

文章编号: 1671-7449(2026)04-0474-08

J. Test Measur. Technol., 2026, 40(4): 474-481.

基于LED光源低相干干涉的镜片多参数测量方法

李学东^{1,2}, 张瑞^{1,2*}, 孙程斌^{1,2}, 王艳红¹, 王志斌²

(1. 中北大学 信息与通信工程学院, 山西 太原 030051;

2. 中北大学 山西省智能微波光电技术创新中心, 山西 太原 030051)

摘要: 光学镜片的多参数高效无损检测是提升光学制造质量的关键环节。传统的接触式测量方法存在效率低且易损伤镜片表面的问题, 而现有的非接触光学检测技术难以同步实现厚度、折射率与阿贝数的高精度测量。提出一种基于LED低相干干涉技术的多参数同步检测方法, 采用迈克尔逊干涉光路结构, 通过等光程原理, 建立镜片中心厚度、折射率及阿贝数的联合解算模型。实验中使用波长中心为465 nm和625 nm的LED光源、50:50分束器及光栅测距, 对树脂、玻璃及聚碳酸酯(PC)材质的标准镜片进行重复测量。实验结果表明: 该方法可实现0.5~5.0 mm范围内镜片厚度的测量, 绝对误差为 $\pm 5 \mu\text{m}$; 折射率测量范围为1.3~1.8, 绝对误差为 ± 0.005 ; 阿贝数分析范围为25~70, 相对误差为5%。系统重复性误差低于0.1%, 单次测量时间小于9 s。该方法为光学镜片生产质检提供了高效和高精度的无损检测解决方案。

关键词: 低相干干涉; 镜片中心厚度; 折射率; 阿贝数

中图分类号: TP212

文献标识码: A

DOI: 10.62756/csjs.1671-7449.2026051

引用格式: 李学东, 张瑞, 孙程斌, 等. 基于LED光源低相干干涉的镜片多参数测量方法[J]. 测试技术学报, 2026, 40(4): 474-481.

Li Xuedong, Zhang Rui, Sun Chengbin, et al. Multi-parameter measurement method for lenses based on low-coherence interference of LED light source[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2026, 40(4): 474-481.

Multi-Parameter Measurement Method for Lenses Based on Low-Coherence Interference of LED Light Source

Li Xuedong^{1,2}, Zhang Rui^{1,2*}, Sun Chengbin^{1,2}, Wang Yanhong¹, Wang Zhibin²

(1. School of Information and Communication Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China;

2. Technology Innovation Center of Shanxi Provincial for Intelligent Microwave Photoelectric,
North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: Multi-parameter efficient and non-destructive testing of optical lenses is a key link in improving the quality of optical manufacturing. Traditional contact measurement methods suffer from low efficiency and potential damage to the lens surface, while existing non-contact optical detection technologies struggle to simultaneously achieve high-precision measurements of thickness, refractive index and Abbe number. A multi-parameter synchronous detection method based on LED low-coherence interferometry technology is proposed. Utilizing a Michelson interferometer optical path structure, a joint solution model for lens cen-

【收稿日期】2025-08-12

【修回日期】2025-12-18

【录用日期】2025-12-30

【基金项目】国家自然科学基金资助项目(62105302); 中央引导地方科技发展资金资助项目(YDZJSX2025D041); 航空科学基金资助项目(2023Z0190U0001)

【作者简介】李学东(1999—), 男, 硕士生, 主要从事光电检测等研究。E-mail: 13403623799@163.com。

*【通信作者】张瑞(1987—), 男, 教授, 博士, 主要从事光电检测和光调制等研究。E-mail: zhangrui@nuc.edu.cn。

ter thickness, refractive index and Abbe number is established through the principle of equal optical path length. In experiments, LED light sources with wavelengths centered at 465 nm and 625 nm, a 50:50 beam splitter, and a grating for distance measurement are used to perform repeated measurements on standard lenses made of resin, glass and polycarbonate (PC) materials. The experimental results show that this method can measure lens thickness within the range of 0.5—5.0 mm, with an absolute error of $\pm 5 \mu\text{m}$; the refractive index measurement range is 1.3—1.8, with an error of ± 0.005 ; the Abbe number analysis range is 25—70, with a relative error of 5%. The system's repeatability error is below 0.1%, and the single measurement time is less than 9 s. This method provides an efficient and high-precision non-destructive testing solution for optical lens production quality inspection.

