动态综述

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2022111403

# 基于衍射色散原理的光谱共焦位移测量技术综述

王玉龙[1,2]，李　杰[1,2*]，侯　溪[1,2]，曹学东[1,2]，陈　林[2]，杨文博[1,2]

（1. 中国科学院大学，北京 100000；2. 中国科学院光电技术研究所，成都 610000）

**摘　要：** 位移检测技术是几何量精密测量的基础，在当代精密制造领域应用广泛。光谱共焦位移测量技术具有对环境杂散光、被测物倾斜、材料类型不敏感，测量频率高以及分辨率高等优点，可以检测位移量、表面粗糙度、三维形貌以及单层或多层透明材料的厚度，在精密位移测量领域中占据重要地位。近年来，利用衍射光学元件提高光学系统性能的光谱共焦测量技术被广泛研究。文章综述了基于衍射色散原理的光谱共焦位移测量技术的研究进展。首先，介绍了光谱共焦位移测量原理和衍射光学元件的色散特性；其次，阐述了基于衍射色散原理的光谱共焦位移测量技术的发展历史及研究进展；最后展望了该技术的发展趋势。

**关键词：** 位移测量；衍射光学元件；光谱共焦传感器

**中图分类号：** TH822　**文章编号：** 1001－5868(2023)01－0001－07

## Review of Chromatic Confocal Displacement Measurement Techniques Based on Diffractive Dispersion

WANG Yulong[1,2], LI Jie[1,2], HOU Xi[1,2], CAO Xuedong[1,2], CHEN Lin[2], YANG Wenbo[1,2]

(1. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, CHN;
2. Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, CHN)

**Abstract:** With the rapid development of precision manufacturing industry, the demand for precision measurement technology is increasing fast. Displacement detection technology is the basis of geometric precision measurement and is widely used in the field of contemporary precision manufacturing. The chromatic confocal displacement measurement system has the advantages of insensitivity to stray light, tilt of the measured object, and materials type, as well as high measuring frequency and high resolution. It can detect displacement, surface roughness, three-dimensional topography and the thickness of single-layer or multi-layer transparent materials. So it plays an significant role in the field of precision displacement measurement. In recent years, the chromatic confocal measurement technology using diffractive optical elements to improve the performance of optical system has been widely studied by domestic and foreign scholars. In this paper, the research progress of chromatic confocal displacement measurement based on diffraction dispersion principle was summarized. Firstly, the principle of chromatic confocal displacement measurement and the characteristics of diffractive optical elements were introduced. Then, the development history and research progress of chromatic confocal displacement measurement technology based on diffractive dispersion principle were described. Finally, the development trend of this technology was prospected.

**Key words:** displacement measurement; diffractive optical elements; chromatic confocal sensor

**收稿日期：**2022－11－14.

*通信作者：李　杰　　**E-mail:** lijie@ioe.ac.cn

## 0 引言

精密位移测量技术是振动、间距、轮廓等几何量测量的基础，广泛应用于机械加工、生物医疗、微电子制造等领域，精密位移测量的水平也决定了制造仪器的精度，高精度位移测量对于精密仪器制造具有重要意义[1-2]。光谱共焦位移测量技术是一种非接触式位移测量技术，基于共焦光学原理可将被测位移量调制为复色光的波长信息，然后再由光谱仪接收波长信息，其测量精度可达亚微米级，测量频率可达数万赫兹[3-4]。光谱共焦位移测量技术在三维面形扫描、粗糙度及厚度测量等领域被广泛应用[5-6]。该技术最早的研究可以追溯到 1984 年，意大利国家光学研究所的 Molesini 等利用特殊设计的色散物镜搭建了第一台光谱共焦表面轮廓仪[7]。1995 年法国 STIL 公司生产了第一款产品化的光谱共焦位移传感器[8]。光谱共焦位移传感器利用色散透镜组对复色光色散聚焦从而实现轴向扫描，因此色散范围和色散线性度是色散透镜组的重要指标，一定程度上决定了光谱共焦位移测量的分辨率[9]。早期的色散透镜组普遍采用折射透镜，为了提高测量性能，研究者从折射透镜的材料和结构上展开工作，分析了色散范围和色散线性度的权衡方法，使用至少两种及以上不同阿贝数材料的折射透镜组合的方式，提高色散范围，减小复色光源通过折射色散透镜后产生非线性色散。但是多个折射透镜的组合结构增加了共焦光学系统设计和制造的难度[10-13]。由于使用衍射光学元件(DOE)能够获得更好的色散特性，一些学者将其应用于光谱共焦位移测量技术中。研究表明衍射光学透镜的焦距与波长呈线性，色散效果明显，有利于提高光学系统的色散范围及传感器的灵敏度，且衍射光学元件具有非球面的相位函数，使用单个衍射透镜代替多个折射透镜组合的方法能够消除单色像差，降低共焦光学系统的透镜数量从而减小其体积和重量[14-15]。从 20 世纪 90 年代起国内外研究者提出了各类基于衍射光学元件的共焦光学系统，早期衍射光学元件受加工精度限制色散范围较小。随着加工工艺的进步，衍射色散物镜的色散能力随之提高，获得了更大的线性色散范围，广泛应用于光谱共焦位移测量系统[16]。本文对国内外基于衍射色散原理的光谱共焦位移测量技术的研究进行了调研，分析了该技术的发展历史、现状以及技术特点，并对其未来发展趋势做了展望。

