

基于多波长点衍射干涉的非球面面形检测技术研究

耿乐琪¹, 李兵^{1,2}, 赵卓^{1,*}, 路嘉晟¹, 胡振川¹

(1. 西安交通大学精密微纳制造技术全国重点实验室 西安 710054;

2. 西安交通大学微纳制造与测试技术国际合作联合实验室 西安 710054)

Email: zhuozhao@xjtu.edu.cn

摘要: 非球面元件是光学领域中的一种重要元件, 面形由多项高次方程决定, 且面形上各点曲率半径各不相同, 可用于校正各种像差, 其面形形状和加工质量直接影响着光学仪器的性能。为实现对大口径及高次非球面的面形测量, 本文提出了一种多波长点衍射干涉的检测方法, 基于拍频定理, 扩大了点衍射干涉的检测范围, 并应用机器视觉技术完成对多波长光路的校准。同时为提高检测效率, 减少环境扰动的影响, 本文提出了一种基于干涉光强的两步式相位提取方法, 减少了多波长的移相次数, 提高了系统的稳定性。通过相关的仿真和实际的实验效果, 验证了该方法的有效性。

关键词: 多波长点衍射干涉; 非球面面形测量; 光学精密测量

1、研究背景

光学元件的加工质量则是决定整个光学系统性能的关键因素。非球面是一种面形由多项高次方程决定的元件, 具有校正像差、提高光能利用率等作用, 在民用与军事领域都有广泛应用^[1]。随着对非球面形状及加工精度的要求越来越高, 传统的菲索干涉仪和泰曼格林干涉仪由于标准镜头加工精度的限制, 已逐渐不能满足要求。为此, 本文提出了一种将点衍射干涉和多波长技术相结合的检测方法, 以实现大口径及高次非球面的精密测量。

点衍射干涉法是基于夫琅禾费衍射原理, 采用微米级小孔产生高精度衍射波前(精度可达 $\lambda/10000$, λ 为光源波长), 由光束经小孔产生的衍射波前可分为检测光和参考光, 当检测光经待测非球面反射后, 与测试光发生干涉, 得到携带有待测镜面形信息的干涉图, 最终被工业相机接收, 经过一系列相位处理后得到待测镜面形信息。尽管点衍射干涉的测量精度较高, 但其测量范围受到波长及相机分辨率限制, 两像素之间的光程差不得超过 $\lambda/2$, 即奈奎斯特采样原理^[2]。

为突破采样定理的限制, 本文提出了一种多波长点衍射干涉法。

2、研究内容

多波长点衍射干涉系统采用红($\lambda_1=633\text{nm}$)、绿($\lambda_2=532\text{nm}$)、蓝($\lambda_3=457\text{nm}$)三种波长, 来自三个激光发射器的三种激光经过偏振、扩束和反射后汇聚至同一光路形成合束光, 合束光通过衍射小孔产生衍射波前, 同时进行衍射干涉, 被3CCD接收后可同时获得红、绿、蓝三个通道

