

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2023.01.04

共焦三维超精密测量技术研究进展

黄向东^{1,2}, 孙壮^{1,2}, 段剑秋^{1,2}, 王伟波^{1,2*}

(1. 哈尔滨工业大学 仪器科学与工程学院 超精密光电仪器工程研究所, 黑龙江 哈尔滨 150080;

2. 哈尔滨工业大学 超精密仪器及智能化工信部重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘要: 三维超精密测量技术对提升高端装备制造质量具有基础支撑作用。随着先进制造技术的不断进步, 减小系统测量误差和扩大测量范围已成为三维超精密测量技术发展的关键。近年来, 共焦三维测量技术发展迅猛, 其应用领域也从生物医学逐步扩展到加工制造领域。本文系统介绍了共焦三维测量技术的研究现状和应用进展, 从技术原理角度阐述了提高共焦三维测量分辨力以及扩大共焦三维测量范围的方法, 对比总结了干涉共焦测量、差动共焦三维测量、光谱共焦测量等技术的相关研究成果, 详细介绍了共焦三维测量技术在表面轮廓测量、微结构特征尺寸测量和关键部件内间隙测量等领域的应用情况, 并在此基础上, 对共焦三维测量技术的未来发展方向进行了展望, 以期为后续研究提供技术参考。

关键词: 精密仪器; 轮廓测量; 共焦显微; 三维测量; 超分辨

中图分类号: TB9

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2023)01-0048-10

Progress in confocal 3D ultra-precision measurement technology

HUANG Xiangdong^{1,2}, SUN Zhuang^{1,2}, DUAN Jianqiu^{1,2}, WANG Weibo^{1,2*}

(1. Centre of Ultra-precision Optoelectronic Instrument Engineering,

School of Instrumentation Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, China;

2. Key Lab of Ultra-Precision Intelligent Instrumentation, Harbin Institute of Technology,

Ministry of Industry and Information Technology, Harbin 150080, China)

Abstract: Three-dimensional ultra-precision measurement technology plays a basic supporting role in improving high-end equipment manufacturing quality. With the progress of advanced manufacturing technology, improving measurement accuracy and expanding measurement range have become the key to the development of 3D ultra-precision measurement technology. In recent years, confocal 3D measurement technology has developed rapidly, and its application has gradually expanded from the biomedicine engineering to the manufacturing industry. This paper systematically introduces the research status and application progress of confocal measurement technology. The methods to improve the resolution of confocal 3D measurement and expand its measurement range are expounded from the perspective of technical principles. The relevant research results of interferometric confocal measurement, differential confocal measurement and spectral confocal measurement are compared and summarized. The application of confocal 3D measurement technology in surface profile measurement, microstructure feature size measurement and internal clearance measurement of key components are introduced in detail. On this basis, the future development direction of confocal 3D measurement technology is prospected with a view to providing technical reference for subsequent research.

Key words: precise instrument; profilometry; confocal microscopy; 3D measurement; super-resolution

收稿日期: 2023-02-10; 修回日期: 2023-02-18

基金项目: 国家自然科学基金面上资助项目(52275526, 52275527, 51975161)

引用格式: 黄向东, 孙壮, 段剑秋, 等. 共焦三维超精密测量技术研究进展[J]. 计测技术, 2023, 43(1): 48-57.

Citation: HUANG X D, SUN Z, DUAN J Q, et al. Progress in confocal 3D ultra-precision measurement technology[J]. Metrology and measurement technology, 2023, 43(1):48-57.



0 引言

先进制造技术孕育工业强国，三维超精密测量是先进制造的根本保障。目前，三维测量技术广泛应用于航空航天、微电子、生物医学和汽车制造等领域，发展三维测量技术有助于提高制造精度、优化加工制造工艺，对提升产业竞争力具有非常重要的意义^[1-3]。

三维精密测量技术主要分为接触测量和非接触测量两种方式。以三坐标机械探针轮廓仪为代表的接触测量已被广泛应用于许多工业领域，该方法测量误差通常在微米量级，适应范围广且技术成熟，但容易对表面造成划痕或损伤，易受外界环境干扰且设备价格昂贵，不适用于要求无接触在线检测的工业生产领域。精工制造的产品在几何学的角度上非常精密，加工精度极高，现有的接触测量方法已很难满足实际应用需求。

在微纳米尺度的形貌测量领域，非接触测量具有无损测量的特性，其中共焦三维超精密测量技术因其独特的高三维分辨力和对散射光高抑制的能力，已成为超精密三维形貌测量领域中的主要技术，该技术在表面轮廓、表面粗糙度、间隙、透明样品曲率和厚度等测量中具有独特的优势。本文在详细调研的基础上，对共焦三维超精密测量技术进行综述，论述其国内外研究进展及发展趋势，分析该技术在航空精密制造和微电子等领域的应用情况，为相关领域的科研人员提供参考与借鉴。