## 1 基于衍射色散的光谱共焦位移测量技术原理

### 1.1 光谱共焦位移测量原理

光谱共焦位移测量原理如图 1 所示，光源发出的复色光经过小孔 p、分光镜和色散物镜，被色散聚焦到光轴方向上形成连续的单色光焦点。小孔 p 和小孔 $p_0$ 互为共轭关系，被测样品表面上满足共焦条件的单色光斑由于尺寸小，被反射后进入小孔 $p_0$，离焦反射的其他光谱的绝大部分通量则无法进入小孔 $p_0$，确保了只有聚焦在样品表面的光才会传递到光谱仪。由于各单色光焦点的位置与波长之间存在编码关系，使用光谱仪解析进入小孔 $p_0$ 的光谱信号进而可以计算出对应的被测面几何量信息[17]。

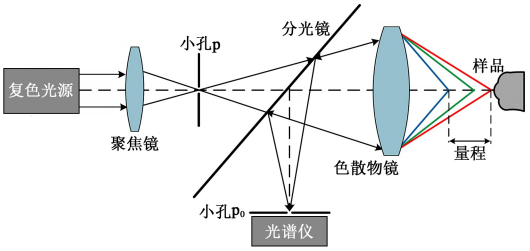



图 1 光谱共焦测量系统原理示意图

### 1.2 衍射光学元件的色散特性

光谱共焦位移测量系统的测量能力是建立在波长与聚焦位置映射关系上的，因此光学系统的轴向色散范围、色散线性度与测量范围和测量精度密切相关[18-19]。而这些色散特性主要取决于光源的光谱范围和色散物镜的性能[20]。

如图 2 所示，对复色光源的色散可以通过衍射的方式实现。

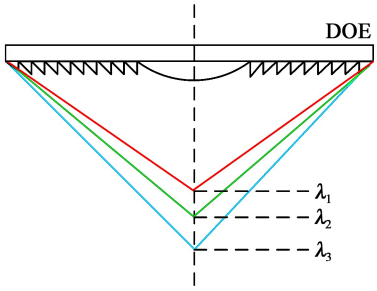



图 2 衍射光学元件轴向色散示意图

通过菲涅耳波带片方程可以确定衍射光学元件的波带半径坐标[21]：

$$r_m^2 = f_0 m\lambda_0 + m^2\left(\frac{\lambda_0}{2}\right)^2 \tag{1}$$

式中，$\lambda_0$ 为衍射光学元件的设计波长；$f_0$ 为对应于第一级衍射级次的主焦距，相邻波带的光程差为 $\lambda/2$，$r_m$ 为第 $m$ 波带的半径。

