

## 大量程光谱共焦位移传感器设计及性能评估

邵潭彬, 郭文平\*, 席英皓, 刘子聿, 杨克成, 夏珉

华中科技大学光学与电子信息学院, 湖北 武汉 430074

**摘要** 现有的光谱共焦色散物镜存在测量量程小的问题,在工业检测中的应用受到较大的限制。针对这一问题,采用四片球面透镜设计了一种大量程的色散物镜,在 500~700 nm 波段内,测量量程达到 9.962 mm。在大色差的情况下对球差进行了优化,并利用设计的色散物镜搭建了光谱共焦位移测量系统,开展了性能评估实验。实验结果表明,系统实现了 10 mm 的测量范围,测量标准差为 0.5  $\mu\text{m}$ ,平均绝对误差为 0.6  $\mu\text{m}$ 。另外,对不同材料的样品进行了测量,结果表明,系统对不同材料样品具有一定的适应性。该设计实现了较大的测量范围,可以满足各类复杂对象的工业检测需求。

**关键词** 测量; 无损检测; 位移传感器; 光谱共焦; 色散

**中图分类号** TH741

**文献标志码** A

**DOI:** 10.3788/CJL202249.1804002

## 1 引言

精密加工技术的发展对工件表面的缺陷检测提出了新的要求。目前常见的高精度位移传感器有激光三角测距传感器,其结构简单,操作方便<sup>[1]</sup>,也是应用最广的玻璃测厚仪器<sup>[2]</sup>,但测量精度受光斑大小、形状、环境光<sup>[3]</sup>等因素影响,并且激光三角测距传感器依赖样品表面散射光<sup>[4]</sup>,不适用于高反射表面以及倾斜表面的测量<sup>[5]</sup>。光谱共聚焦技术具有分辨率高,对表面纹理、倾斜、杂散光等因素不敏感<sup>[6]</sup>等优点,因此更适用于精密器件的检测。

针对光谱共焦系统的关键器件色散物镜,国内外学者进行了许多研究。2010年,朱万彬等<sup>[7]</sup>设计了三片式结构的色散物镜,实现了 1.173 mm 的测量范围,测量精度为 5  $\mu\text{m}$ ,线性判定系数达到 0.9859。2012年,刘乾等<sup>[8]</sup>基于线性最优化的思想,给出了色散最大的玻璃组合,并设计出量程为 1.1 mm 的高线性度色散物镜。2019年,马敬等<sup>[9]</sup>设计了由三个单透镜和两个双胶合透镜组成的结构,在 450~650 nm 波长范围内实现了 1.05 mm 的测量范围,线性拟合系数达到 0.997。国内对色散物镜的研究多侧重于色散线性度的提高,而量程多集中在 1 mm 左右,这在一定程度上限制了色散物镜在实际工业测量中的应用。2020年,王思沫等<sup>[10]</sup>在光谱共焦系统中引入二元光学透镜,在 510~690 nm 波段实现了 13.95 mm 的测量范围,测量误差为 0.6  $\mu\text{m}$ 。虽然利用二元光学透镜实现了大量程,但二元光学透镜的低衍射效率和高加工要求<sup>[11]</sup>

会限制该系统在工业检测中的应用。

1997年,Dobson等<sup>[12]</sup>使用衍射透镜设计并搭建了光谱共焦显微镜进行深度扫描,在 100 nm 的波长范围内,使用放大倍率为 40 和 60 的物镜分别实现了 55  $\mu\text{m}$  和 25  $\mu\text{m}$  的轴向测量范围,量程较小,测量对象局限性较大。2012年,Hillenbrand等<sup>[13]</sup>提出了一种色散物镜的设计策略,并设计了两种色散物镜,在 90 nm 波长范围分别实现了 27.2 mm 和 16.8 mm 的测量范围。2021年,Park等<sup>[14]</sup>提出了一种基于几何相位透镜的可视光谱共焦传感器,测量范围为 10 mm,重复性为 0.4  $\mu\text{m}$ 。虽然 Hillenbrand 和 Park 等实现了大的测量范围,但是使用了衍射光学元件(DOE),DOE 较高的加工工艺要求<sup>[15]</sup>使得系统成本增加。

针对大测量范围的工业测量需求,本文自主设计了大量程的色散物镜。为了降低成本,采用传统球面透镜设计了四片式的物镜,利用 Zemax 软件对像差进行优化,完成了色散物镜的设计。使用自研的色散物镜搭建了一套光谱共焦位移测量系统,并设计实验评估了系统对不同材料样品的测量性能,结果表明,本系统对高反射样品有较好的测量表现。

## 2 基本原理

## 2.1 光谱共焦位移传感器的工作原理

图 1 展示了光谱共焦位移测量系统的工作原理,其中  $\lambda_{\text{max}}$  为光源工作波段的最大波长, $\lambda_{\text{min}}$  为光源工作波段的最小波长。利用 1×2 光纤耦合器连接主要