1 共焦三维超精密测量技术的研究进展

共焦三维测量技术采用点照明、点成像和点探测的三点共轭结构，通过对被测面进行逐点扫描来实现表面的三维测量，其测量原理如图1所示。

当被测面在离焦位置时，反射光只能部分通过探测针孔，信号光强下降，被测面位置与光强变化存在对应关系，返回光经针孔进入光电倍增管(Photomultiplier Tube, PMT)，可分别获得相应位置的光强，离焦位置 z 与光强变化的函数关系称为系统的轴向特性，通过该特性可对被测表面进行扫描测量，从而获得表面的三维轮廓信息。当使用高倍显微物镜时，可对表面微观形貌进行测量。

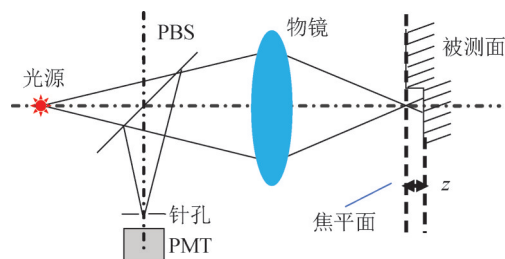


图1 共焦三维测量系统原理结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of principle structure of confocal 3D measurement system

为了进一步提高共焦三维测量系统的性能指标，国内外学者通过共焦测量系统的三维点扩展函数、光学传递函数，对系统分辨力、测量范围和测量效率等方面的影响因素进行了详细分析，并提出了相应的改进方法。

1.1 提高共焦三维测量分辨力的研究进展

1873年，德国物理学家阿贝^[3-7]指出有限尺寸光瞳产生的光学衍射效应使系统成像分辨率受到限制。为了突破衍射极限的限制，20世纪90年代，光学超分辨的概念被提出，即采用特定的光瞳滤波技术对光学系统的光瞳函数进行掩模修正来改变零级光与一级光的振幅和位相关系，通过改变波前使光学系统具有一定的超分辨能力。该技术已被广泛应用于光学成像、光学检测、光学曝光及光存贮等研究领域。

Sheppard和Hegedus^[7, 9]提出了一种研究超分辨光瞳滤波器的理论方法，并于2007年利用系统点扩展函数对三维超分辨理论进行了完善和改进，理论上证明了通过对复光瞳滤波器轴向和径向超分辨因子优化可使共焦系统获得三维超分辨能力。根据该理论，国内外学者设计出了各种结构的相位型、振幅型和复振幅型等类型的光瞳滤波器^[10-15]，将光瞳滤波器加入系统中不同位置，可实现不同的超分辨效果。如图2所示，通过在A位置加入环形光瞳，使原有系统轴向、径向测量分辨力提高25%，同时使信号对比度(斯特焦耳比S)保持在0.4以上。

为了进一步提高系统的三维分辨力，常用方法是使用高的数值孔径(Numerical Aperture, NA)物镜，或者使用短波长的照明光。而对于高NA物镜，标量衍射理论不能准确描述系统的特性，必须以矢量衍射理论作为理论基础，此时需要考

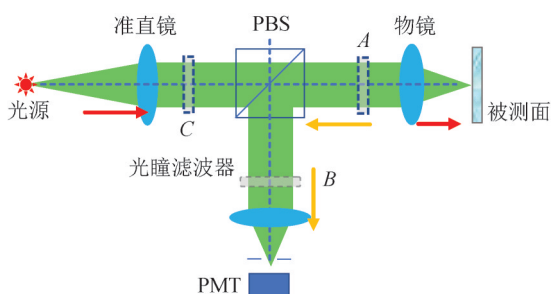
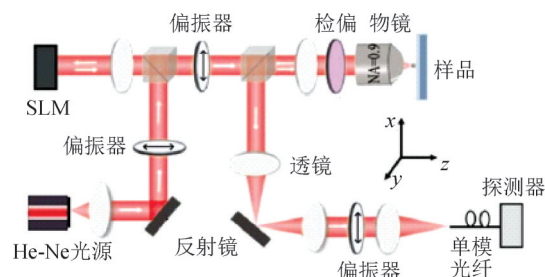


图2 共焦三维测量系统超分辨原理示意图

Fig.2 Schematic diagram of super-resolution confocal 3D measurement system

图3 径向偏振共焦测量装置示意图^[23]Fig.3 Schematic diagram of confocal imaging set-up with RP beam^[23]