Key words: low-coherence interferometry; central thickness of lens; refractive index; Abbe number

0 引言

科学技术的创新发展为社会生产生活提供了便捷性支撑,也丰富了公众的精神文化娱乐供给,同时也带来了一系列的眼科问题。在这些问题上,近视已成为我国最常见的眼科疾病之一。镜片度数^[1]、中心厚度^[2]、折射率^[3]和阿贝数^[4],这4个参数是眼镜镜片选择中的关键要素,它们共同影响着镜片的性能、舒适度及视觉效果。

目前,透镜中心厚度的测量方法可以分为接触式^[5]和非接触式两种。接触式测量方法主要使用测量仪的探针来标定待测透镜前后两个表面的顶点位置,直接获取待测透镜的中心厚度。常见的接触式测量方法有轮廓仪、千分尺等,这类测量方法会损伤待测透镜膜层及外表面的光洁度,另外由于探针频繁使用而造成的磨损会降低透镜中心厚度的测量精度,所以接触式测量方法很难满足高精密光学系统对透镜中心厚度的测量要求。

非接触式测量方法主要有低相干干涉法(如光学相干断层扫描(Optical Coherence Tomography, OCT))^[6]、激光共焦法^[7]和太赫兹时域光谱法^[8]等。目前,国内较为成熟的技术有史立波^[7]提出的激光共焦透镜中心厚度测量方法和周勇等^[9]研究的基于色差共焦原理的透镜中心厚度测量系统。但是,这类技术需要明确透镜的面形和材料折射率等条件,且计算复杂。低相干光干涉测量方法能够在未知透镜面形等条件的情况下,实现透镜在高精度装配环境中的实时测量,并且其测量范围大,单次可测透镜数量多,能实现远距离的高精度测量,是现今该领域的研究热点。

低相干干涉测量^[10-11]方法是一种以宽谱光源作为相干光源的干涉测量技术,其相干长度短,只有

在测量光和参考光的光程相等时才能产生干涉峰值,因此具有很好的空间定位特性,通过计算透镜前后镜面顶点对应干涉峰之间的距离变化可以得出透镜的中心厚度。因此,本文提出了一种基于LED光源低相干干涉的镜片参数测量方法。

1 实验方法

低相干干涉技术作为一种高精度的光学测量方法,其核心装置迈克尔逊干涉仪凭借独特的空间定位能力,在工业检测领域发挥着重要作用。这种基于19世纪末阿尔伯特·迈克尔逊经典设计的干涉系统^[12],通过巧妙的光路设计和低相干光源的结合,实现了微米级精度的非接触式测量。

1.1 基本原理

整个测量系统由5个关键模块构成:LED光源系统、参考臂、样品臂、分光镜和探测单元。其中,低相干光源作为系统核心,通常选用超辐射发光二极管(Super Luminescent Diode, SLED)或超短脉冲激光器,这类光源具有宽光谱特性(典型带宽达数十纳米),该光源的时间相干长度处于几微米到几十微米的范围,而这一短相干特性恰好为系统获得高空间分辨能力提供了关键的物理基础。当两束光的光程差超过相干长度时,干涉现象就会消失。系统工作时,宽带光源发出的光经过50:50分光镜被分为两束相同光束。参考臂的光路设计尤为精密,平面反射镜安装在微米级位移平台上,通过压电陶瓷驱动器可实现微米级位移控制。这束光经镜面反射后携带精确的相位信息返回耦合器。样品臂则根据被测对象特性设计,对于透镜厚度测量,需配置精密调整架来确保光束正入射,此时光束在透镜前后面产生的背

向反射光构成测量信号。当两束光在耦合器重新汇合时,只有在光程严格匹配的情况下才会产生明显的干涉信号。在实际测量中,通过精密移动参考镜扫描光程差,记录干涉信号包络的峰值位置。以透镜中心厚度测量为例,当参考臂光程分别匹配透镜前表面和后表面反射光时,探测器会记录到两个干涉峰值。这种测量方式完全无需接