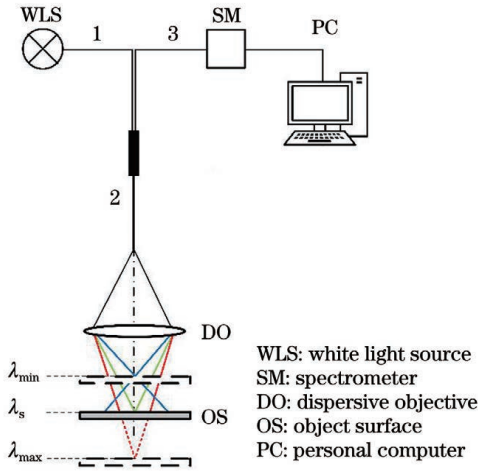


图 1 光谱共焦位移测量系统的示意图

Fig. 1 Schematic of chromatic confocal displacement measurement system

部件即白光源、色散物镜和光谱仪,白光源经光纤耦合器 1 端口耦合后,输入的复色光经 2 端口耦合进入色散物镜。由于物镜的色散作用,不同波长的光将会聚于光轴的不同位置,仅有特定波长的光可以较好地聚焦于待测表面上。图 1 中将该波长记为  $\lambda_s$ , 波长为  $\lambda_s$  的光在待测面上的光斑半径极小,而其他波长的光在待测面上的光斑半径较大,由于物象共轭关系,波长为  $\lambda_s$  的大部分光可以返回至耦合器 2 端口,其他波长的光只有小部分可以返回。2 端口接收的反射光以 1:1 的分光比分别传至 1、3 端口,传至 3 端口的光进入光谱仪中,最终光谱仪获取一个峰值位于  $\lambda_s$  处的光谱信号。利用该系统可以建立峰值波长与测量位置的一一映射关系,实现波长-位置编码,从而进行位移测量。

### 2.2 光学器件光谱特性对光谱共焦信号的影响

在理想情况下,不考虑光源光谱分布特性、被测表面对不同波长光的反射特性以及光电探测器对不同波长的响应特性,则光谱共焦系统的接收光谱  $I(\lambda, \lambda_0)$  与聚焦波长的关系<sup>[16]</sup>可表示为

$$I(\lambda, \lambda_0) = \left\{ \frac{\pi a^2}{\lambda l'(\lambda)} \operatorname{sinc} \left\{ \frac{\pi a^2 [l'(\lambda) - l'(\lambda_0)]}{2l'^2(\lambda)} \right\} \right\}^4, \quad (1)$$

式中:  $l'(\lambda)$  是波长为  $\lambda$  的光对应的像距;  $\lambda_0$  是聚焦于当前待测面上的光的波长;  $l'(\lambda_0)$  是波长为  $\lambda_0$  的光对应的像距;  $a$  是出瞳半径。

实际上,光从光源输出到进入光谱仪的过程中,由于光源光谱分布特性、光纤衰减特性、探测器光谱响应度等因素,式(1)所示的光谱信号将受到额外的调制,将调制函数记为  $M(\lambda)$ ,则实际情况下光谱仪接收到的信号的光谱分布  $I_r(\lambda, \lambda_0)$  为

$$I_r(\lambda, \lambda_0) = I(\lambda, \lambda_0)M(\lambda). \quad (2)$$

$M(\lambda)$  可能引起峰值位置的改变,因此在进行光谱寻峰之前需要消除  $M(\lambda)$  的影响,即进行光谱特性的归

一化处理。

本文通过设计图 2 所示的光谱特性归一化方法来改善上述影响。先测量光源的光谱  $I_0(\lambda)$ ,再按照图 2(a) 连接实验装置,将光谱仪采集到的光谱记为  $I_1(\lambda)$ 。再按照图 2(b) 连接实验装置,将光谱仪采集到的光谱记为  $I_2(\lambda)$ ,则参考光谱  $I_{\text{refer}}(\lambda)$  可表示为

$$I_{\text{refer}}(\lambda) = \frac{I_1(\lambda)I_2(\lambda)}{I_0(\lambda)}. \quad (3)$$

再按照图 2(c) 连接实验装置,光谱仪将采集到的光纤端面反射光以及物镜表面反射光记为  $I_{\text{back}}(\lambda)$ 。进行位移测量时按照图 2(d) 连接实验装置,将待测物置于色散物镜后方,将此时采集到的光谱记为  $I_{\text{signal}}(\lambda)$ 。消除器件光谱特性后的共焦光谱可以表示为

$$I_{\text{norm}}(\lambda) = \frac{[I_{\text{signal}}(\lambda) - I_{\text{back}}(\lambda)] / I_{\text{refer}}(\lambda)}{\max\{[I_{\text{signal}}(\lambda) - I_{\text{back}}(\lambda)] / I_{\text{refer}}(\lambda)\}}. \quad (4)$$

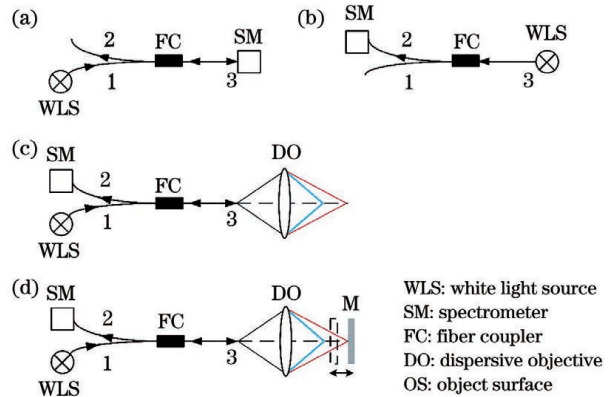


图 2 光谱特性归一化设置。(a) 光纤输出光采集光路; (b) 调制函数测量光路; (c) 背景光采集光路; (d) 信号光采集光路

Fig. 2 Normalized setting of spectral characteristics. (a) Collection path of output light from fiber; (b) measurement path of modulation function; (c) collection path of background light; (d) collection path of signal light