下的干涉图。经过多波长拍频合成及相位处理后，得到最终的面形信息，完成测量^[3]。

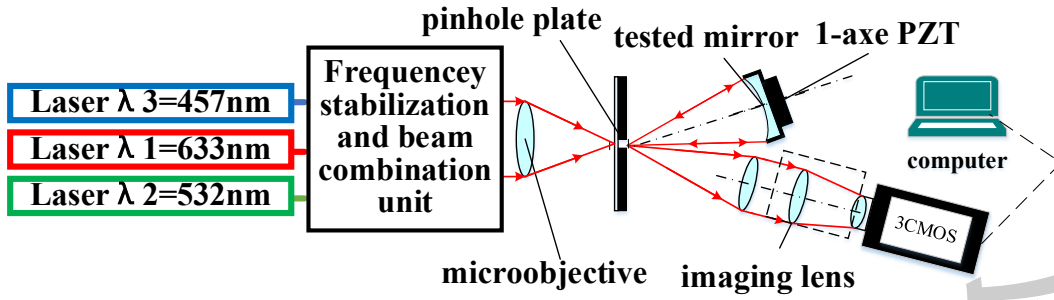


图 2-1 多波长点衍射干涉系统结构

拍频定理如下，设定在波长 λ_1 、 λ_2 下的包裹相位分别为 ϕ_1 、 ϕ_2 ，则合成的波长及其相位为：

$$\left\{ \begin{array}{l} \Lambda_{12_sub} = 1 / \left| \frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \right| \\ \phi_{12_sub} = \phi_1 - \phi_2 = \frac{2\pi h}{\Lambda_{12_sub}} = \begin{cases} \phi_{12} & \phi_{12} \geq 0 \\ \phi_{12} + 2\pi & \phi_{12} < 0 \end{cases} \\ \Lambda_{12_add} = 1 / \left| \frac{1}{\lambda_1} + \frac{1}{\lambda_2} \right| \\ \phi_{12_add} = \phi_1 + \phi_2 = \frac{2\pi h}{\Lambda_{12_add}} = \begin{cases} \phi_{12} & \phi_{12} \geq 0 \\ \phi_{12} + 2\pi & \phi_{12} < 0 \end{cases} \end{array} \right. \quad (2-1)$$

其中， $\Lambda_{12_sub} > \lambda_1$ 、 $\lambda_2 > \Lambda_{12_add}$ 。

基于上述可知，不同的组合方式可得到不同的合成波长 [4]。可根据待测镜的类型和精度要求选择最佳波长，因此多波长点衍射干涉测量具有更大的动态范围。

在点衍射干涉系统中，由于移相距离与波长相关，若选用传统的四步移相法，需要在每个波长下采集四幅干涉图，总共需要 12 幅，会导致移相次数过多，容易导致误差的累积，严重影响测量精度，因此本文将采用一种两步式的相位提取法，在每个波长下只需采集两幅干涉图即可，总共只需 6 幅，极大减少了移相次数。两步式相位提取是指通过相机预先记录干涉图的背景光强 $B(x, y)$ ，在单波长下只需采集两幅干涉图 $I_1(x, y)$ 和 $I_2(x, y)$ 即可完成该波长下的相位提取。

相关公式如下：

$$\left\{ \begin{array}{l} \phi(x, y) = \arctan \left[\frac{B(x, y) - I_2(x, y)}{I_1(x, y) - B(x, y)} \right] \\ \phi(x, y) = 2n\pi + \phi(x, y) \end{array} \right. \quad (2-2)$$

完成相位提取后，经过解包即可得到相位分布 [5]。面形差与干涉场相位分布的关系为：

$$P(x, y) = \frac{\phi(x, y)}{4\pi} \lambda \quad (2-3)$$

为便于光路的校准，本文将机器视觉技术应用在多波长点衍射干涉系统中，可实现对多波长合束、光束传播、光一孔对准和被测镜对准进行实时监测，辅助光路调整。搭建多波长实验台后，选用 152.4mm 的大口径非球面镜作为检测对象，实验图像如下：