触样品,特别适用于精密光学元件或易损材料的检测。值得注意的是,该技术的应用已超越几何量测量范畴。

1.2 光学系统设计

图 1 是基于 LED 光源的镜片多参数分析系统,该系统主要基于迈克尔逊干涉仪结构组建^[13]。

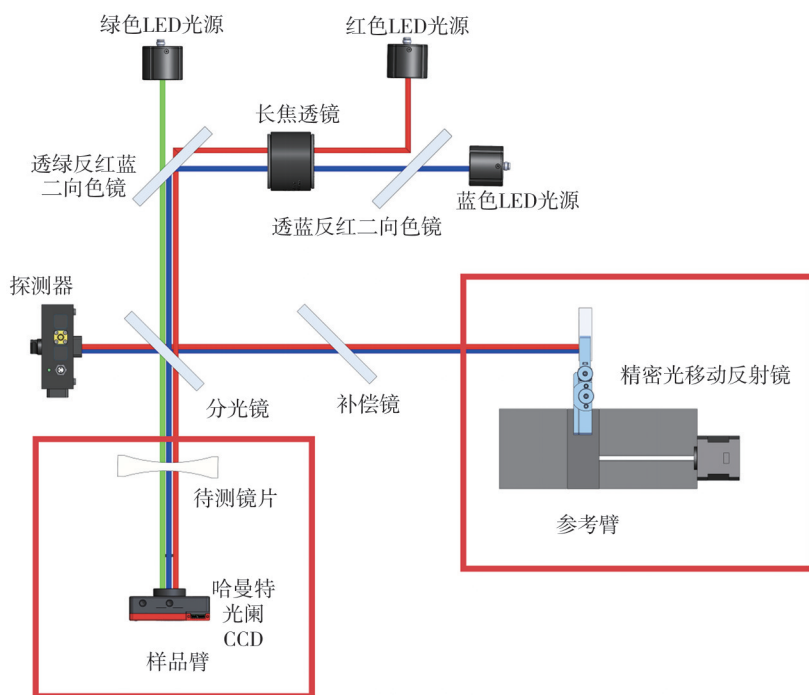


图 1 基于 LED 光源干涉的透镜参数测量光路图

Fig. 1 Optical path diagram for measuring lens parameters based on LED light source interference

光学测量系统使用了 3 个不同波长 LED 光源,包括中心波长分别为 465 nm(半高全宽 20~25 nm)的蓝色 LED 光源、525 nm(半高全宽 18~22 nm)的绿色 LED 光源,以及 625 nm(半高全宽 22~28 nm)的红色 LED 光源。镜片、哈特曼光阑和 CCD 共同组成系统的样品臂;精密可移动反射镜上携带光栅尺组成系统的参考臂,反射镜为全反镜,对波长为 400~1 100 nm 的光全部反射,反射率达 99.5%。分光镜将照射到分光镜的波长为 400~1 100 nm 的光分为光强相同的两束光;透绿反红蓝二向色镜,对 500~550 nm 波长的光透射,400~500 nm 和 550~1 100 nm 波长的光被反射;透蓝反红二向色镜,对 400~520 nm 波长的光透射,520~1 100 nm 波长的光被反射;补偿镜用于补偿镜片多参数测量系统中两束相干光经分光板传播时产生的光程差,消除玻璃介质色散对干涉条纹的影响,保证光路对称以实现等光程的精准

测量。为确保光学系统精度,所有二向色镜、分光镜和补偿镜采用了材质和厚度相同的设计,可有效抵消系统色散,分光镜与二向色镜透射的反射率的波动幅度严格控制在 $\pm 2\%$ 以内。

绿色 LED 光源在发出光束后,先经过透绿反红蓝二向色镜透射后到达分光镜,再透射过分光镜后,经哈曼特光阑成像于 CCD。绿色 LED 光源专用于镜片屈光度的精确测量与镜片焦点中心的定位,所以该部分只描述了绿光在分光镜的透射光路情况。

红色 LED 光源发出光束后,先经过透蓝反红二向色镜反射后,再经过透绿反红蓝二向色镜的反射后到分光镜。分光镜将光束一分为二:参考臂的光束经过补偿镜和精密可移动反射镜反射原路返回到分光镜;样品臂的光束先照射至镜片样品,光束经过镜片的上、下表面和哈特曼光阑片的上表面后会携带信息再反射到分光镜。样品臂光路和参考臂光路中经过分光镜透射的光在探测器

的位置处产生干涉,其干涉信号由信噪比为 15 dB 的探测器采集。蓝色LED光源发出光束后,经过透蓝反红二向色镜的透射后与红光光束重合,后续传播路径与红色光束保持一致。

位移测量方面,由光栅尺标记采集精密电机推动滑块的位移,当参考臂与样品臂等光程时产生干涉最强信号,记录即时位置。

当宽谱光源射入迈克尔逊光路,并由光谱仪接收光谱干涉图样,其强度分布为

$$I(f, L) = I_0(f) \cdot \left\{ 1 + \cos \left(2\pi \cdot \frac{2mL}{c} f \right) \right\}, \quad (1)$$

式中: f 为光的频率; $I_0(f)$ 为光源的光谱强度分布; L 为测量臂和参考臂的几何距离差值; c 为光在真空中的速度; m 为空气折射率。对于一个固定的 L , $I(f, L)$ 是一个受 $I_0(f)$ 调制的余弦曲线,其频率周期为 $\alpha = 2m(f) \cdot L/c$ 。首先对式(1)进行傅里叶变换得

$$i(\tau) = FT\{I(f)\} =$$

$$i_0(\tau) \times \left[\frac{1}{2} \delta(\tau + \alpha) + \delta(\tau) + \frac{1}{2} \delta(\tau - \alpha) \right], \quad (2)$$