### 3 光学设计

色散物镜的设计需要满足:1)较大的色散范围;2)较小的球差;3)较高的色散线性度。当由  $N$  个密接薄透镜组成的透镜组达到线性色散时,透镜组的色散特性和光焦度<sup>[17]</sup>需要满足:

$$\varphi = \sum_{i=1}^N \varphi_i, \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^N \frac{\varphi_{Di}}{v_{Di}} = \frac{-\delta_{CF}}{f_1^2(1-m)^2}, \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^N \frac{\varphi_i(\lambda_D)}{v_{Di}} (P_{\lambda_i} - \frac{\lambda - \lambda_C}{\lambda_F - \lambda_C}) = 0, \quad (7)$$

式中:  $\varphi$  为光焦度;  $\varphi_i$  为第  $i$  个透镜的光焦度;  $\varphi_{Di}$  是指第  $i$  个透镜在 D 波下的光焦度;  $v_{Di}$  为第  $i$  个透镜的阿

贝数;  $\delta_{CF}$  为 C 光与 F 光间的轴向色差;  $f_1$  为系统焦距;  $m$  为轴向放大率;  $P_{\lambda_i} = \frac{n_i(\lambda) - n_i(\lambda_C)}{n_i(\lambda_F) - n_i(\lambda_C)}$  为相对色散, 其中  $n_i(\lambda)$  为第  $i$  个透镜对波长为  $\lambda$  的光的折射率,  $n_i(\lambda_C)$  为第  $i$  个透镜对波长为  $\lambda_C$  的光的折射率,  $n_i(\lambda_F)$  为第  $i$  个透镜对波长为  $\lambda_F$  的光的折射率;  $\lambda_D$  为 D 光波长;  $\lambda_C$  为 C 光波长;  $\lambda_F$  为 F 光波长。

由式(6)可知, 如果要获得较大的色散范围, 应该选择阿贝数相差较大的材料, 且负透镜选用阿贝数较小的材料, 正透镜选用阿贝数较大的材料<sup>[8]</sup>。根据上述结论, 本文设计出了四片式的色散物镜初始结构, 利用 Zemax 软件对各波长下的像差进行优化, 在 500~700 nm 的工作波段内均匀设置 5 个波长, 将最后一个透镜的后表面到像面的距离设置为变量。利用默认的评价函数对光斑均方根(RMS)半径进行优化, 利用轴向相差(LONA)操作数优化各波长下的球差, 并对轴向色散大小、色散线性度进行优化。优化后的镜头结

构示意图如图 3 所示, 600 nm 处像方数值孔径(NA)为 0.12, 工作距离为 55.982 mm。

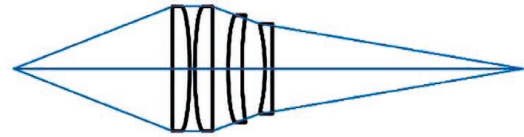


图 3 优化后的物镜结构示意图

Fig. 3 Structural diagram of optimized objective lens

波长 500, 600, 700 nm 处的点列图以及球差曲线分别如图 4、5 所示。表 1 给出了三个波长处的光斑 RMS 半径以及艾里斑半径, 其中光斑 RMS 半径均小于 30  $\mu\text{m}$ , 但大于艾里斑半径。一方面小光斑半径与大色散范围的优化目标难以平衡, 另一方面对比商用光谱共焦位移传感器基恩士 CL-P030, 其量程为 7.4 mm, 光斑半径为 19  $\mu\text{m}$ <sup>[18]</sup>, 与本文设计结果较接近。另外, 如图 5 所示, 物镜在 0.8 归一化孔径处的各波长球差得到矫正。

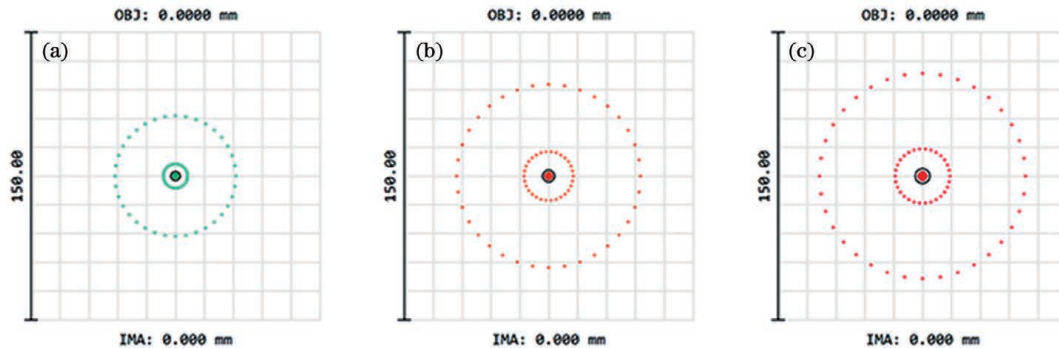


图 4 各波长下的点列图。(a)500 nm;(b)600 nm;(c)700 nm

Fig. 4 Spot diagrams at different wavelengths. (a) 500 nm; (b) 600 nm; (c) 700 nm