虑光波的偏振特性。此外，在传统的共焦系统中，轴向分辨力通常为纳米量级，而径向分辨力通常在 0.5λ 以上，两者性能不匹配，因此大量的研究集中在如何大幅提高共焦系统的径向分辨力上。研究表明^[16-25]，柱对称矢量偏振照明光束在高数值孔径下，具有很好的径向超分辨效果。文献^[22]利用径向偏振照明和双环带光瞳滤波器实现了紧聚焦光斑，使原有的系统径向分辨力提高了15.23%，结合图像复原技术可使分辨力得到进一步提升。文献^[23]采用严格的矢量聚焦理论研究了共焦激光扫描系统对相邻小颗粒的成像，取得了良好的实验效果，其测量装置如图3所示。

通过具有优化幅度分布和环形透镜的径向偏振照明，可以获得更窄的聚焦场的纵向分量。文献^[24]利用径向偏振光束和亚衍射光学元件，使系统径向分辨力提高了30.3%。

1.2 扩大共焦三维测量范围的研究进展

随着超精密加工制造工艺的不断进步，微结构器件已经被广泛应用于微机械、微电子、航空航天、光学和光电子等高新技术领域。微结构器件是一种具有特定功能表面拓扑结构的器件，兼具高深宽比和几何特性确定等特点。其台阶高度

一般为几微米至几百微米，最大深宽比达到15:1，面形误差达到亚微米级，表面粗糙度可达纳米级。因此，三维形貌测量也向着纳米量级方向发展，并尽可能地扩大测量范围。

为了能够在大台阶非连续表面进行三维超精密测量，需要扩大共焦测量系统的轴向测量范围，国内外学者对此进行了大量的研究，其中，代表性的技术主要有干涉共焦测量技术、差动式共焦显微测量技术和光谱共焦测量技术等。

1) 干涉共焦测量技术

干涉测量技术的测量误差可达纳米量级甚至更低，但由于原理的限制，该技术只适合测量连续表面形貌和表面突变不超过 $\lambda/4$ 的表面。为了克服这一缺点，可将干涉技术与共焦测量系统进行结合，即利用共焦系统轴向特性曲线的峰值点作为瞄准装置，为干涉系统提供参考相位，同时利用干涉信号的周期性，实现干涉共焦扫描测量。2006年，闫聚群等学者提出了大台阶高度测量的外差干涉共焦方法，利用共焦系统扫描样品表面，当光强达到最大值时，将采样干涉的相位作为精确对准的判据。该扫描方法集中融合了外差干涉测量与共焦测量的优点，轴向测量量程可达百微米，测量误差不大于0.1 nm。2015年，林芬芬等学者^[26]提出了基于聚焦光针干涉和共焦成像的多功能表面形貌测量系统，其轴向分辨力为1 nm，横向分辨力为 $0.5\ \mu\text{m}$ ，轴向扫描范围可达 $40\ \mu\text{m}$ 。但该类方法需要共焦系统进行轴向扫描，因此测量速度慢，且对扫描机构定位精度要求较高，系统结构也较为复杂。

为简化测量系统结构并提高测量速度，2016年哈尔滨工业大学^[27]提出了一种光针式共光路干涉共焦测量方法，该方法利用共焦系统的轴向特性曲线斜坡段和干涉系统实现粗、精结合测量，无需共焦测头进行轴向扫描；同时，利用分光瞳相位滤波器实现四路干涉光的同步移相干涉测量，通过后续的数据处理将共焦信号与干涉信号完全分离，避免了干涉信号与共焦信号的相互影响。该方法在扩大测量范围的同时提高了测量速度，且系统集成度高，便于小型化。其缺点是为了使共焦系统与干涉系统有效结合，共焦系统的测量误差必须小于 $\lambda/4$ ，因而共焦分系统的动态范围会

受到限制,当激光波长为632.8 nm时,系统的测量分辨力为0.5 nm,而量程仅能达到100 μm 。

2) 差动共焦三维测量技术

C. Lee等学者^[28]提出了一种差分共聚焦显微镜(Differential Confocal Microscope, DCM),基于共焦测量系统的轴响应曲线斜坡段,在斜坡上,样品高度的变化导致强度信号的差异变化。该方法无需进行轴向扫描即可实现表面形貌测量,成功地应用于测量光学光栅的纳米表面形貌和人体红细胞的纳米形状特征。然而,该装置的轴向光强响应曲线相对于焦点是对称的,没有绝对零位,不适合应用于非连续表面轮廓和具有台阶的三维微结构工件的超精密测量。

为了能够对非连续表面进行测量,扩大轴向测量范围,赵维谦团队^[29]研制了一种基于两个探测针孔的激光差动共焦探针,将其应用于测量标准台阶轮廓,获得了2 nm的轴向分辨力。该系统使用两个针孔探测器,分别位于同一聚焦透镜焦点的前、后离焦面。通过对两条位移轴向响应曲线的差分相减,得到了一条新的单调强度响应曲线。该方法具有双极测量范围和绝对零位,可以实现轴向动态范围的扩展和高稳定性的实时测量。特别是差动共焦的单调强度响应曲线相较于DCM的响应曲线具有更大的斜率,可以进一步提高轴向分辨力。然而,由于对针孔探测器的离焦位置要求严格,该系统的安装和调整仍然存在着较高的复杂性和难度。此外,此方法受系统数值孔径和轴向特性动态范围的限制,仍然存在测量范围无法进一步扩大的问题,如当物镜数值孔径为0.95时,轴向分辨力为1 nm,但其测量量程不到4 μm 。