式中: $\delta(\tau)$ 为狄拉克函数; τ 为两臂的延时; $i_0(\tau)$ 为 $I_0(f)$ 的傅里叶变换,因 $I(f)$ 本身为一实函数,经傅里叶变化后变为关于 $\tau=0$ 对称的 3 个干涉峰。为确定峰值位置,利用特定宽度的矩形窗截取干涉峰,经傅里叶逆变换为

$$I'(f) = FT^{-1} \left\{ i_0(\tau) \times \frac{1}{2} \delta(\tau - \alpha) \right\} = \frac{1}{2} I_0(f) \exp(i\varphi(f)). \quad (3)$$

通过反正切函数获得相位 $\varphi(f)$,

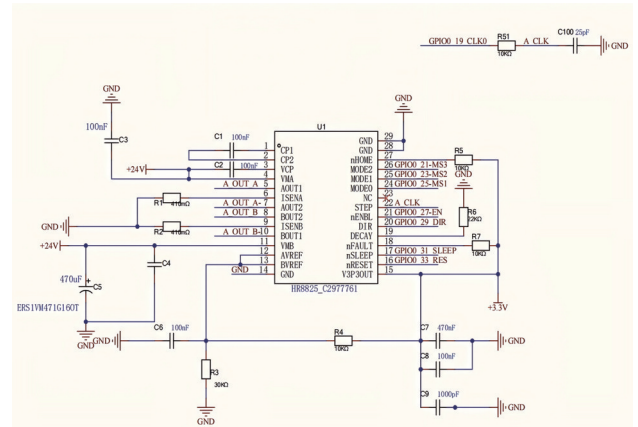
$$\varphi(f) = \tan^{-1} \left[\frac{\text{Im}(I'(f))}{\text{Re}(I'(f))} \right]. \quad (4)$$

因 $\varphi(f)$ 是以 π 为周期的卷裹相位,因此需通过解卷相位求得光频与相位之间的函数关系。 $M = m + (dm/df)f$, 为空气的群折射率。通过最小二乘拟合确定相频曲线的斜率便可得到几何距离 $L^{[13-16]}$ 为

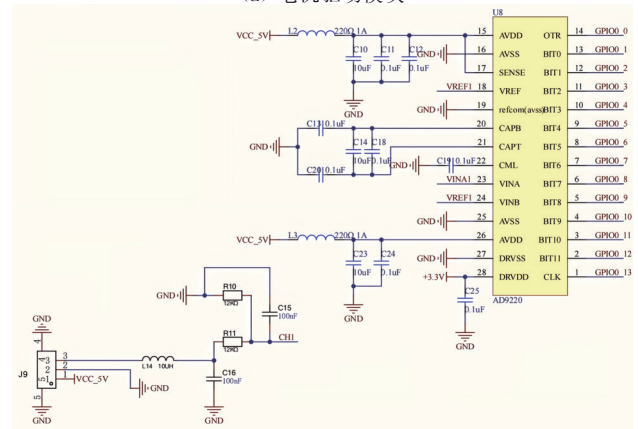
$$L = \frac{c}{4\pi M} \cdot \frac{d\varphi}{df}. \quad (5)$$

1.3 硬件电路设计

该光学测量装置的硬件电路系统采用高度模块化的设计理念,通过五大功能模块的深度集成与协同优化,构建面向精密运动控制与光学测量的高性能解决方案。系统架构以FPGA为核心控制中枢,通过多层总线架构实现各模块的智能调度与实时交互,在满足微秒级响应速度的同时,显著提升了系统扩展性与抗干扰能力。特别设计的磁珠隔离与电源分割策略,将数字电路、模拟电路和大功率驱动电路的地平面物理隔离。电源部分通过DC-DC实现5 V稳定输出,结合滤波与隔离设计降低噪声干扰;电机驱动选用H桥芯片与光耦隔离,确保大电流负载下的安全性与响应速度;AD采集模块采用高精度运放调理信号和外部基准源,提升传感器数据可靠性;LED光源通过恒流驱动与脉冲宽度调制调光实现精准亮度控制,同时优化散热设计。图2为设计的电路原理图。



(a) 电机驱动模块



(b) AD采集模块

图2 电路原理图

Fig. 2 Circuit schematic diagram

2 实验结果分析

搭建迈克尔逊低相干光源干涉实验系统如图3所示,利用该装置对镜片中心厚度(d)、折射率(n)及阿贝数(v)进行测量,并对装置测量的稳定性进行验证。测量的镜片为对不同厂家的眼镜片进行测量,其中心厚度范围为0.9~5.0 mm,折射率为常见的1.50、1.56、1.60、1.67、1.71、1.74,阿贝数为25~70。