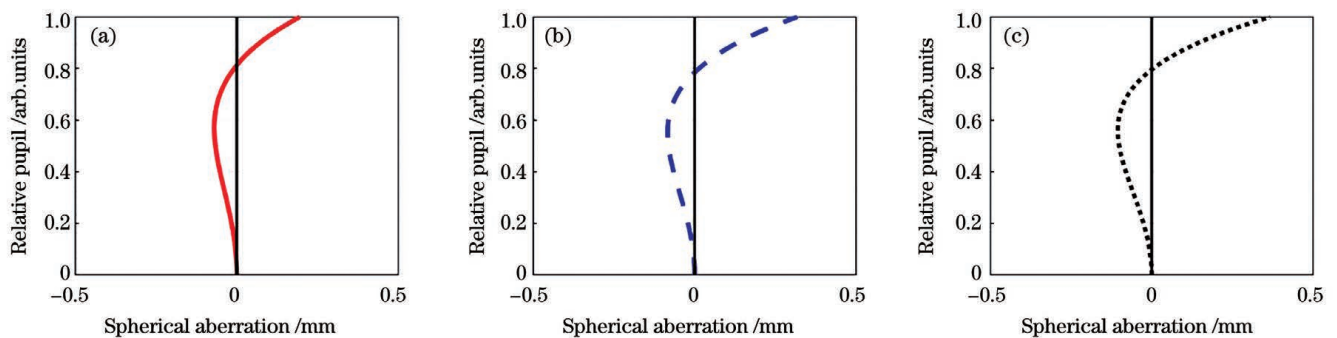


图 5 各波长下的球差曲线。(a)500 nm;(b)600 nm;(c)700 nm

Fig. 5 Spherical aberration curves at different wavelengths. (a) 500 nm; (b) 600 nm; (c) 700 nm

表 1 优化后的物镜在不同波长下的光斑大小

Table 1 Spot sizes for optimized objective lens at different wavelengths

Wavelength /nm	RMS radius / $\mu\text{m}$	Airy radius / $\mu\text{m}$	Work distance /mm
500	17.0	2.3	50.0
600	26.2	3.1	56.0
700	29.3	3.8	59.9

对色散物镜的波长-焦移关系进行仿真, 并进行最小二乘线性拟合, 拟合结果如图 6 所示。在 500~700 nm 波段, 物镜的轴向色差为 9.962 mm, 线性判定系数( $R^2$ )为 0.9884, 线性度为 7.63%。需要注意, 由于实际系统使用光纤来耦合光源与物镜, 而光纤本身具有色散特性, 光纤输出的光源已经有了初始的色散, 因此在相同工作波段下, 实际系统的测量范围将大于 Zemax 仿真结果, 波长-焦移关系曲线也会有所差异。



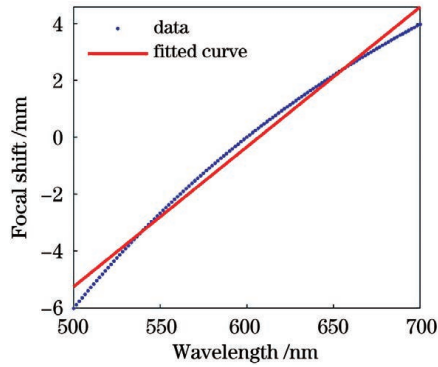


图 6 焦移-波长曲线

Fig. 6 Focal shift versus wavelength

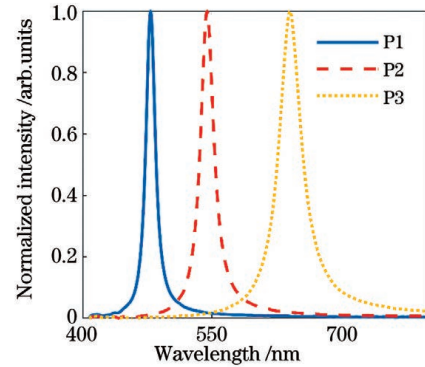


图 8 实际测量时反射镜位于不同位置的归一化光谱

Fig. 8 Normalized spectra for mirrors at different positions during actual measurement

## 4 实验及结果分析

### 4.1 实验设计

光谱共焦位移测量系统的实验装置如图 7 所示,选择钨灯作为白光光源,选用芯径为  $50\ \mu\text{m}$  的光纤耦合器连接主要部件,光谱仪的波长分辨率为  $0.3\ \text{nm}$ 。压电位移台的分辨率为  $0.5\ \text{nm}$ ,用以获取位置参考值并移动待测物。将反射镜作为待测物,利用位移台进行位置扫描,同时测量光谱,从而获取峰值波长-位置关系曲线。在进行位置测量时,通过求解待测位置处的光谱信号峰值波长,对峰值波长-位置关系曲线进行插值,从而求出位置。以位移台的位置作为参考值,评估系统的测量误差。

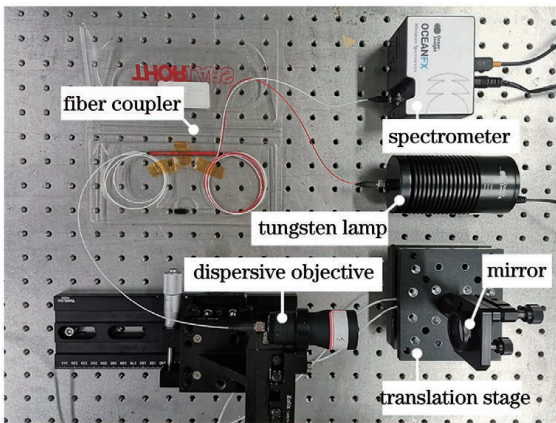


图 7 实验装置实物图

Fig. 7 Physical drawing of experimental device

### 4.2 结果分析

实验中,以  $250\ \mu\text{m}$  为步长进行标定,标定 41 个点,在每一个标定点点处测量 100 次光谱,测量间隔为  $50\ \text{ms}$ ,对每一帧光谱先进行预处理。图 8 展示了近端 P1、中部 P2、远端 P3 三个位置预处理后的光谱,对处理后的光谱进行寻峰,将每个点的光谱寻峰结果的均值作为峰值波长的标定值,建立峰值波长-位置关系,即系统的标定曲线。图 9 展示了本实验系统的标定曲线,该曲线的线性判定系数为  $0.9908$ ,线性度为  $6.21\%$ 。