3) 光谱共焦测量方法

光谱共焦方法是将光谱分析技术与共焦测量技术相结合形成的一种新的传感测量方法,是近年新兴的一种位移测量技术,光谱共焦测量系统原理如图4所示。宽光谱彩色光经色散透镜后,在轴向位置形成一系列焦点,被测面在某波长焦点处,反射光再经色散透镜被探测针孔滤波,透过针孔的光经过光谱仪,获得光谱中最大光强谱线对应的波长,从而实现被测面位置的测量。该方法测量误差小、测量范围大,且受被测表面材料、端面反射率及倾斜角的影响小。

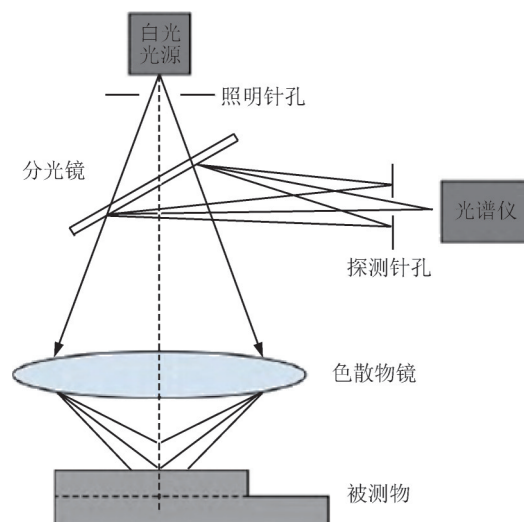


图4 光谱共焦测量系统原理图^[32]

Fig.4 Schematic diagram of chromatic confocal measurement system^[32]

色散物镜是光谱共焦系统的核心元件之一^[30-34],其色散范围决定了系统的测量范围。色散物镜主要包括:透镜元件、衍射透镜以及折衍混合镜组三类。D. Luo等人^[30]采用单透镜结构,设计了色散范围为0~600 μm 的色散物镜,其高线性部分达到400 μm ,测量分辨力接近0.1 μm 。2022年,T. Liu等人^[31]对相位型菲涅耳区域板的结构进行设计,探头直径为11.27 mm,设计波长的焦距为50 mm,在500~700 nm的波长范围内,轴向分辨力达到0.8 μm ,位移测量误差不高于0.4%。衍射器件的色散相对于透镜更强,波长与位移的关系曲线具有较高的线性度,但受衍射效率的影响,各波长的光经过衍射元件后光强度不一致,导致峰值波长检测不准,使系统的测量误差增大。

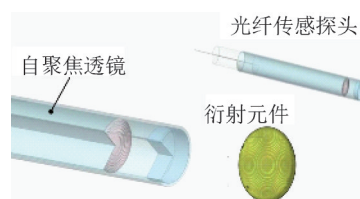


图5 光纤光谱共焦传感测头结构示意图

Fig.5 Schematic diagram of optical fiber chromatic confocal sensing probe structure

在上述研究中,为了实现大色散范围,通常采用较大尺寸的色散物镜,因此上述方法在测量

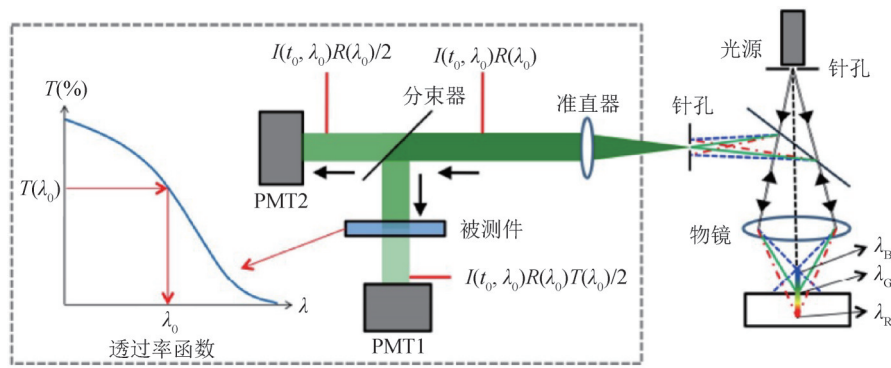


图6 基于透过率探测的光谱共焦测量原理图^[36]

Fig.6 Schematic diagram of chromatic confocal system based on transmissivity detection^[36]