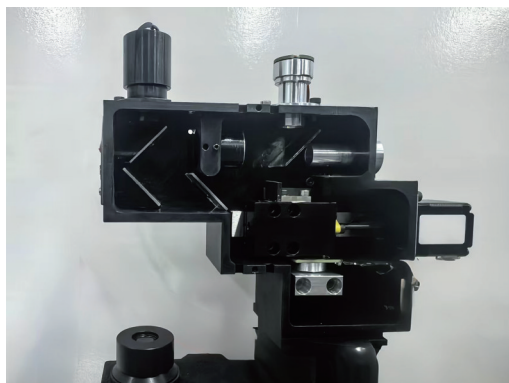


图3 实验装置图

Fig. 3 Experimental setup diagram

2.1 镜片厚度测量

在红色LED和蓝色LED光束进入系统时,当探测器探测到0光程干涉最强信号时,记录此时反射镜的位置。红色LED在未放置镜片时,在哈曼特反光膜产生最强信号时,此时反射镜的位置为 x_{10} ,在放置镜片后,在镜片上表面、下表面、哈曼特反光膜产生最强信号时的位置依次为 x_{11} , x_{12} , x_{13} 。同理,蓝色LED的4个位置为 x_{20} , x_{21} , x_{22} , x_{23} 。

红色LED、蓝色LED在放置镜片前光程差分别为

$$n_1 d = x_{12} - x_{13}, \quad (6)$$

$$n_2 d = x_{22} - x_{23}. \quad (7)$$

红色LED、蓝色LED在放置镜片后光程差分别为

$$(n_1 - 1)d = x_{11} - x_{10}, \quad (8)$$

$$(n_2 - 1)d = x_{21} - x_{20}. \quad (9)$$

由式(6)~式(9)可以得到镜片厚度 d 为

$$d = x_{12} - x_{13} - x_{11} + x_{10}, \quad (10)$$

$$d = x_{22} - x_{23} - x_{21} + x_{20}. \quad (11)$$

通过对10组不同镜片按文中上述方法进行测量,得到10组镜片的 d ,结果如表1所示。图4展示了25组镜片 d 使用本文方法的测量值,以及与

其他检测方法所测数值的误差。通过图4可以清晰地看出,本文检测方法检测出的镜片 d 误差在 $\pm 5 \mu\text{m}$ 之内。

表1 镜片厚度测量结果

Tab. 1 Lens thickness measurement results

序号	x_{10}/mm	x_{11}/mm	x_{12}/mm	x_{13}/mm	d/mm
1	100.055 55	95.005 69	98.786 29	101.411 29	2.424 86
2	100.055 55	95.416 26	97.875 17	101.046 89	1.467 57
3	100.055 55	95.270 42	97.822 04	101.086 18	1.520 99
4	100.055 55	95.784 04	97.626 53	100.753 35	1.144 69
5	100.055 55	95.774 85	97.555 15	100.730 12	1.105 73
6	100.054 35	95.270 72	97.436 81	100.925 40	1.295 04
7	100.135 76	95.629 40	97.607 15	100.932 54	1.180 97
8	100.133 83	95.583 38	97.577 83	100.938 12	1.190 16
9	100.133 83	95.909 14	97.787 17	100.821 78	1.190 08
10	100.133 83	95.672 24	97.571 22	100.853 72	1.179 09

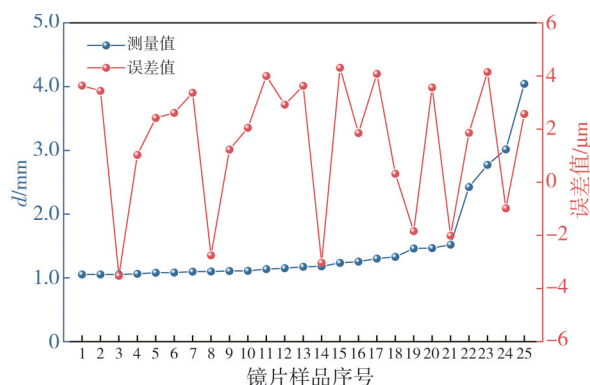


图4 镜片 d 的测量值与误差值

Fig. 4 Measurement values and errors of lens d

2.2 镜片折射率、阿贝数测量

由式(6)~式(9)可以得到镜片在红光和蓝光光源对应波长下的折射率 n_1 , n_2 为

$$n_1 = \frac{x_{12} - x_{13}}{x_{12} - x_{13} - x_{11} + x_{10}}, \quad (12)$$

$$n_2 = \frac{x_{22} - x_{23}}{x_{22} - x_{23} - x_{21} + x_{20}}. \quad (13)$$

根据国家眼镜玻璃搪瓷制品质量监督检验中心等单位发布的《眼镜镜片 光学树脂镜片》标准可知,待测镜片的折射率 n 为波长546.07 nm光对应的折射率,根据相对折射率计算,待测镜片折射率 n 的计算公式为