进行位置测量时,将起点向正方向偏移  $125\ \mu\text{m}$ ,

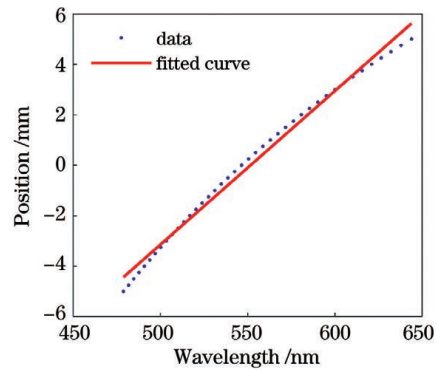


图 9 峰值波长-位置曲线

Fig. 9 Peak wavelength versus position

再以  $250\ \mu\text{m}$  为步长进行位置采样以及波长测量,测量 40 个点,每个点测量 100 次。对所测得的光谱进行峰值求解,对标定曲线进行插值以求出位置,并将其作为位置的测量值。将位移台传感器所获取的位置数据作为参考值,评估系统的测量误差,测量结果的标准差 (standard deviation, SD) 及平均绝对误差 (mean absolute deviation, MAD) 如图 10 所示。可以看出,在所选范围内,系统的位移测量标准差最大为  $0.5\ \mu\text{m}$ ,平均绝对误差最大为  $0.6\ \mu\text{m}$ 。

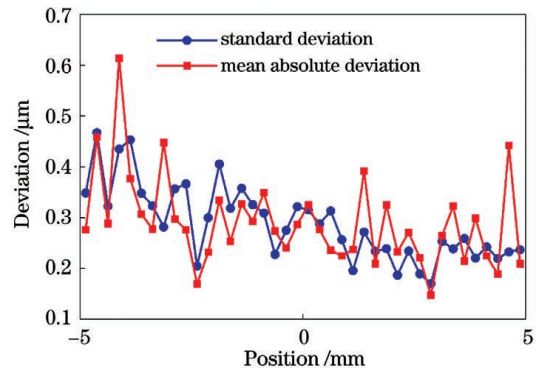


图 10 测量结果的标准差及平均绝对误差

Fig. 10 Standard deviation and mean absolute deviation of measurement results

本文所设计的光谱共焦位移测量系统的误差来源主要有以下几个方面。

1) 光源光谱不稳定以及光谱仪的噪声。系统所用的钨灯光源为热致发光光源,光谱会随温度波动。另外,光谱仪本身的噪声也会对共焦信号产生干扰,最终对测得的光谱信号的寻峰结果产生影响,如图 11 所示。

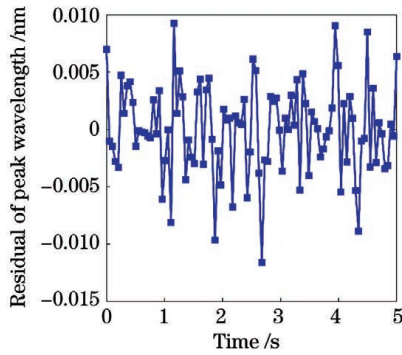


图 11 实际测量得到的光谱峰值波动

Fig. 11 Actually measured spectral peak fluctuation

2) 寻峰算法的误差。光谱共焦系统所测得的光谱信号并不是对称的光谱,本文使用的寻峰算法是动态阈值质心法<sup>[19]</sup>。该算法在质心法的基础上进行改进,提高了精度,但基本原理和质心法一致,对于对称的光谱,寻峰结果较好,对于不对称的光谱,寻峰结果存在误差。

3) 插值误差。本文通过对标定曲线进行插值来测量位置,标定曲线的采样密集程度会对插值结果产生影响,采样越密集,插值误差越小。

此外,将本实验系统的测量性能与某商用光谱共焦传感器进行了对比,结果如表 2 所示。可以看出,本实验系统的测量标准差劣于商用光谱共焦传感器,绝对误差好于商用光谱共焦传感器。测量标准差来源于光源光谱波动以及光谱仪噪声,本实验系统选择钨灯光源,而商用光谱共焦传感器采用彩色激光光源<sup>[18]</sup>,光谱稳定性更好。绝对误差来源于曲线拟合的插值误

差,本实验系统是对密集采样的峰值波长-位置关系进行插值,避免了线性插值法误差较大的问题,因此绝对误差表现更好。

表 2 本实验系统和商用光谱共焦传感器的性能对比

Table 2 Performance comparison between experimental system and commercial chromatic confocal sensor

Measuring system	Measuring range /mm	SD / $\mu\text{m}$	MAD / $\mu\text{m}$
Experimental system	10.0	0.5	0.6
Commercial chromatic confocal sensor	7.4	0.25	0.94

### 4.3 对不同表面类型的测量表现

使用本实验系统对不同材料的样品进行了测量。实验所选样品包括金属、陶瓷、 $\text{SiO}_2$  (抛光表面),图 12 为所测样品。图 13(a)~(c)展示了不同材料样品在近 P1、中 P2、远 P3 三个位置处的测量光谱。可以看出,金属、陶瓷、 $\text{SiO}_2$  抛光面均有明显的共聚焦信号,而峰值处光强则由于样品的粗糙度不同而有所差异。