空间狭窄的场景中（如间隙测量）应用受限。2011年，D. Fleischle 等人^[33]提出将自聚焦透镜与衍射光学元件组合，通过激光直写技术，在自聚焦透镜的一端刻下环形微结构，形成衍射元件。光纤光谱共焦传感测头结构示意图如图5所示。该方法在 800 ~ 860 nm 的波长范围内，实现了 0 ~ 300 μm 的色散范围，其探头的直径为 2 mm，主要应用于车削加工，可将传感器集成于加工工具附近，实现在线精密检测。

由于光谱共焦是通过测量回光光谱信号中峰值波长位置来实现波长检测的，因此光源中各波长光强不一致及被测面反射率变化都会对峰值波长检测造成影响。2021年，J. Bai 团队^[34]提出了自参考的光谱共焦位移测量方法，通过预先的标定，将测量得到的各波长的强度值进行归一化处理，以消除光源发出的光波长强度不均匀以及被测面反射率变化对测量结果产生的影响。

光谱共焦方法的另一个核心技术是光谱分析。目前主要利用色散型光谱仪对光谱信号进行分析，该类光谱仪需要采用阵列式探测器（例如 CCD），普通商用 CCD 的帧率一般约为 30 帧，而高速 CCD 通过减少读取的像素数目提高帧率，其工作速度在 kHz 级别^[35]，测量速度相对较快。

为了提高测量速度，T. Kim 等人^[36]提出了一种基于透过率探测的光谱共焦测量方法，系统结构如图6所示。在探测端将物面回射的光束分为两路，其中一路光经过滤光片，通过将两探测器接收到的光强做比值可得到光束经过滤光片后的透过率，而峰值波长与透过率之间一一对应，因此，可以建立透过率与轴向位移间的对应关系。由于

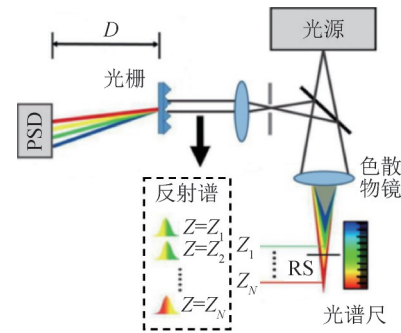


图7 基于PSD探测的光谱共焦原理图^[37]

Fig.7 Schematic diagram of chromatic confocal system based on PSD^[37]

光电倍增管响应速度快，所以光谱共焦系统的测量速度有了很大提升。该系统在 500 ~ 600 nm 的波段内，测量量程为 108 μm，轴向分辨力为 1.54 μm，横向分辨力为 0.98 μm，测量速度可达到百兆赫级别。但是，滤光片的使用限制了该系统的波长范围，导致测量范围较小。

2018年，G. Zhao 等人^[37]提出采用位置敏感探测器件 PMT 作为系统的探测器，系统结构如图7所示，以激光器为光源，对3个单一波长光的光谱位置进行了实验。但该方法由于未使用宽光谱光源，导致测量范围小；此外，由于光源的光谱密度和探测器的波长响应并不一致，会给测量结果引入误差甚至会造成波长误检，导致测量错误。

光谱共焦成像模型对光谱共焦系统而言具有重要的作用，它不仅能够在系统结构设计中起指导作用，还可以改善后期信号处理的准确性。早期，A. K. Ruprecht 等人^[38]结合传统共焦理论，在照明针孔无限小和近轴衍射理论的基础上，建立了有限探测针孔的光谱共焦响应模型，探究了针

孔尺寸和测量范围内数值孔径的变化对共焦信号的半极值宽 $FWHM$ 的影响。2014年, M. Hillenbrand 等人^[39]提出了共线、几何和波动光学模型三种光谱共焦系统的光谱响应模型, 同时考虑了照明针孔和探测针孔的尺寸对系统的影响, 其中, 共线模型排除了像差和衍射效应的作用, 几何模型考虑了像差的影响, 而波动光学模型同时包含了像差和衍射效应。模型中波长与焦点之间的关系由透镜和衍射元件的色散模型给出。实验结果显示: 共线模型仅适用于像差良好校正的光谱共焦系统, 而几何模型和波动光学模型在系统出现较大像差和渐晕的情况下依然能够得到精确的结果。2021年, C. Chen 等学者^[40]提出了光谱共焦系统的二维光谱信号模型, 该模型同时给出了强度-波长-位移三者之间的关系, 便于更加直观地观察和探究各因素(球差、数值孔径等)对峰位波长与位移量关系的影响。

综上所述, 共焦三维测量技术近年得到了很大发展, 为了对测量系统性能进行改进, 研究人员通过进一步完善系统理论, 引入新器件、新结构和新方法, 实现多种传感原理的深度有机结合, 以满足精工制造领域中日益增长的测量需求。因此, 多传感融合测量技术是共焦三维测量技术的未来发展方向, 是实现大范围、高精度和快速三维测量的重要技术途径。