$$n = \frac{an_1 + bn_2}{a + b}. \quad (14)$$

因此,阿贝数 v 的计算公式为

$$v = \frac{n' - 1}{k(n_2 - n_1)}, \quad (15)$$

$$n' = \frac{cn_1 + en_2}{c + e}. \quad (16)$$

式中: a 、 b 、 c 、 e 和 k 为固定的常规系数,这些系数与红光LED和蓝光LED光源的中心波长有关; n' 为相对折射率。由于本系统采用的红光和蓝光LED光源(中心波长 $\lambda_{\text{蓝}}=465\text{ nm}$ 和 $\lambda_{\text{红}}=625\text{ nm}$)并非光学标准波长($\lambda_d=546.07\text{ nm}$ 、 $\lambda_f=486.13\text{ nm}$ 和 $\lambda_c=656.27\text{ nm}$),因此无法通过理论色散公式直接推导系数。但可以通过建立红蓝光折射率与标准波长光学参数的映射关系,确保系数的物理关联性和模型的可复现性。

不同镜片 n 与 v 的测量结果,以及它们分别与对应的标准值的误差值,见图5。标准值为镜片外包装上标注的值。由图5可以看出,由本文构建的测试装置和设计的实验方法所测量镜片 n 的误差 ± 0.005 , v 的精度为 $\pm 5\%$ 。

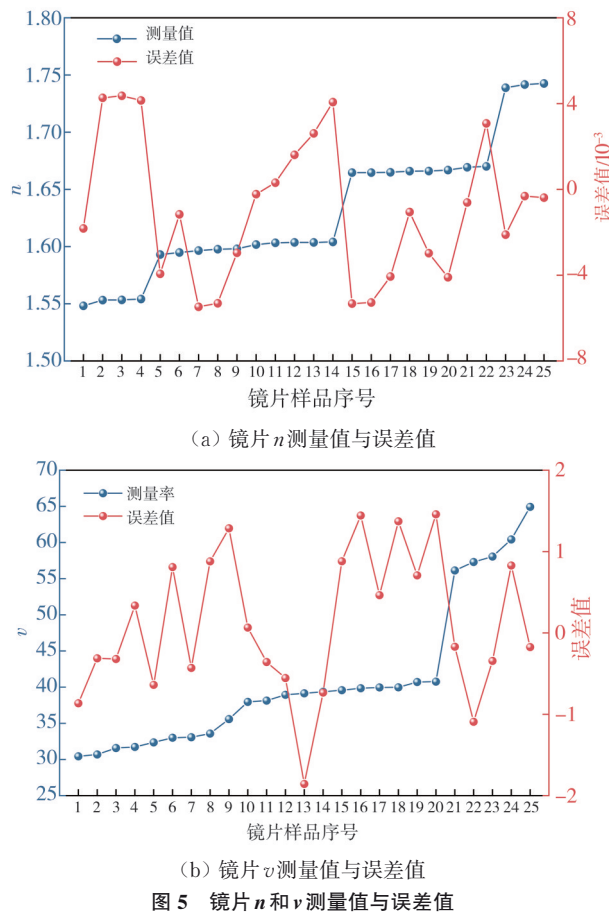


图5 镜片 n 和 v 测量值与误差值

2.3 镜片测试的稳定性

表2展示了同一镜片的10次重复测量结果,通过对实验数据的统计分析,测得该镜片 d 、 n 和 v 的标准差分别为 $0.000\ 108\ 326\text{ mm}$ 、 $0.000\ 103\ 8$ 和 $0.169\ 160\ 535$ 。这些极小的标准差数值表明,该测

量系统具有优异的重复性和测量一致性,能够为镜片提供高度可靠的检测数据。特别值得注意的是,折射率的测量精度达到了 10^{-4} 量级,这充分体现了该系统在光学参数检测方面的卓越性能。

表2 同一镜片的多次测量结果

Tab. 2 Multiple measurement results of a lens

序号	d/mm	n	v
1	1.372 07	1.555 815 8	34.908 428
2	1.371 85	1.556 155 0	34.717 373
3	1.371 84	1.555 974 3	34.463 096
4	1.371 92	1.556 127 2	34.665 209
5	1.371 96	1.556 045 8	34.653 712
6	1.371 79	1.556 128 2	34.751 115
7	1.372 05	1.555 976 3	34.421 754
8	1.372 00	1.556 041 4	34.344 890
9	1.372 09	1.556 087 4	34.630 432
10	1.372 06	1.556 129 9	34.543 976
平均值	1.371 96	1.556 048 1	34.609 999