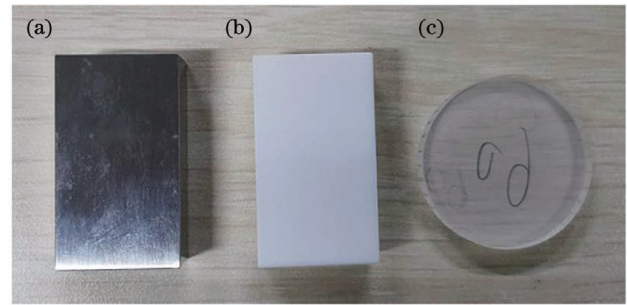


图 12 不同材料的测试样品。(a)金属;(b)陶瓷;(c) $\text{SiO}_2$  抛光面

Fig. 12 Different material test samples. (a) Metal; (b) ceramic; (c)  $\text{SiO}_2$  polished surface

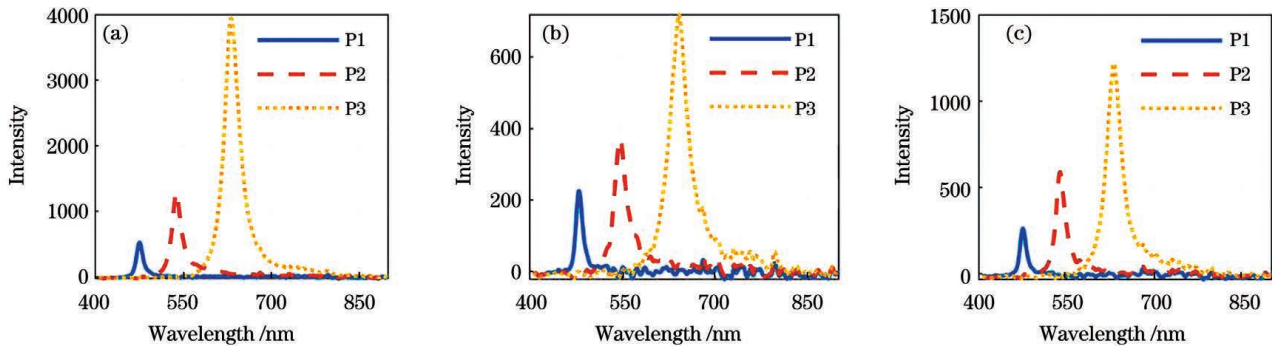


图 13 不同材料样品的测量光谱。(a)金属;(b)陶瓷;(c) $\text{SiO}_2$  抛光面

Fig. 13 Measured spectra of different material samples. (a) Metal; (b) ceramic; (c)  $\text{SiO}_2$  polished surface

对金属、陶瓷、 $\text{SiO}_2$  抛光面进一步进行位置测量以及误差评估,测量结果如图 14 所示。表 3 给出了三种样品在测量范围内的最大标准差以及最大平均绝对误差。可以看出,金属的测量标准差和平均绝对误差均小于陶瓷和  $\text{SiO}_2$  抛光面。原

因在于金属块为表面光滑的镜面反射类样品,陶瓷块表面有微小气孔,存在漫反射,导致接收光强减弱,而  $\text{SiO}_2$  抛光面存在一定的透射损耗,接收光强也较弱,因此后两者的测量误差情况要差于金属块。

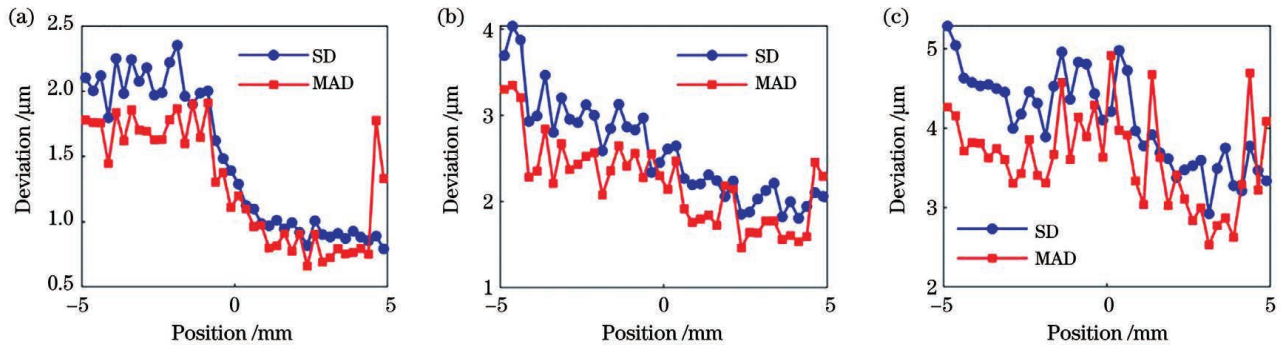


图 14 不同材料样品的位置测量误差。(a)金属;(b)陶瓷;(c)SiO<sub>2</sub> 抛光面

Fig. 14 Position measurement deviations of different material samples. (a) Metal; (b) ceramic; (c) SiO<sub>2</sub> polished surface

表 3 测量范围内金属、陶瓷、SiO<sub>2</sub> 的最大位置测量误差

Table 3 Maximum position measurement deviations of metal, ceramic and SiO<sub>2</sub> within measurement range

Sample	Maximum SD / $\mu\text{m}$	Maximum MAD / $\mu\text{m}$
Metal	2.3	1.9
Ceramic	5.3	4.9
SiO <sub>2</sub> polished surface	4.1	3.3