2 共焦三维超精密测量技术应用

实际应用中, 共焦三维测量系统的测量方法主要有两种形式: 一种是轴向扫描测量方法, 即利用共焦轴向响应特性曲线的峰值点作为触发信号, 并配合扫描测头位移进行轴向扫描测量; 另一种是无轴向扫描测量方法, 即利用共焦轴向特性曲线的斜坡段实现差分测量, 直接获得表面高度变化。

共焦三维测量技术具有适合测量大倾斜面、测量误差小和可与现有技术灵活集成等优点, 在表面轮廓测量、微结构特征尺寸测量和发动机叶尖间隙测量等领域中具有很大优势^[41-55]。

2.1 表面轮廓测量

表面的微细结构形貌对零件的性能有很大影响。例如, 对于航空发动机转子表面而言, 具有

沿流动方向一致的微型沟槽微结构可减小表面阻力, 与光滑表面相比, 合理的表面微结构可减小表面磨擦和剪切应力, 极大地提高发动机的推重比, 从而达到增速、增程、节能等目的。又如, 随着微电子技术的发展, 微电子器件表面结构线宽已达到3 nm, 掩膜厚度达到10 nm, 迫切需要能够应用于硅器件的超精密表面非接触测量方法。传统的接触式测量方法采用红宝石球触针, 由于具有一定接触力容易对表面造成划伤, 只能对普通工件表面进行测量。而基于白光干涉原理的测量仪采用非接触式测量方式, 测量分辨力较高, 但是被测表面加工质量的优劣对白光干涉测量结果的影响较大, 且该技术横向分辨力较低, 导致白光干涉轮廓仪很难应用于具有微细结构非连续表面的三维测量。

2015年, Wang 等人^[42]利用共焦三维测量仪对玻璃衬底光栅进行三维测量, 实现了轴向2 nm分辨力, 可对10 μm 的沟槽深度进行测量, 光栅样品三维测量图如图8所示。2020年, 唐兴等人^[43]利用白光共焦光谱技术对激光核聚变靶丸内外表面轮廓进行测量, 测量不确定度为0.1 μm , 通过对靶丸进行加工质量检测, 可有效避免由于靶丸轮廓非球度偏差引起的靶丸内爆不稳定甚至产生球壳破裂的问题。

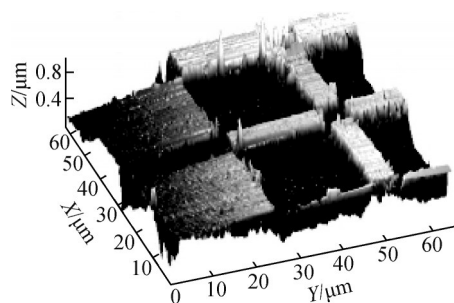


图8 光栅样品三维测量图^[42]

Fig.8 3D image of grating sample^[42]

2.2 微结构特征尺寸测量

2016年, Chen 等学者^[44]利用狭缝彩色共焦测量技术对标准台阶和集成电路BGA引脚三维轮廓进行了测量, 轴向分辨力可达0.01 μm , 高度可达30 μm , 如图9所示。

透镜曲率半径的精确测量是光学领域的重要研究课题^[45-47]。文献[46]中采用差动共焦技术,

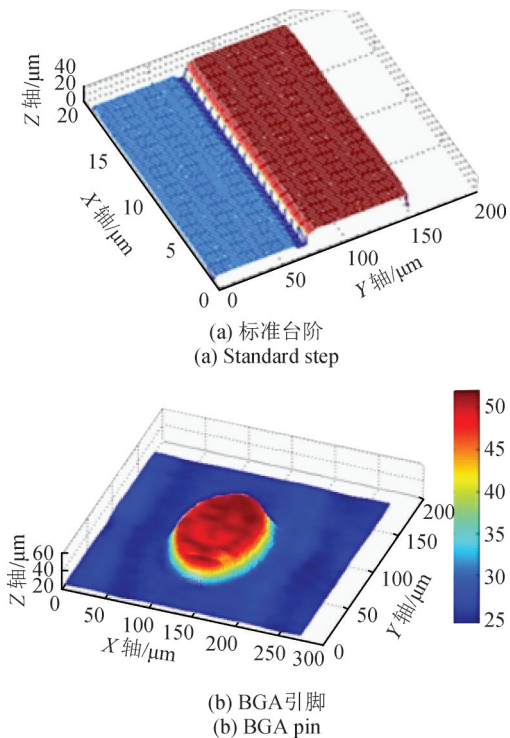


图9 三维测量图^[44]

Fig.9 3D measurement image^[44]

