1996,19(2):105-111
- [9] 谢峰, 谢铁邦, 李柱. 一种新型非接触式三维弹头痕迹检测系统[J]. *仪器仪表学报*, 2000,21(1):46-49
- [10] Hocken RJ, Chakraborty N, Brown C. Optical metrology of surfaces[J]. *Ann. CIRP*, 2005,54(2): 705-719
- [11] Kido M, Szabo G, Cavallaro J R, et al. New phase-shifting method for high-resolution microlithography. *Optical/Laser Microlithography VII*, 1994
- [12] Yang K, Zeng A, Wang X, et al. Method for rapid measuring retardation of a quarter-wave plate based on simultaneous phase shifting technique. *中国光学快报: 英文版*, 2008, 6(9): 673~675
- [13] 陈晓荣, 蔡萍, 施文康. 光学非接触三维形貌测量技术新进展[J]. *光学精密工程*, 2002, 10 (5) : 528-532.
- [14] 常素萍. 基于白光干涉轮廓尺寸与形貌非接触测量方法和系统: [博士学位论文]. 华中科技大学图书馆, 2007

- [15] Danielson B L, Boisrobert C Y. Absolute optical ranging using low coherence interferometry. *Appl Opt*, 1991, 30(21): 2975~2979
- [16] 李朝辉. 基于相移干涉法的微表面轮廓仪的研究:[博士学位论文]. 天津大学图书馆, 2004
- [17] Deck L, de Groot P. High-speed noncontact profiler based on scanning white-light interferometry. *Appl Opt*, 1994, 33(31): 7334~7338
- [18] 冯斌, 王建华. 表面形貌光学法测量技术[J]. 计量与测试技术, 2005, 32(6): 4-6.
- [19] Bs L, Tc. S. Profilometry with a coherence scanning microscope. *Appl Opt*, 1990, 29(26): 3784~3788
- [20] 吴兆喜, 黄元庆. 基于光学原理的三维形貌测量技术研究[J]. 光学技术, 2006, 32(z1): 654-658.
- [21] 徐海涛. 垂直扫描白光干涉测量关键技术的研究及应用[硕士学位论文]. 武汉: 华中科技大学, 2013
- [22] 李千. 大范围白光干涉光学轮廓仪结构设计[硕士学位论文]. 武汉: 华中科技大学, 2015
- [23] 郑毅. 垂直扫描白光干涉表面形貌测量软件系统研究[硕士学位论文]. 武汉: 华中科技大学, 2015
- [24] 梁淦廷, 刘翠红. 物理光学简明教程[M]. 北京市: 电子工业出版社, 2010: 236.
- [25] Dai R, Xie T, Gong W, et al. A high precision profilometer based on vertical scanning microscopic interferometry[J]. *Journal of Shanghai University (English Edition)*. 2008, 12(3): 255-260.
- [26] 谢建平, 张晓世, 吴为民, 等. 白光干涉仪中多波长值的优化选择[J]. 量子电子学报. 2001(4): 293-296.
- [27] de Groot P, Colonna De Lega X, Others. Signal modeling for low-coherence height-scanning interference microscopy[J]. *Applied optics*. 2004, 43(25): 4821-4830.
- [28] Kassamakov I, Hanhij A Rvi K, Abbadi I, et al. Scanning white-light interferometry with a supercontinuum source[J]. *Optics letters*. 2009, 34(10): 1582-1584.
- [29] Heikkinen V, Hanhij A Rvi K, Aaltonen J, et al. Hybrid light source for scanning white light interferometry-based MEMS quality control[C]. 2011.

- [30] 宋桂菊, 方祖捷, 王向朝. 多光源白光干涉仪的最佳波长组合[J]. 光学学报. 2001(4): 21(4):463-467.
- [31] Chen S, Palmer A W, Grattan K T V. Digital signal processing techniques for electronically scanned optical fiber white-light interferometry[J]. Appl. Opt, 1992, 31(28):6003-6010.
- [32] 杨天博, 郭宏, 李达成. 白光扫描干涉测量算法综述[J]. 光学技术. 2006, 32(1): 115-117, 120.
- [33] 张倩, 崔长彩, 周晓林, 等. 垂直扫描白光干涉测量数据处理算法分析[J]. 湖北汽车工业学院学报. 2010, 24(1): 42-45, 49.
- [34] Deck L, Groot P d. High-speed noncontact profiler based on scanning white-light interferometry[J]. Appl. Opt, 1994, 33 (31): 7334-7338.
- [35] Hart M, Vass D G, Begbie M L. Fast surface profiling by spectral analysis of white-light interferograms with Fourier transform spectroscopy[J]. Appl. Opt, 1998, 37(10):1764-1769.
- [36] Y. K. Kwon, E. C. Heo, and B. C. Kim, The curvature profile measurement using white-light scanning interferometry, in International Conference on Control, Automation and Systems(2007), pp. 2250-2253.
- [37] K. G. Larkin, Efficient nonlinear algorithm for envelope detection in white light interferometry, Journal of the Optical Society of America A 13, 832-843 (1996).
- [38] Groot P d, Deck L. Surface profiling by analysis of white-light interferograms in the spatial frequency domain[J]. J. Mod. Opt, 1995, 42(2): 389-401.
- [39] Groot P d, Lega X C D, Kramer J, et al. Determination of fringe order in white-light interferometry microscopy[J]. Appl. Opt, 2002, 41(22): 4571-4578.
- [40] Groot P d, Lega X C d Signal modeling for low-coherence height-scanning interference microscopy[J]. Appl. Opt, 2004, 43(25): 4821-4830.
- [41] 吴志顺. 白光垂直扫描干涉仪控制系统设计及优化[硕士学位论文]. 厦门:华侨大学,2012
- [42] 冯精武, 喻擎苍, 芦 宁, 冯海明. 调焦系统中数字图像清晰度评价函数的研究 [J]. 机电工程. 2011, 28(3):354-368.
- [43] 蒋海华. 基于图像清晰度评价函数的显微镜自动调焦技术研究[J]. 光学技术. 2008, 34:284-285.

- [44] 王义文, 刘献礼, 谢晖. 基于小波变换的显微图像清晰度评价函数及 3-D 自动调焦技术[J]. 光学精密工程. 2006, 14(6):1063-1069.
- [45] 祝世平, 房建成, 周锐. 一种新的能量谱-熵图像聚焦评价函数[J]. 北京航空航天大学学报. 1999, 25(6):720-723.

附录 I 攻读硕士期间发表的论文

1. Zhuo Hu, Xiaojun Liu, Wenjun Yang, Xueli Liu. Damping Ratio Optimization of Rob Mechanism of Stylus Scanning Profiler. Transactions of the Institute of Measurement and Control (under review)