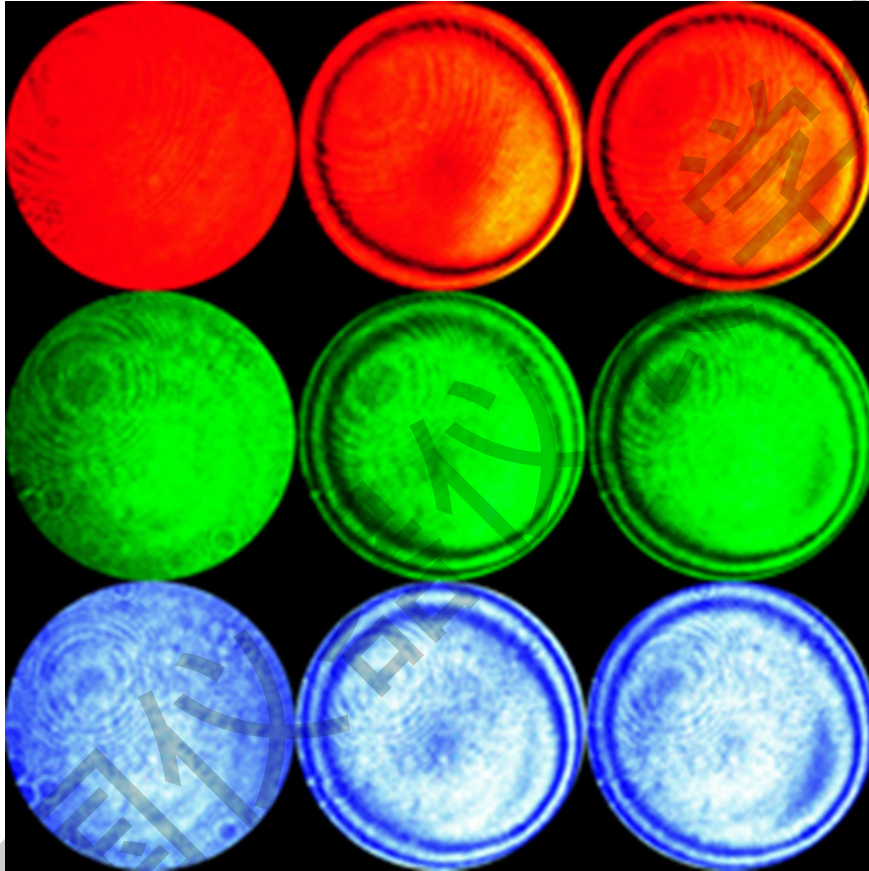


图 2-2 多波长干涉图采集

基于拍频定理，选用以下两种组合方式，并与 Zygo 测量结果进行比较，组合方式如下：

$$\begin{aligned} \Lambda_1 &= \Lambda_{1_23\text{sub_sub}} = 1 / \left(\left| \frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\Lambda_{23_sub}} \right| \right) \\ &= 1 / \left(\left| \frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\left| \frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_3} \right|} \right| \right) = 786.6\text{nm} \quad (2-4) \\ \Lambda_2 &= \Lambda_{23_sub} = 1 / \left(\left| \frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_3} \right| \right) = 3241.7\text{nm} \end{aligned}$$

表 2-1 非球面镜实验结果比较

Wavelength	PV	RMS
$\Lambda 1$ (786.6nm)	0.3054 $\Lambda 1$	0.0585 $\Lambda 1$
$\Lambda 2$ (3241.7nm)	0.1593 $\Lambda 2$	0.0323 $\Lambda 2$

经过 Zygo 的多次测量，平均 PV 值为 $0.358 \lambda_1$ 、平均 RMS 值为 $0.071 \lambda_1$ 。将表 2-1 中的测量结果进行单位转换，在 $\Lambda 1$ 下的测量结果为 $PV=0.3795 \lambda_1$ ， $RMS=0.0727 \lambda_1$ ；在 $\Lambda 2$ 下的测量结果为 $PV=0.8158 \lambda_1$ ， $RMS=1.654 \lambda_1$ 。对比可知，在合成波长 $\Lambda 1$ 下的测量结果与 Zygo 干涉仪的测量结果相近， $\Delta PV=0.0215 \lambda_1$ ， $\Delta RMS=0.0017 \lambda_1$ 。而 $\Lambda 2$ 的测量结果像差极大，因此需要选择最佳的波长组合方式。经过对比，多波长系统与 Zygo 的 PV 值相差在 $\lambda_1/40$ 以内，RMS 值相差在 $\lambda_1/100$ 以内，完全满足了在精度上的要求，而且 $\Lambda 1 > \lambda_1$ ，根据奈奎斯特采样定理可知其具有更大的测量范围。

3、结论

为摆脱传统干涉测量中受镜头加工精度限制的问题，同时实现对大口径非球面面形的精密测量，本文基于针孔点衍射干涉原理，结合多波长干涉技术，提出了一种多波长点衍射干涉测量系统。该系统可根据待测非球面的偏离度选择合适的组合方式，可产生超过 3000nm 的合成波长，大大提高了测量范围，同时为便于光路的搭建及精确对准，在文中提出了多波长合束质量检测光路、光斑—针孔辅助对准光路和被测镜辅助对准系统。并提出了一种更适用于多波长条件下的基于干涉背景光强的两步式相位提取法以代替四步移相法，以 152.4mm 口径的非球面作为检测对象进行实际的多波长点衍射干涉测量，并将测量结果与 Zygo 测量结果进行对照以验证该系统的实用性。

参考文献

- [1] Hao Q, Liu Y, Hu Y, Tao X. Measurement techniques for aspheric surface parameters. Light: Advanced Manufacturing[J]. 2023;4(3):292-310.
- [2] 李瑶, 杨甬英, 王晨, 陈元恺, 陈晓钰. 点衍射干涉检测技术 [J]. 中国光学. 2017;10(04):391-414.
- [3] Geng L, Li B, Zhao Z, Lu J. Multi-wavelength pinhole point diffraction interferometry for optics metrology with interferometric intensity based phase retrieval method[J]. Optics and Lasers in Engineering. 2024;178:108198.
- [4] Kumar UP, Mohan NK, Kothiyal MP. Red-Green-Blue wavelength interferometry and TV holography for surface metrology[J]. Journal of Optics. 2011;40(4):176-83.
- [5] Zhao Z, Li B, Kang X, Lu J, Liu T. Phase unwrapping method for point diffraction interferometer based on residual auto encoder neural network[J]. Optics and Lasers in Engineering. 2021;138:106405.