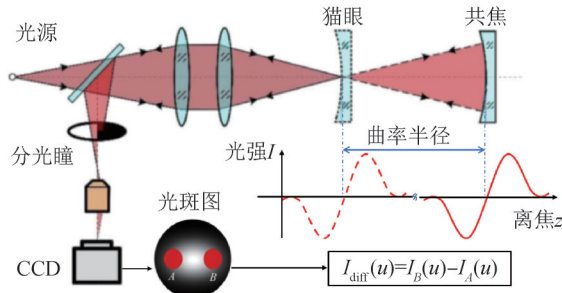


图10 基于差动共焦原理的曲率半径测量原理图^[46]

Fig.10 Schematic diagram of radius measurement based on differential confocal principle^[46]

通过 CCD 采集两虚拟针孔的光强 $I_A(u)$ 和 $I_B(u)$ ，并利用差值 $I_{diff}(u)$ 实现透镜曲率半径的测量，如图 10 所示，其中， u 为被测曲面离焦距离 z 的光学归一化坐标，其测量结果相对标准偏差为 3.4×10^{-6} ，线性量程为 $9.53 \mu\text{m}$ 。

利用光谱共焦技术可对材料的厚度实现精密测量^[48-53]。光学玻璃、生物薄膜、平行平板等材料的两个反射面都会反射不同波长的单色光，利用光谱共焦传感器测量，可计算得出材料厚度，测量误差小于微米量级且不损害表面。文献 [48] 提出了利用彩色共焦光谱技术对透明样品厚度进行测量，通过对玻璃样品进行实验，证明该方法

的测量范围较传统方法提高了 2 倍，测量误差为 $0.25 \mu\text{m}$ ，而且显著减小了样品的放置公差对测量结果的影响。文献 [51] 将白光共焦光谱技术成功应用于辐射烧蚀等物理实验中的金属薄膜厚度测量，可对厚度为 $10 \sim 100 \mu\text{m}$ 的 Au 薄膜厚度实现精确测量，测量不确定度达到 $0.12 \mu\text{m}$ 。

2.3 关键部件内的间隙测量

随着共焦三维测量技术应用领域的不断拓展，该技术还可结合位移传感器应用于关键部件内的间隙测量^[54-57]。在发动机的设计和制造中，叶片端部与机匣的间隙参数与发动机的工作性能直接相关，准确测量间隙不仅可保证发动机高效稳定工作，还可为主动间隙控制提供数据支撑。

2016 年，毕超等人^[54]提出了一种基于光谱共焦技术的叶尖间隙测量方法，该方法利用德国米铱公司的 IFS 2403/90-1.5 型光谱共焦传感测头进行测量，线性量程为 1.5 mm ，测量光斑为 $15 \mu\text{m}$ ，测量误差不高于 $1.2 \mu\text{m}$ 。但由于测量系统中光谱仪采样速率有限，限制了光谱共焦技术的应用拓展，未来需要研究光谱快速检测技术以推动该技术在叶尖间隙测量领域的应用。同时，随着现代工业技术的发展，在狭窄空间内实现快速、精密测量也将成为共焦三维测量技术未来发展的重要方向。

3 结论

近年来，随着共焦三维测量技术应用领域的不断拓展，该技术已被广泛应用于光学加工、微机械、微电子和航空零部件制造等先进加工领域。随着加工精度的不断提高，对产品测量提出了许多新的挑战，国内外学者也对此做了大量的研究工作。本文详细介绍了共焦三维测量技术的研究现状，分析了各种新技术的原理、优势和存在的问题，同时介绍了该技术在近几年的实际应用现状和发展趋势。通过分析可见，在现代加工技术不断进步的背景下，如何实现高精度、大范围的快速三维测量，是未来该领域需要研究的重点问题，而多传感技术的信息融合是解决该问题的关键。此外，在三维测量领域中，为了简化系统结构，传感器测头的小型化、集成化也将成为未来的重点研究方向。