由于 $m\lambda_0 \ll f_0$，第 $m$ 波带半径可近似为

$$r_m^2 = f_0 m\lambda_0 \tag{2}$$

故对于衍射光学元件，其色散特性可由波长和对应的焦距关系表示：

$$f_m(\lambda) = \frac{r_m^2}{m\lambda} \tag{3}$$

对于第一衍射层级有：

$$f(\lambda) = f(\lambda_0)\frac{\lambda_0}{\lambda} \tag{4}$$

对上式进行泰勒展开：

$$f(\lambda) \approx 2f(\lambda_0) + \frac{2(\lambda_0)}{\lambda_0}\lambda \tag{5}$$

由式(5)可知，不同波长的光线聚焦位置仅与其波长相关，与衍射光学元件的材料类型没有关系，且对于任意波长均产生线性色散[22]。利用这一特性可实现光谱共焦位移测量。

用阿贝数描述衍射透镜色散特性时，有：

$$\nu = \frac{\lambda_D}{\lambda_F - \lambda_C} = -3.45 \tag{6}$$

代入 $D$，$F$，$C$ 光波长数据可知，衍射透镜阿贝数恒为−3.45。这表明理想衍射透镜具负色散特性，且色散能力强。故使用衍射透镜代替折射透镜能够提高共焦光学系统的性能。

## 2　基于衍射色散原理的光谱共焦位移测量技术发展现状

### 2.1　基于衍射色散原理的光谱共焦位移测量技术起源

将衍射光学元件应用于光谱共焦位移测量技术最早是由 Dobson 等在 1997 年提出[23]。测量系统原理如图 3 所示，该系统采用了一个设计波长为 850 nm、焦距为 250 mm 的四台阶衍射光学元件为光学系统提供色散，其材料为石英，采用电子束光刻后得到。利用一个可调谐蓝宝石激光器作为光源，其光束被空间滤波、扩展和准直后通过分束器，被衍射透镜聚焦。由于衍射透镜的数值孔径与其最小特征尺寸相关，受到当时微细加工条件的限制，无法制造大数值孔径的衍射透镜，使其用作显微镜中的物镜，于是 Dobson 等在衍射透镜的后方增加了一个数值孔径为 0.8 的高倍折射透镜作为共焦光学系统的物镜，提高该测量系统的光学分辨率。该光谱共焦位移测量系统在 850 nm 附近的 100 nm 波长范围内获得了 25 μm 的色散范围，显示出高度线性关系，具有恒定的灵敏度，分辨率为 2.23 μm。

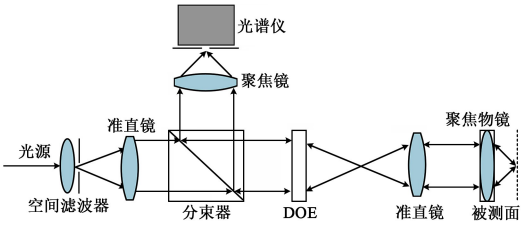



图 3　具有衍射光学元件的光谱共焦测量系统

由于 Dobson 等仅设计搭建了共焦光学系统，并未对后续的光谱探测、数据处理部分进行研究，故该光谱共焦测量系统的纵向分辨率较低。此后国内外学者针对提高光谱共焦位移传感器的分辨率、优化线性度、扩大测量范围、减小测头体积等方向继续开展衍射色散的光谱共焦位移测量系统的研究。

### 2.2　基于衍射色散原理的光谱共焦位移测量技术研究进展

1998 年 Paul 等用氙灯和设计波长为 600 nm、设计焦距为 125 mm 的衍射光学元件构成的共焦光学系统为三维样品的剖面测量提供波长与轴向位移编码[24]。当时的光谱共焦系统普遍采用横向移动扫描或者转盘扫描的方法实现 $X$，$Y$ 方向的扫描。而要扫描样品的深度，载物台或物镜的移动也是必要的，这使得系统的机械结构变得复杂，也限制了系统的扫描速率。如图 4 所示，Paul 等通过在光学系统中增加衍射光学元件和横向狭缝扫描共聚焦技术使光线沿着一个横轴呈直线延伸，代替了原有的机械扫描方法，获得了深度剖面图像。Paul 等将其称之为彩色狭缝共聚焦扫描位移测量(CSCM)系统，该系统获得了 23 nm 的纵向分辨率，其光学部分结构与 Dobson 等搭建的光路相似，使用衍射光学元件提供色散功能，再使用大数值孔径的 100 倍物镜提高系统的分辨率。该光谱共焦位移测量系统减少