为了进一步验证系统的适用性,本研究还对市场上常见的不同材料的镜片进行了测试。实验样本包括常规树脂镜片、高折射率树脂镜片、玻璃镜片,以及聚碳酸酯(PC)镜片等。测试结果(表3)表明,该系统能够准确测量各类镜片的光学参数,所有测量结果均在允许误差范围内。特别是在测量不同 n 范围的镜片时($1.50\sim 1.74$),本文所设计的光学系统均展现出良好的适应性和稳定性。

表3 不同种类的镜片测量结果

Tab. 3 Measurement results of different types of lenses

镜片种类	标注值			测量值		
	d/mm	n	v	d/mm	n	v
近视防控镜片	1.210	1.670	31.4	1.212	1.668	31.8
防蓝光镜片	1.340	1.555	35.5	1.338	1.555	36.1
渐进多焦点镜片	1.550	1.666	30.4	1.552	1.667	31.1
变色镜片	1.010	1.602	40.2	1.006	1.600	41.3
PC镜片	1.650	1.591	30.0	1.651	1.590	31.0
玻璃镜片	2.100	1.700	40.0	2.102	1.703	40.2

2.4 误差分析

宽线宽(低相干性)确保了干涉信号只在一个很短的光程差范围内出现,使得干涉峰非常尖锐,有利于精确定位,从而降低厚度测量的误差。

为解决精密电机位移误差($10\sim 15\text{ }\mu\text{m}$)及重复性差的问题,系统引入光栅尺作为位移反馈传感器。为验证其精度,需对光栅尺进行标定。本方案采用氦氖激光干涉仪作为位移测量基准,其激光波长稳定性好,可实现纳米级分辨率的绝对位移测量。在迈克尔逊干涉系统中,氦氖激光器的发出的激光经分光镜分为参考光与测量光,两束光反射后干涉形成明暗交替的条纹信号。位移

变化导致光程差改变,通过光电探测器记录干涉条纹数目并经电子细分处理,即可获得高精度的位移标准值。该系统将激光干涉仪所测位移作为

标准参考,与光栅尺通过正余弦信号插值解算的位移值进行同步比对。由图6可以得到本文装置的光栅尺度误差均在 $2.5\text{ }\mu\text{m}$ 以内。

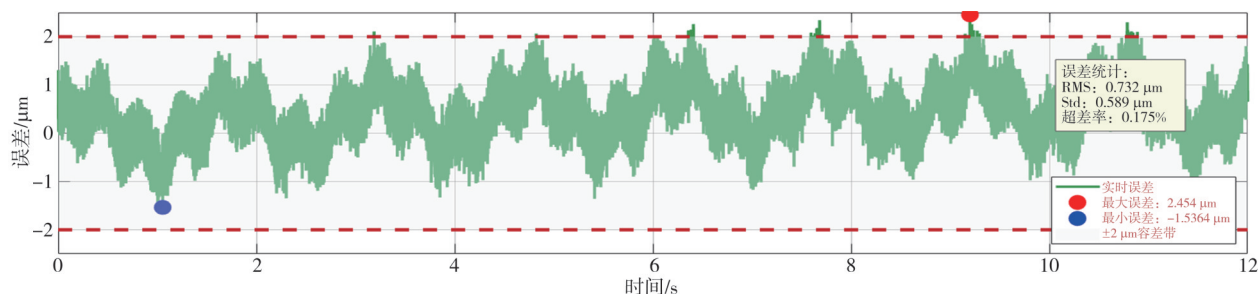


图6 光栅尺误差分析图

Fig. 6 Optical encoder error analysis

3 结 论

本文所设计的镜片光学测量系统是通过不同波长的LED光源对样品进行两次干涉信息的先后测量,可获取镜片的 d 、 n 和 v 等衡量镜片光学性能的关键参数,具有测量速度快、操作便捷、非接触式测量的技术优势。该实验系统的核心测量指标如下: d 测量范围为 $0.5\sim 5.0\text{ mm}$,测量精度达 $\pm 5\text{ }\mu\text{m}$; n 测量范围为 $1.3\sim 1.9$,测量精度达 ± 0.005 ; v 测量范围为 $25\sim 70$,测量精度达 5% 。另外,该装置适用于大多数常见光学镜片的参数检测。同时,通过对同一镜片的多次重复测量,进一步证实了该系统具备良好的测量重复性与稳定性。

利益冲突声明/Conflict of Interests

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors declare no relevant conflict of interests.

