

文章编号 1004-924X(2001)06-0584-04

移相式数字波面干涉仪中的几个技术问题

于瀛洁, 韦春龙, 陈明仪

(上海大学 精密机械工程系, 上海 200072)

摘要: 光学件波面测量在光学加工业中有着大量的需求, 近年来相关测量技术发展非常迅速, 其中移相技术是较典型的代表, 发展日趋成熟并得到了广泛应用。以 PG-15 型平面干涉仪为硬件基础, 采用移相技术, 解决了其中移相值标定、相位解调、误差处理中的难点, 研制了数字波面干涉仪。对干涉仪中的这几个关键技术问题进行了讨论, 并给出了相应的解决方法。

关键词: 波面干涉仪; 移相值标定; 相位解调; 误差处理

中图分类号: TH744.3 文献标识码: A

1 引言

在光学加工业中, 对波面检测仪器有着大量的需求, 用于满足各种用途、各种形状和各种尺寸的光学元件的波面检测要求, 其中波面干涉仪是应用最为广泛、测量精度较高的检测仪器。由于光学元件波面检测精度、检测速率、信息存储等方面的要求, 当前更加需要的是数字化的检测仪器。国外在这这方面的工作起步早、发展快, 已推出了大量应用于各种检测范围和用途的数字波面干涉仪, 在国内已有较多用户。近年来国内外光学加工业不断发展, 对加工元件精度的提高和市场的日益国际化, 对高精度的数字波面干涉仪提出了大量的需求, 推动了这方面的研制工作的进程, 如浙江大学、南京理工大学、长春光机所、上海光机所、上海大学等都在这方面做了大量的工作, 向市场推出了具有自主知识产权的仪器, 但总的来说离市场的大量需求还有很大差距, 特别是需求量很大的在线检测仪器, 因此还需在此方面做更多的工作, 加快研制和技术转化步伐。

本文将介绍以上海光机所生产的 PG-15 型数字波面干涉仪为硬件基础, 采用移相技术研制的数字波面干涉仪, 简述其关键技术、解决方法。

2 数字波面干涉仪组成及工作原理

2.1 数字波面干涉仪组成

干涉仪的结构示意如图 1 所示。测量装置中采用压电陶瓷推动参考镜移动, 以 CCD 摄像系统代替原用于照相的相机。从被测表面和参考镜反射的光束干涉, 由 CCD 接收干涉场强信号。

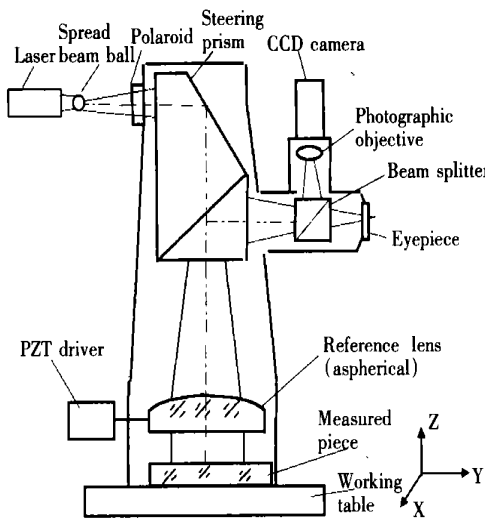


Fig. 1 Diagrammatic sketch of the wave front interferometer.

2.2 工作原理

通过压电陶瓷伸缩改变参考镜位置, 以改变干涉场强信号的附加位相。第 k 次移相所得到的干涉场强信号为

$$I_k(i, j) = A + B \cos[\varphi(i, j) + \beta_k] \quad (1)$$

式中: $\varphi(i, j)$ — 被测相位, 反映了被测波面。

A — 背景光强,

B — 调制度,

β_k — 第 k 次移相的附加相位。

通过改变 β_k , 得到多组方程, 采用最小二乘法, 可以计算出 $\varphi(i, j)$ 。具体计算步骤如图 2 示。

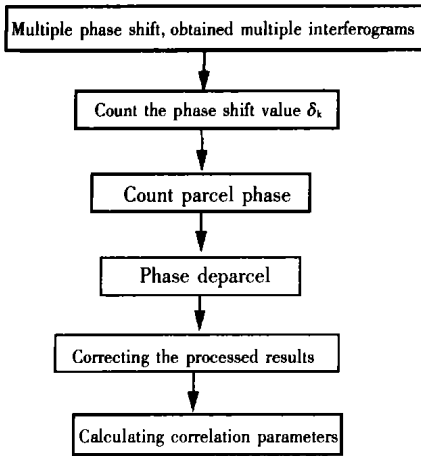


Fig. 2 Calculation steps.