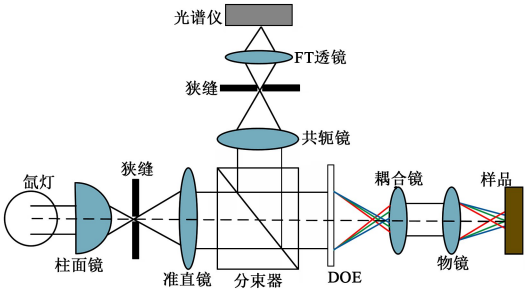
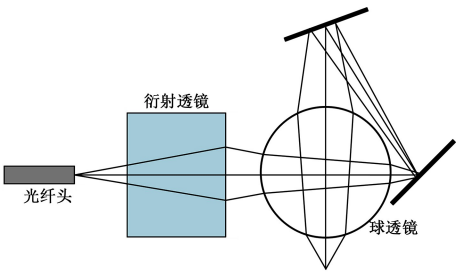



图 4　具有 DOE 的 CSCM 示意图

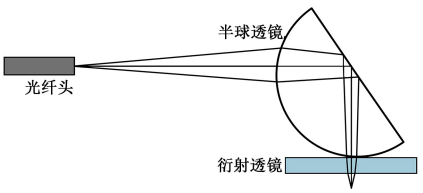
了机械运动扫描，提高扫描速度，使用衍射光学元件也增大了测量范围，同时保持测量的准确性和照明效率。

2000 年，美国加州大学的 Cha 等结合数字微镜(DMD)以及衍射光学元件研制了全静态光谱共焦法的并行共焦位移测量系统[25]。此系统利用一个石英材料的四台阶衍射光学元件对复色光进行色散。以调谐激光器作为光源，波长范围为 790～900 nm，其发出的光经过衍射光学元件后，不同光谱激光的焦平面被色散分离，在 48.3 nm 光谱范围和 26.4 μm 的焦点位移范围内呈线性关系，在衍射元件的后方设置了一对 6 倍折射透镜来提高轴向分辨率。该系统可以通过调整激光器的出射光波长来实现对被测物体的轴向扫描，其轴向分辨率为 0.39 μm。激光器的出射光被 DMD 反射为多路光束，同时对被测物体表面的不同位置的点进行检测，从而实现了对被测物体表面的横向扫描，提高了扫描速度。整个系统通过光谱共焦和衍射色散原理完成轴向扫描，没有轴向位移装置，因此轴向测量范围有限。

2005 年，Ruprecht 等为了实现光谱共焦位移传感器对孔洞等壁面的横向测量，利用衍射光学元件设计了两种结构的位移传感器[26]，第一种结构如图 5(a)所示，将光纤视为小孔，替代小孔对光谱的选频功能，光纤发出的 550～750 nm 白光直接由一块平板衍射光学元件色散。白光被球透镜聚焦，再通过平面反射镜重定向两次，第二次以垂直于光轴的方向入射到球透镜上，被聚焦于被测物体表面。该共焦光学系统结构比以往研究的都更加紧凑，减小了




(a) 第一种结构




(b) 第二种结构

图 5 折衍射混合透镜结构

传感器的体积。但在这种结构下，球镜头必须以非常高的精度定位。任何错位都会导致光束移位，从而引入像差。

Ruprecht 等设计的第二种构将反射镜与球透镜相结合，进一步降低共焦光学系统结构的复杂度。为了达到这一目的，球透镜被切割一半，其平面表面覆盖一层反射涂层，向光轴倾斜 45°，如图 5(b)。因此，半球透镜可以用于光束的重定向，并与数值孔径为 0.4 的衍射光学元件一起将光束聚焦在被测物体表面，获得了 50 μm 的线性测量范围。该光路结构同时降低了安装光学元件的难度。