## 5 结 论

根据光谱共焦原理以及线性色散条件,设计出了四片式的色散物镜初始结构,利用 Zemax 软件对各波长下的光斑大小和单色波球差进行优化,同时对轴向色差进行控制,最终设计出的色散物镜在 500~700 nm 波段内的轴向色差为 9.962 mm。利用所设计的色散物镜搭建了光谱共焦位移测量系统,提出了光谱特性归一化处理,改善了光纤衰减特性、光源光谱分布特性、光谱仪探测器响应度对求解峰值波长的影响,获得了位置与峰值波长间的关系。所搭建的位移测量系统实现了 10 mm 的测量范围,测量标准差为 0.5  $\mu\text{m}$ , 平均绝对误差为 0.6  $\mu\text{m}$ 。另外,对不同材料样品进行了测量,结果显示,系统对不同材料样品具有一定的适应性,相比激光三角传感器,所提系统更适用于高反射样品。

## 参 考 文 献

[1] 周兴敏, 刘恒彪, 葛剑敏. 激光三角测量中物面反射光斑重心偏移的修正[J]. 光学学报, 2015, 35(5): 0512001.  
Zhou X M, Liu H B, Ge J M. Reflected spot center offset correction in laser triangulation measurement[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(5): 0512001.

[2] 刘凯媚, 陶卫, 陈潇, 等. 可自适应位移变化的玻璃厚度激光三角测量方法[J]. 中国激光, 2020, 47(1): 0104003.  
Liu K M, Tao W, Chen X, et al. Laser triangulation method for glass thickness by automatically adapting to displacement change[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(1): 0104003.

[3] 崔昊, 郭锐, 李兴强, 等. 基于非线性拟合的激光三角位移传感器标定方法[J]. 中国激光, 2020, 47(9): 0904003.  
Cui H, Guo R, Li X Q, et al. Calibration of laser triangular displacement sensor based on nonlinear fitting[J]. Chinese

Journal of Lasers, 2020, 47(9): 0904003.

[4] 杨桂栓, 陈涛, 张志峰. 基于激光三角法对透明平板厚度测量光线补偿的研究及应用[J]. 中国激光, 2015, 42(7): 0708004.  
Yang G S, Chen T, Zhang Z F. Study and application on transparent plate thickness measurement based on laser triangulation with light compensation[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(7): 0708004.

[5] 王津楠. 光谱共焦位移传感器研究与设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.  
Wang J N. Research and design of chromatic confocal displacement sensor[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016.

[6] Bai J, Li X H, Zhou Q, et al. Improved chromatic confocal displacement-sensor based on a spatial-bandpass-filter and an X-shaped fiber-coupler [J]. Optics Express, 2019, 27(8): 10961-10973.

[7] 朱万彬, 钟俊, 莫仁芸, 等. 光谱共焦位移传感器物镜设计[J]. 光电工程, 2010, 37(8): 62-66.  
Zhu W B, Zhong J, Mo R Y, et al. Design of spectral confocal chromatic displacement sensor objective [J]. Opto-Electronic Engineering, 2010, 37(8): 62-66.

[8] 刘乾, 杨维川, 袁道成, 等. 光谱共焦显微镜中色散物镜材料的优化选择[J]. 光电工程, 2012, 39(8): 111-117.  
Liu Q, Yang W C, Yuan D C, et al. Optimization and selection of materials for dispersive objective of chromatic confocal microscope[J]. Opto-Electronic Engineering, 2012, 39(8): 111-117.

[9] 马敬, 齐月静, 卢增雄, 等. 光谱共焦位移传感器线性色散物镜设计[J]. 中国激光, 2019, 46(7): 0704009.  
Ma J, Qi Y J, Lu Z X, et al. Design of linear dispersive objective for chromatic confocal displacement sensor[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(7): 0704009.

[10] 王思沫, 李凡星, 彭伏平, 等. 基于二元光学透镜光谱聚焦特性的微间距测量[J]. 光学学报, 2020, 40(2): 0212003.  
Wang S M, Li F X, Peng F P, et al. Microspacing measurement based on spectral focusing characteristics of binary optical lens [J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(2): 0212003.

[11] 智喜洋, 江世凯, 乔凯, 等. 大口径衍射光学系统成像特性分析方法[J]. 光学学报, 2020, 40(17): 1705002.  
Zhi X Y, Jiang S K, Qiao K, et al. Imaging characteristic analysis method for large-aperture diffractive optical system[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(17): 1705002.

[12] Dobson S L, Sun P C, Fainman Y. Diffractive lenses for chromatic confocal imaging[J]. Applied Optics, 1997, 36(20): 4744-4748.

[13] Hillenbrand M, Mitschunas B, Wenzel C, et al. Hybrid hyperchromats for chromatic confocal sensor systems [J]. Advanced Optical Technologies, 2012, 1(3): 187-194.

[14] Park H M, Kwon U, Joo K N. Vision chromatic confocal sensor based on a geometrical phase lens[J]. Applied Optics, 2021, 60(10): 2898-2901.