3 关键技术及解决方法

3.1 相位分布计算方法

为了求解公式(1)中的相位分布, 人们提出了很多算法, 以消除探测器非线性误差、量化误差、移相器线性和非线性误差、振动和扰动引入的误差、频率混迭等误差^[1]。这些算法能达到预定目的, 关键是移相是否准确。为确保移相的准确性, 一种方法是依靠硬件保证, 另一种方法是通过软件标定出真实移相值。具体采用哪种方法决定于硬件条件。

本文的测量装置采用了软件标定的方法, 采用迭代过程交替求解位相分布和相移量的最小二乘解^[2-3]。所采用的算法不但可以求出实际的移相值, 而且在求解中消除了参考镜移动过程中由于移相器或导轨等引入的倾斜误差, 因此可以大大降低对移相器和导轨精度的要求。

3.2 相位解调算法

利用移相技术实现测量时, 由于算法中引入了反正切函数, 使计算出的位相分布包裹于 $[-\pi, \pi]$ 之间。为了获得真实的位相分布, 必须进行相位解调, 即一般称之为“去包裹”的过程。去包裹

的算法很多, 总体上可以分为两大类: 路径跟踪算法和与路径无关算法^[4]。因为真实的位相分布是唯一的, 因此尽管两类算法给予的数学模型不同, 但本质上是统一的。但对于具体问题而言, 各算法有各自的优缺点及解决问题的范围, 健壮性不同。本文采用了健壮较强的基于最小二乘的与路径无关算法。采用了加权离散余弦变换算法^[5]、预条件共轭梯度算法^[5]和基于松弛迭代的多网格算法^[6]作为可选择算法。尽管上述三种算法在解决各种形状干涉图都具有很强的健壮性, 但为了保险起见, 装置设定了三种可选择算法。

上述三种算法均是基于最小二乘法进行求解的, 由于最小二乘的特点, 在去包裹结果中会损失一部分高频信息。为此, 本文采用了对结果进行校正的方法, 消除算法误差。即以计算得到去包裹位相为基准, 原始的包裹位相与其进行比较, 出现跳变处进行加(减) $2\pi k$ 的运算, 使加(减)后的相位值与去包裹位相偏差绝对值最小, 这时以加(减)后的相位值作为最终计算结果。通过这样的校正后, 可以完全消除去包裹算法所带来的误差。一般将这一过程称为“后处理”。高精度检测中, 采用最小二乘法时这一过程是非常必要的。

由于采用了校正, 只要能得到误差不大的去包裹位相^[10], 各种去包裹算法均可以得到一致的结果。运用上述三种算法, 对任意形状信噪比不同的干涉图进行处理, 得到了满意的结果。但本文采用的三种算法, 对具有非连接区域的干涉图不能进行有效处理。

3.3 倍频误差的处理方法

探测器的非线性误差、量化误差、移相器误差、振动和扰动及其他因素引入的误差, 在测量结果中多以干涉条纹数的倍频形式出现, 除了在处理过程中尽量减小它们的影响外, 在结果中还可以进一步进行处理。本文采用了下列两种方法。

3.3.1 最小二乘拟合方法^[7]

Johannes Schwider 认为移相干涉仪误差主要由移相不准确引起, 在结果中带来的误差可表示为:

$$\Delta\varphi \approx a + b\cos 2\varphi + s\sin 2\varphi \quad (2)$$

因为误差以正弦波的形式出现在结果中, 因此可以采用最小二乘拟合的方法来减小。在最小二乘意义下 a, b, s 可以求出, 从而计算出 $\Delta\varphi$ 。从结果中减去 $\Delta\varphi$ 就可以减小倍频误差的影响。因为在

倍频误差中二次误差是主要的,因此,采用此方法可以大大减小倍频误差。

3.3.2 多次平均法^[8 9]

在真实位相中引入的误差项可表达为

$$\Delta\varphi(x, y) = \sum_{n=2}^{\infty} c_n \cos n\varphi(x, y) + s_n \sin n\varphi(x, y) \quad (3)$$

移相 N 次, 获得 N 幅干涉图。通过 $1 \sim m$ 幅(刚好为一整周期), 计算相位分布 φ_1 ; 通过 $2 \sim m+1$ 幅, 计算相位分布 φ_2 ; 如此类推, 获得 $\varphi_3 \dots \varphi_m$ 。结果为:

$$\begin{aligned} \bar{\varphi} &= \sum_{i=1}^{N-m} \varphi_i(x, y) = \varphi(x, y) + \\ &\frac{1}{N-m} \sum_{i=1}^{N-m} \Delta\varphi_i(x, y) \\ &= \varphi(x, y) + \frac{1}{N-m} \sum_{i=1}^{N-m} \sum_{n=2}^{\infty} c_n \cos n \cdot \\ &\quad [\varphi(x, y) + 2\pi(i-1)/m] + \\ &\quad \frac{1}{N-m} \sum_{i=1}^{N-m} \sum_{n=2}^{\infty} s_n \sin n \cdot \\ &\quad [\varphi(x, y) + 2\pi(i-1)/m] \quad (4) \end{aligned}$$

当 N 足够大时, 可以大大减小二倍频和多倍频的误差。

另一种多次平均的方法是整周期移相 m 次, 以第一幅为移相参考零值, 计算相位 φ_1 ; 再以第二幅为移相参考零值, 计算相位 φ_2 ; 如此类推, 获

得 $\varphi_3 \dots \varphi_m$ 。同样可以得到同(4)式类似的表达式。这种平均方法可以减少移相幅数, 同样可以大大减小二次倍频和多次倍频误差。