在以往的折衍射混合光学系统中，衍射元件仅发挥色散功能。斯图加特大学的 Lyda 等在 2011 年首次将衍射光学元件直接作为光谱共焦位移测量系统的色散聚焦物镜使用，并且在光谱共焦位移传感系统中加入干涉测量结构(CCSI)[27]。CCSI 系统具有两个额外的测量特性，即干涉测量增益和附加相位信息。Lyda 等设计的位移测量系统如图 6 所示，系统的测量头部分通过在物空间放置一个衍射光学元件，实现了焦点的色差轴向分离以及物面光和参考光的光程差。衍射光学元件的相位函数与聚焦透镜的数值孔径相适应，以减少折射透镜引入的球差。这个结构的测量头部分使用衍射光学元件作为物镜提供共焦光学系统所需的色散和聚焦功能，在光谱宽度为 50 nm 的光源照明下产生了 27 μm 的色散位移，轴向分辨率小于 50 nm。

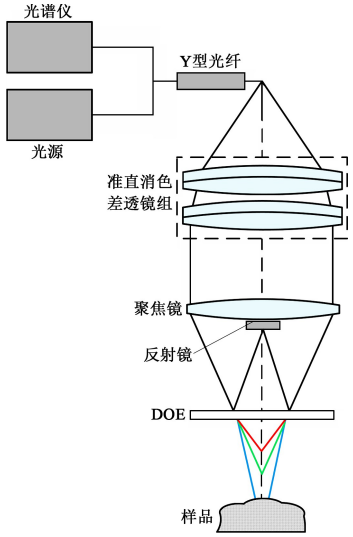



图 6 具有 DOE 的 CCSI 传感器

2012 年北京信息科技大学的金博石等对光谱共焦位移传感器色散透镜组的测量需求进行了分

析[28]，在国内率先研究了衍射光学元件在光谱共焦位移测量中的应用，金博石等使用 ZEMAX 软件设计了一组折衍射混合色散透镜，使用衍射透镜承担对入射平行光的色散作用，在衍射透镜的后方加入折射透镜组承担对复色光的聚焦作用。设计结果显示采用光谱范围为 500～700 nm 的平行光入射，折衍射混合色散透镜组在光轴上的色散范围为 2.2 mm，线性度较好，使用分辨率为 0.5 nm 的光谱仪接收光谱信息，传感器理论精度优于 2 μm。

德国伊尔梅诺理工大学的 Hillenbrand 等在同年提出了利用衍射光学元件的光谱共焦位移测量系统的综合设计策略，通过控制衍射和折射元件之间的光焦度分布，可以在一定范围内精确控制共焦光学系统的测量距离，色散聚焦范围，轴向分辨率，被测物允许的倾斜角度以及尺寸和稳定性[29]。他们分别设计了如图 7 所示的折衍射混合光学系统(a)和纯衍射光学系统(b)，入射光谱为 550～640 nm，实验验证了通过结合正衍射光学元件与负折射透镜(或反之亦然)可以建立显著超过单个衍射光学元件轴向色差的光学系统。

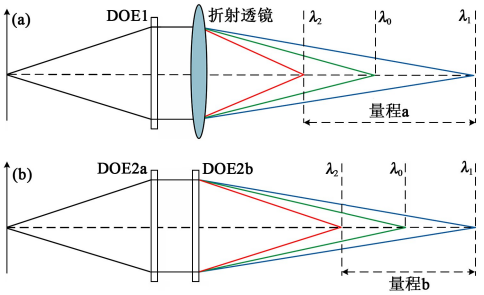



图 7　两种共焦光学系统布局

文章进一步讨论了数值孔径对反射信号光谱带宽的影响，证明了对于聚焦于更靠近传感器位置的波长，它对应的光谱响应半高宽度(FWHM)将会更低，相应的轴向分辨率会更高；增大衍射元件的数值孔径可以提高光谱共焦位移传感器的分辨率，但大数值孔径通常带来较大的单色像差，增加数值孔径的好处被单色像差的负面影响逆转，反而降低了传感器的分辨率。Hillenbrand 等的研究扩大了光谱共焦位移测量系统的测量距离和测量范围，但是受到衍射元件加工精度的限制无法达到传统折射光谱共焦位移测量系统的高分辨率。