[15] 金博石, 邓文怡, 牛春晖, 等. 光谱共焦测量系统中的色散透镜



- 组设计[J]. 光学技术, 2012, 38(6): 660-664.
- Jin B S, Deng W Y, Niu C H, et al. Design of dispersive lens group for chromatic confocal measuring system [J]. Optical Technique, 2012, 38(6): 660-664.
- [16] 武芃樾. 光谱共焦位移传感器设计技术研究[D]. 北京: 中国工程物理研究院, 2012.
- Wu P Y. Research of design of chromatic confocal displacement sensor[D]. Beijing: China Academy of Engineering Physics, 2012.
- [17] Novak J, Miks A. Hyperchromats with linear dependence of longitudinal chromatic aberration on wavelength [J]. Optik, 2005, 116(4): 165-168.
- [18] Keyence. CL-P030N datasheet [EB/OL]. [2021-02-03]. <https://www.keyence.com.cn/products/measure/laser-1d/cl-3000/models/cl-p030n/>.
- [19] 卢文龙, 陈成, 王健, 等. 一种利用动态阈值重心法提取共焦显微峰值的方法: CN109540806B[P]. 2019-11-05.
- Lu W L, Chen C, Wang J, et al. Method for extracting confocal microscopic peaks by using dynamic threshold centroid method: CN109540806B[P]. 2019-11-05.

## Design and Performance Evaluation of Chromatic Confocal Displacement Sensor with High Measuring Range

Shao Tanbin, Guo Wenping\*, Xi Yinghao, Liu Ziyu, Yang Kecheng, Xia Min

*School of Optical and Electronic Information, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, Hubei, China*

### Abstract

**Objective** The development of precision manufacturing puts forward higher requirements for surface flaw detection technology in industrial testing. Because precision devices are easy to scratch, the contact measurement technology based on mechanical probe is no longer suitable for the detection needs of such devices, while the non-contact measurement technology based on optical method begins to highlight its advantages. At present, the commonly used high-precision displacement sensor includes the laser triangle ranging sensor. It has the advantages of simple structure and convenient operation, but the measurement accuracy is influenced by the size and shape of the light spot, environmental light and other factors. Besides, the laser triangle ranging sensor depends on its sample surface scattering light, so it is not suitable for the measurement of high reflection and inclined surface. The chromatic confocal technology has the advantages of high resolution and insensitivity to surface texture, tilt, stray light and other factors, so it is more suitable for the detection needs of precision devices. In order to meet the requirement of a large measurement range in industrial testing, we design a large-range dispersion objective lens. In order to reduce the cost, a traditional spherical lens is adopted. We design a four-piece objective lens and optimize the aberration using the Zemax software. A chromatic confocal displacement measurement system is built with the designed dispersive objective lens. Experiments are designed and carried out to evaluate the displacement measurement error of the system and the measurement performance on different material samples. The results show that the system has certain adaptability to different material samples.

**Methods** A dispersion objective lens is designed by using the traditional spherical lens. According to the linear dispersion condition, we choose suitable materials, compute the initial structure of the objective lens, and then use the Zemax software to optimize the spherical aberration, dispersion range, and light spot size. In the process of optimization, the weight of the large dispersion is increased, and the demand for dispersion linearity is reduced. At the same time, the small spot size and spherical aberration are ensured, and finally the structure of the dispersion objective lens with large axial chromatic aberration is obtained. Using the designed dispersion objective lens, the chromatic confocal displacement measuring system is established. A spectral characteristic normalizing method is designed to eliminate the undesired effects on the spectral signals, resulting from the optical fiber attenuation characteristics, light source spectral distribution characteristics and spectrometer detector responsivity. The evaluation experiment is designed and carried out to figure out the displacement measurement error of the system. In addition, the displacement measurement experiment of different materials commonly used in industrial application is carried out, and the results show that the system has certain adaptability to the measurement of different materials.

**Results and Discussions** Most of the existing studies on the design of chromatic confocal objective lens based on traditional spherical lens have a small measurement range and are greatly limited in the industrial testing. The dispersion objective lens designed in this study has an axial chromatic aberration of nearly 10 mm in the working band, and the spherical aberration of monochromatic wave is well corrected(Fig. 5). The chromatic confocal displacement measurement system built with this objective lens can obtain a measurement range of 10 mm, which can better meet the demand for industrial detection with large range(Fig. 9). Aiming at the problem that the spectral signal in the system is subjected to extra modulation, a normalized processing method of spectral characteristics is designed(Fig. 2), which reduces the

adverse effects of the spectral distribution characteristics of light source, the attenuation characteristics of fiber and the response characteristics of spectrometer detector on the spectral signal received by the system and obtains the spectral signal with good characteristic peak (Fig. 8). The experimental results show that the system has good adaptability to different material samples (Table 3).

**Conclusions** In this study, according to the basic principle of chromatic confocal displacement sensor and linear dispersion condition, the initial structure of the dispersion objective lens is designed. The light spot size at each wavelength and the monochromatic spherical aberration of the initial structure are optimized by using the Zemax software, and the axial chromatic aberration is controlled at the same time. Finally, a dispersion objective lens with an axial chromatic aberration of 9.962 mm in the 500–700 nm band is designed. A chromatic confocal displacement measurement system is designed by using the dispersion of the objective. In order to eliminate the effects of fiber attenuation characteristics, spectral distribution characteristics of the light source, and the spectrometer detector responsivity, the spectral characteristic normalizing processing method is designed and then the relationship between the peak wavelength and the position is obtained. The built displacement measurement system obtains the 10 mm measuring range, and the standard deviation of measurement is 0.5  $\mu\text{m}$  and the mean absolute error of measurement is 0.6  $\mu\text{m}$ . In addition, different material samples are measured, and the results show that the system has certain adaptability to different material samples. Compared with the laser triangle ranging sensor, the system is more suitable for high reflection samples.

**Key words** measurement; nondestructive inspection; displacement sensor; chromatic confocal; dispersion