参考文献

- [1] 孙江政,任树海,潘保青. 数字式屈光度测试仪[J]. 测试技术学报, 1996, 10(3): 501-504.
Sun Jiangzheng, Ren Shuhai, Pan Baoqing. Digital diopter measuring instrument[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 1996, 10(3): 501-504. (in Chinese)
- [2] 李春艳,李庚鹏,刘继红,等. 光谱共焦法偏心下径向梯度折射率透镜的厚度测量[J]. 光学精密工程, 2022, 30(17): 2067-2076.
Li Chunyan, Li Gengpeng, Liu Jihong, et al. Thickness measurement of radial gradient index lens under eccentricity by spectral confocal method [J]. Optics and Precision Engineering, 2022, 30(17): 2067-2076. (in Chinese)
- [3] 李秉尧. 眼镜片折射率和中心厚度测量技术研究[D]. 佛山: 佛山科学技术学院, 2024: 40.
Li Bingyao. Research on spectacle lens refractive index and center thickness measurement techniques [D]. Foshan: Foshan University, 2024: 40. (in Chinese)
- [4] 石远菊,杨超,郑泰,等. 阿贝数在镜片顶焦度检测中的应用研究[J]. 工业计量, 2025, 35(4): 113-117.
Shi Yuanju, Yang Chao, Zheng Tai, et al. Research on the application of abbe number in lens top power detection [J]. Industrial Metrology, 2025, 35(4): 113-117. (in Chinese)
- [5] 李晓东,李晓玲. 影响轮廓仪测量精度因素的分析[J]. 理化检验(物理分册), 2005, 41(3): 134-136.
Li Xiaodong, Li Xiaoling. The analysis of influence on measurement accuracy of profile instruments [J]. Physical Testing and Chemical Analysis (Part A: Physical Testing), 2005, 41(3): 134-136. (in Chinese)
- [6] 金超群,杨宝喜,胡小邦,等. 低相干光干涉高精度透镜中心厚度的测量方法[J]. 中国激光, 2017, 44(6): 186-195.
Jin Chaoqun, Yang Baoxi, Hu Xiaobang, et al. Measurement method of lens central thickness with high precision based on low coherence interferometry [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(6): 186-195. (in Chinese)
- [7] 史立波,邱丽荣,王允,等. 激光差动共焦透镜中心厚度测量系统的研制[J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(3): 683-688.
Shi Libo, Qiu Lirong, Wang Yun, et al. Development of lens central thickness measurement system using laser differential confocal microscopy [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2012, 33(3): 683-688. (in Chinese)
- [8] 刘嘉腾. 太赫兹时域光谱系统在无损检测中的应用

- [D]. 成都: 电子科技大学, 2025: 42.
- Liu Jiateng. Applications of terahertz time-domain spectroscopy systems in non-destructive testing [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2025: 42. (in Chinese)
- [9] 周勇, 郭帮辉, 王潇询, 等. 透镜中心厚度测量系统光学设计[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(3): 94-100.
- Zhou Yong, Guo Banghui, Wang Xiaoxun, et al. Design of lens central thickness measuring optical system[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(3): 94-100. (in Chinese)
- [10] 毛哲辰, 陈宁, 郭钢祥, 等. 基于低相干干涉的小孔内表面几何尺寸及三维形貌测量系统[J]. 轻工机械, 2025, 43(3): 62-68.
- Mao Zhechen, Chen Ning, Guo Gangxiang, et al. Measurement system of geometric dimensions and three-dimensional morphology of small hole inner surface based on low coherence interference [J]. Light Industry Machinery, 2025, 43(3): 62-68. (in Chinese)
- [11] 陈昱铭. 基于低相干干涉的微小绝对距离测量方法[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2023: 22.
- Chen Yuming. Micro absolute distance measurement method based on low coherent interference[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2023: 22. (in Chinese)
- [12] 王家贵, 李林峰. 基于迈克尔逊干涉原理的孔径测量及装置设计[J]. 工具技术, 2013, 47(4): 58-60.
- Wang Jiagui, Li Linfeng. Aperture measurement which based on Michelson interference principle and design of device[J]. Tool Engineering, 2013, 47(4): 58-60. (in Chinese)
- [13] 赵媛媛, 肖作江, 梁旭. 基于光谱干涉技术的玻璃厚度及折射率测量方法[J]. 红外与激光工程, 2020, 49(2): 248-253.
- Zhao Yuanyuan, Xiao Zuojiang, Liang Xu. Measurement method of glass thickness and refractive index based on spectral interference technology[J]. Infrared and Laser Engineering, 2020, 49(2): 248-253. (in Chinese)
- [14] Balling P, Mašlka P, Křen P, et al. Length and refractive index measurement by Fourier transform interferometry and frequency comb spectroscopy [J]. Measurement Science and Technology, 2012, 23(9): 094001.
- [15] Bae J, Park J, Ahn H, et al. Total physical thickness measurement of a multi-layered wafer using a spectral-domain interferometer with an optical comb[J]. Optics Express, 2017, 25(11): 12689-12697.
- [16] Arosa Y, Lago E L, De La Fuente R. Refractive index measurements in absorbing media with white light spectral interferometry [J]. Optics Express, 2018, 26(6): 7578.