英国学者 Rayer 等结合非球面和衍射透镜的光学特性，在 2014 年提出了一种混合非球面衍射透镜，其具有结构紧凑重量轻，光学系统无几何色差的优点[30]。该研究关注了高数值孔径的衍射透镜难以加工的问题，针对折射透镜和衍射透镜的特点首次提出了将两者优点结合起来的方案，把衍射轮廓加工在非球面折射透镜上，利用折射透镜进行聚焦成像，利用衍射透镜轮廓进行色散成像，形成一个折衍射混合透镜。Rayer 等探索了混合非球面衍射透镜的加工方法，分析了金刚石车削加工衍射表面的可行性，并使用该加工方法得到了环带间隔 5 μm 的阶梯状结构衍射元件。

2016 年以色列学者 Berkovic 等设计了一种采用衍射光学元件的多波长光纤共焦位置传感器[31]。设计衍射光学元件的目的是增强光学系统的色散，从而提高系统的测量范围。Berkovic 等使用 980 和 1 530 nm 的激光光源通过光纤发出，如图 8 所示，由一片 8 台阶衍射光学元件和一对共轭折射透镜组成的折衍射混合色散透镜组，能产生 1.3 mm 的色散范围。经过对比实验，这个色散范围是不使用衍射元件的光学系统的 6.1 倍。

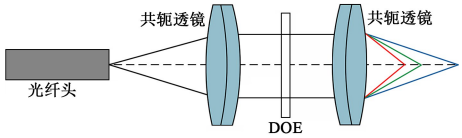



图 8　折衍射混合色散聚焦透镜组

2020 年中国科学院光电技术研究所的王思沫等针对折射透镜的色散线性度很难达到绝对线性，测量范围小，以及轴向球差影响光谱分辨率的问题。研究了基于衍射元件的轴向色散特性的光谱共焦位移测量方法[32]。通过对衍射元件轴向色散的理论推导，建立数学模型并进行了仿真分析。在此基础上他们搭建了位移测量装置，将衍射元件作为光谱位移测量系统中的物镜，采用 Y 型光纤连接 LED 光源和光谱仪，在 510～690 nm 光谱的平行光照明下，使用电控位移台测得系统产生了 13.95 mm 的色散范围，测量误差为 0.6 μm。

2022 年，西安交通大学的刘涛等研究了一种基于相位型菲涅耳片(FZP)的光谱共焦位移测量方法[33]。该 FZP 的基底材料为氮化硅，使用光刻工艺加工，该工艺可以确保低成本批量生产 FZP。为简化测量头的结构，FZP 被直接用作光谱共焦位移传感器中的色散聚焦物镜，采用光谱范围为 500～700 nm 的白光光源、平行光管、Y 型光纤，以及 CCD 传感器搭建了光谱共焦位移测量系统。采用激光干涉仪对该系统进行校准。FZP 物镜使得该系统获得

了 16.31 mm 的色散范围，轴向分辨率达到 0.8 μm，位移测量精度优于 0.4%。该传感器已实际应用于步高、玻璃厚度和三维表面轮廓的测量。

## 3 基于衍射色散原理的光谱共焦位移测量技术发展趋势

研究基于衍射色散原理的光谱共焦位移测量技术对于提升光谱共焦测量系统的光学性能具有重要意义。本文回顾了衍射光学元件应用于光谱共焦位移传感器的发展历程，并对其中具有代表性的研究进行了介绍和总结。目前对于该技术的研究扩大了光谱共焦传感器的轴向测量距离和测量范围，提高了光学系统的色散线性度，减小了光学系统的单色像差。但现有研究对于衍射光学元件的使用还有明显的局限性，大多数研究仅将其作为光源准直后的色散元件，共焦光学系统的其余功能仍由折射透镜组承担，折射透镜数量较多占据了传感器的大量空间，其中一些结构复杂庞大，不能适应传感器小型化的需求，没能利用衍射光学元件体积小重量轻的特点减小传感器体积。故未来的研究可能会扩展衍射光学元件在光学系统中发挥的功能，包括对复色光源的准直消色差、色散聚焦以及消除单色像差等；部分研究者使用衍射光学元件作为共焦光学系统的物镜，由于其数值孔径较低，导致传感器的分辨率受限，而采用折射透镜组的光谱共焦位移传感器的分辨率已能达到数纳米。衍射元件的数值孔径越大其边缘最小特征尺寸越小，加工难度大是限制其作为高数值孔径物镜的主要原因。要使得衍射光学元件能够作为高数值孔径的物镜，未来的研究可能会使用新型光刻技术以及电子束刻蚀等方法制造更小特征尺寸的衍射光学元件[34-36]，此外结合折射衍射光学元件特性的折衍射混合光学系统可以实现高数值孔径的同时降低衍射结构的加工难度，故研究新型折衍射混合光学系统，开发结合二者特性以满足多样化的位移测量需求的光谱共焦传感器也是该技术的发展方向之一。