在应用最小二乘拟合方法时, 如果被测波面本身含有二次和多次倍频形式的分布, 这种方法会对结果造成一定影响, 在实际应用中应引起重视。

在应用多次平均方法时, 采样的幅数应足够多, 不然方法是不稳定的。

作者在实际测试中对上述两种方法都进行了应用, 证明均是行之有效的方法, 但在应用中应注意上述两点注意事项。

4 结 论

本文对移相式数字波面干涉仪中的几个关键技术问题进行了讨论, 包括移相值标定技术、位相值计算方法、相位解调技术、误差处理技术等。在对干涉图进行处理中, 滤波也是一个非常关键的环节, 应引起足够重视。同时, 在利用数字波面干涉仪进行测量中, 处理软件要充分考虑硬件的实际条件, 对干涉仪光强的稳定性、探测器的饱和限、外界振动情况等都要进行针对性的处理。在硬件条件下不能达到较为理想的情况下, 合适的软件处理方法是十分重要的。

参考文献:

- [1] Malacara Daniel, Servin Manuel, Malacara Zacarias. Interferogram analysis for optical testing[M]. Marcel Dekker. Inc, 1998.
- [2] Wei Chunlong, Chen Mingyi. General phase stepping algorithm with automatic calibration of phase steps[J]. Opt. Eng, 1999, 38(8): 1357- 1360.
- [3] 郭红卫, 陈明仪, 韦春龙. 基于|阶泰勒展开的迭代最小二乘移相新算法[J]. 光学学报, 2001, 21(1): 72- 74.
- [4] Ghiglia Demmos C, Pritt Mark D. Two dimensional phase unwrapping[M]. John Wiley & Sons. Inc, 1998.
- [5] Ghiglia D C, Romero L A. Robust two dimensional weighted and unweighted phase unwrapping that uses fast transforms and iterative methods[J]. J. Opt. Soc. Am. A, 1994, 11: 107- 117.
- [6] Pritt M D. Phase unwrapping by means of multigrid techniques for interferometric SAR[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1996, 32(3): 738- 738.
- [7] Schwider J, Dresel T, Mancke B. Some considerations of reduction of reference phase errors in phase stepping interferometry[J]. Appl. Opt, 1999, 38(4): 655- 659.
- [8] Hariharan Parameswaran. Phase shifting interferometry: minimization of systematic errors[J]. Opt. Eng, 2000, 39(4): 967- 969.
- [9] Yu Yingjie, Wei Chunlong. Effective error reduction method in phase shifting interferometer[J]. SPIE, 2000, 4110: 283- 290.
- [10] 李国栋, 韦春龙, 于瀛洁, 等. 图形域干涉图中的相位解包裹[J]. 光学 精密工程, 2000, 8(5): 473- 477.

Technical Problems in Digital Phase stepping Flatness Interferometers

YU Ying jie, WEI Chur long, CHEN Ming yi

(*Department of Precison Mechanical Engineering,
Shanghai University(Yanchang Campus), 149 Yanchang Road, Shanghai 200072, China*)

Abstract: Flatness measurement of optical workpieces in optical manufacturing is very important. In recent years, the relative techniques have developed rapidly, expecially phase stepping technique, which has become mature gradually and has been applied widely. The paper utilizes the flatness interferometer, mode PG-15, as a basic hardware to design a digital flatness phase stepping interferometer. In the course of designing, a few of key difficulties had been overcome, including phase step calibration, phase unwrapping and error processing. The paper discusses these key techniques and presents their solving methods in detail.

Key words: flatness interferometers; calibration of phase step; phase unwrapping; error processing

作者简介:于瀛洁(1969-),女,辽宁省宽甸县人。1998年毕业于哈尔滨工业大学,工学博士,现为上海大学精密机械工程系副研究员,主要从事光学检测方面研究工作。

中国光学与应用光学文摘

《中国光学与应用光学文摘》(双月刊)是由中科院文献情报中心、中科院光学情报网和中科院长春光学精密机械与物理研究所联合主办,经国家科委批准的国家一级检索期刊。该刊主要收集我国科研人员在国内外期刊中发表的有关光学、光电子学以及光学在各领域的应用等方面的论文,国内召开的有关会议论文和国内有关单位的学位论文。该刊1985年创刊,现全部以文摘形式报道国内光学领域的最新研究成果与进展。每期报道文献750篇。

2001年《中国光学与应用光学文摘》仍通过邮局发行,邮发代号:12-140,定价9.00元/期,订阅本刊的新老订户可去邮局订阅该刊,在邮局漏订或想补订该刊的订户,可随时与《中国光学与应用光学文摘》编辑部联系,银行汇款与邮局汇款皆可。

单 位:中科院长春光学精密机械与物理研究所《中国光学与应用光学文摘》编辑部

邮 编:130021

地 址:吉林省长春市工农大路61号

银 行:中行吉林省分行营业部

联系人:杨妹清

账 户:04单位438部

电 话:(0431)5684692转2438

账 号:018211000889

E-mail: xxfw@ciomp.ac.cn