**参考文献：**


[1] 吕亚玲，杨晓红. 现代先进制造技术的趋势—精密与超精密[J]. 机械制造，2004(10)：25-26.
Lü Yaling，Yang Xiaohong. The trend of modern advanced manufacturing technology precision and ultra-precision[J]. Machinery，2004(10)：25-26.

[2] Li Q，He X，Wang Y，et al. Review of spectral imaging technology in biomedical engineering：Achievements and challenges[J]. J. of Biomedical Optics，2013，18(10)：100901.

[3] Mcbride J W，Boltryk P J，Zhao Z. The relationship between surface incline and confocal chromatic aberration sensor response[J]. Proc. of SPIE，2007，6618：661838.

[4] 宁书铭. 光谱共焦位移测量关键技术研究[D]. 合肥：合肥工业大学，2021.
Ning Shuming. Research on key techniques of chromatic confocal displacement measurement[D]. Hefei：Hefei University of Technol.，2021.

[5] 邹景武，余 卿，程 方. 差动式彩色共聚焦粗糙度评定系统及实验研究[J]. 中国光学，2020，13(5)：1103-1114.
Zou Jingwu，Yu Qing，Cheng Fang. Differential chromatic confocal roughness evaluation system and experimental research[J]. Chinese Optics，2020，13(5)：1103-1114.

[6] 唐 兴，王 琦，马小军，等. 靶丸内表面轮廓的白光共焦光谱测量技术[J]. 中国光学，2020，13(2)：266-272.
Tang Xing，Wang Qi，Ma Xiaojun，et al. Determination of the inner-surface profile of a capsule using chromatic confocal spectroscopy[J]. Chinese Optics，2020，13(2)：266-272.

[7] Molesini G，Pedrini G，Poggi P，et al. Focus-wavelength encoded optical profilometer[J]. Optics Communications，1984，49(4)：229-233.

[8] 李 煌. 彩色共聚焦测量系统光学设计与实验研究[D]. 厦门：华侨大学，2017.
Li Huang. Optical design and experimental study of chromatic confocal microscopy[D]. Xiamen：Huaqiao University，2017.

[9] Bai J，Li X，Wang X，et al. Self-reference dispersion correction for chromatic confocal displacement measurement[J]. Optics and Lasers in Engineering，2021，140(1)：106540.

[10] Jiang W，Zeng A，Huang H. Design of linear hyperchromatic lens in chromatic focal displacement sensor[J]. Proc. of SPIE，2020，11568：1156803.

[11] Browne M A，Akinyem O，Boyde A. Confocal surface profiling utilizing chromatic aberration[J]. Scanning，1992，14(3)：145-153.

[12] 邵谭彬，郭文平，席英皓，等. 大量程光谱共焦位移传感器设计及性能评估[J]. 中国激光，2022，49(18)：1804002.
Shao Tanbin，Guo Wenping，Xi Yinghao，et al. Design and performance evaluation of chromatic confocal displacement sensor with high measuring range[J]. Chinese J. of Lasers，2022，49(18)：1804002.

[13] Zhang Z L，Lu R S. Initial structure of dispersion objective for chromatic confocal sensor based on doublet lens[J]. Optics and Lasers in Engineering，2021，139：106424.

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

[15] Skidanov R V, Ganchevskaya S V, Vasil'ev V S, et al. Systems of generalized harmonic lenses for image formation [J]. J. of Optical Technol., 2022, 89: 132-136.

[16] Pruss C, Ruprecht A, Körner K, et al. Diffractive element for chromatic confocal sensors[J]. DGaO Proc., 2005: 106-107.

[17] Fuerst M E, Csencsics E, Haider C, et al. Confocal chromatic sensor with an actively tilted lens for 3D measurement[J]. J. of the Optical Society of America A, 2020, 37(9): B46-B52.

[18] 张雅丽，余　卿，尚文键，等. 斜照明式彩色共聚焦测量系统设计及其实验研究[J]. 中国光学，2022，15(3)：514-524.
Zhang Yali, Yu Qing, Shang Wenjian, et al. Chromatic confocal measurement system and its experimental study based on inclined illumination[J]. Chinese Opt., 2022, 15(3): 514-524.

[19] Cheng C, Leach R, Jian W, et al. Two-dimensional spectral signal model for chromatic confocal microscopy[J]. Opt. Express, 2021, 29: 7179-7196.

[20] Zakrzewski A, Cwikła M, Koruba P, et al. Design of a chromatic confocal displacement sensor integrated with an optical laser head[J]. Appl. Opt., 2020, 59: 9108-9117.

[21] Miks A, Novak J, Novák P. Theory of hyperchromats with linear longitudinal chromatic aberration[J]. Proc. of SPIE, 2005, 5945: 59450Y-1-59450Y-6.

[22] Stone T, George N. Hybrid diffractive-refractive lenses and achromats[J]. Appl. Opt., 1988, 27(14): 2960-2971.

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

[24] Lin P C, Sun P C, Zhu L J, et al. Single-shot depth-section imaging through chromatic slit-scan confocal microscopy[J]. Appl. Opt., 1998, 37(28): 6764-6770.

[25] Cha S, Lin P C, Zhu L, et al. Nontranslational three-dimensional profilometry by chromatic confocal microscopy with dynamically configurable micro mirror scanning[J]. Appl. Opt., 2000, 39(16): 2605-2613.

[26] Ruprecht A K, Pruss C, Tiziani H J, et al. Confocal micro-optical distance sensor: Principle and design[J]. Proc. of SPIE, 2005, 24(1): 128-135.

[27] Lyda W, Gronle M, Fleischle D, et al. Advantages of chromatic confocal spectral interferometry in comparison to chromaticconfocal microscopy [J]. Measurement Science & Technol., 2012, 23(5): 54009-54015.

[28] 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 Boshi, Deng Wenyi, Niu Chunhui, et al. Design of dispersive lens group for chromatic confocal measuring system [J]. Optical Technique, 2012, 38(6): 660-664.

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

[30] Rayer M, Mansfield D. Chromatic confocal microscopy using staircase diffractive surface[J]. Appl. Opt., 2014, 53(23): 5123-5130.

[31] Berkovic G, Shafir E, Golub M A, et al. Multi-wavelength fiber-optic confocal position sensor with diffractive optics for enhanced measurement range[J]. Proc. of SPIE, 2007, 6619: 1568-1572.

[32] 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)：99-105.
Wang Simo, Li Fanxing, Peng Fuping, et al. Microspacing measurement based on spectral focusing characteristics of binary optical lens[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(2): 99-105.

[33] Liu T, Wang J Y, Liu Q, et al. Chromatic confocal measurement method using a phase Fresnel zone plate[J]. Opt. Express, 2022, 30(2): 2390-2401.

[34] 谢常青. 衍射光学元件成套制造技术研究进展[J]. 光学精密工程，2022，30(15)：1815-1827.
Xie Changqing. Research progress on complete fabrication technology of diffractive optical elements [J]. Optics and Precision Engineering, 2022, 30(15): 1815-1827.

[35] Akan R, Frisk T, Lundberg F, et al. Metal-assisted chemical etching and electroless deposition for fabrication of hard X-ray Pd/Si zone plates[J]. Micromachines, 2020, 11(3): 301.

[36] Liu Q, Zhao J, Guo J L, et al. Sub-5 nm lithography with single GeV heavy ions using inorganic resist[J]. Nano Lett., 2021, 2(6): 2390-2396.

## 作者简介：

**王玉龙**(1996—)，男，四川省成都市人，博士研究生，从事精密几何量精密测试技术等方面的研究；

**李　杰**(1984—)，男，安徽省淮南市人，博士，副研究员，硕士生导师，主要从事精密几何量精密测试技术、精密光学测试技术等方面的研究。