参考文献

- [1] 王潇, 涂世杰, 刘鑫, 等. 三维超分辨显微成像技术的研究进展及展望[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(22): 1-26.
WANG X, TU S J, LIU X, et al. Advance and prospect for three-dimensional super-resolution microscopy[J]. Laser & optoelectronics progress, 2021, 58(22): 1-26. (in Chinese)
- [2] 张大治, 段小燕, 殷亚东. 转动量非接触动态测量技术[J]. 计测技术, 2014, 34(6): 1-4.
ZHANG D Z, DUAN X Y, YIN Y D. Progress of dynamic parameters measurement on rotors by non-contact techniques[J]. Metrology and measurement technology, 2014, 34(6): 1-4. (in Chinese)
- [3] BI C, LI D, FANG J G, et al. Application of chromatic confocal displacement sensor in measurement of tip clearance[C]. Proc SPIE 10155, Optical Measurement Technology and Instrumentation, 2016, 1015: 101551S.
- [4] 李海燕, 张琢, 浦昭邦, 等. 共焦显微扫描探测技术的发展[J]. 光学技术, 2008, 34(1): 94-97.
LI H Y, ZHANG Z, PU S B, et al. Study on microlens array confocal microscopy measurement[J]. Optical technique, 2008, 34(1): 94-97. (in Chinese)
- [5] MCUTCHEN C W. Superresolution in microscopy and the abbe resolution limit[J]. Journal of the optical society of America, 1967, 56(11): 1463-1472.
- [6] BORN M, WOLF E. Principles of optics[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1999.
- [7] WARD E N, PAL R. Image scanning microscopy: an overview[J]. Journal of microscopy, 2017, 266(2): 221-228.
- [8] SHEPPARD C J R, HEGEDUS Z S. Axial behavior of pupil-plane filters[J]. Journal of the optical society of America A: optics, image science and vision, 1988, 5(5): 643-647.
- [9] SHEPPARD C J R, LEDESMA S, CAMPOS J, et al. Improved expressions for performance parameters for complex filters[J]. Optics letters, 2007, 32(12): 1713-1715.
- [10] HAZRA L N, REZA N. Super-resolution by pupil plane phase filtering[J]. Pramana-journal of physics, 2010, 75(5): 855-867.
- [11] 卢婧, 李昊, 何毅, 等. 超分辨率活体人眼视网膜共焦扫描成像系统[J]. 物理学报, 2011, 60(3): 1-9.
LU J, LI H, HE Y, et al. Superresolution in adaptive optics confocal scanning laser ophthalmoscope[J]. Acta physica sinica, 2011, 60(3): 1-9. (in Chinese)
- [12] 朱化凤, 徐丹, 王秀民, 等. 消色差相位型超分辨光瞳滤波器的设计研究[J]. 光学学报, 2012, 32(5): 1-6.
ZHU H F, XU D, WANG X M, et al. Design and study of achromatic phase-only superresolving pupil filter[J]. Acta optica sinica, 2012, 32(5): 1-6. (in Chinese)
- [13] FOREMAN M R, GIUSCA C L, TOROK P, et al. Phase-retrieved pupil function and coherent transfer function in confocal microscopy[J]. Journal of microscopy, 2013, 251(1): 99-107.
- [14] CANNALES V F, VALLE P J, CAGIGAL M P. Analysis of Strehl ratio limit with superresolution binary phase filters[J]. Chinese optics letters, 2016, 14(7): 1-4.
- [15] ZHOU Y L, LI X. Super-resolution by annular pupil inserted scattered light fluorescence microscopes[J]. Optical review, 2017, 24(3): 398-405.
- [16] SHERIF S S, TOROK P. Pupil plane masks for super-resolution in high-numerical aperture focusing[J]. Journal of modern optics, 2004, 51(13): 2007-2019.
- [17] MANDERS E, DRENT P, BREEDIJK R A, et al. Redesign confocal microscope for super-resolution microscopy[J]. American laboratory, 2017, 49(4): 34-35.
- [18] SHEPPARD C J R. The development of microscopy for super-resolution: confocal microscopy, and image scanning microscopy[J]. Applied sciences-basel, 2021, 11(19): 8981-9000.
- [19] KOZAWA Y, SATO S. Small focal spot formation by vector beams[J]. Progress in optics, 2021, 66: 35-90.
- [20] LIN H, JIA B H, GU M. Generation of an axially super-resolved quasi-spherical focal spot using an amplitude-modulated radially polarized beam[J]. Optics letters, 2011, 36(13): 2471-2473.
- [21] 程侃, 谭明峰, 周哲海, 等. 径向偏振光三维超分辨衍射光学元件设计[J]. 光学学报, 2010, 30(11): 3295-3299.
CHENG K, TAN M F, ZHOU Z H, et al. Design of three-dimensional superresolution diffractive optical elements for radially polarized beam[J]. Acta optica sinica, 2010, 30(11): 3295-3299. (in Chinese)
- [22] TANG F, QIU L R, ZHAO W Q, et al. Super-resolution radially polarized-light pupil-filtering confocal sensing technology[J]. Applied optics, 2014, 53(31): 7407-7414.
- [23] MENG P W, PHAM H L, PEREIRA S F, et al. Demonstration of lateral resolution enhancement by focusing amplitude modulated radially polarized light in a confocal imaging system[J]. Journal of optics, 2020, 22: 1-5.

- [24] HUA Z J, LIU J, LIU C G. High-resolution dark-field confocal microscopy based on radially polarized illumination[J]. *Optics express*, 2022, 30(7): 11066 – 11077.
- [25] MENG P, PEREIRA S, URBACH P. Confocal microscopy with a radially polarized focused beam[J]. *Optics express*, 2018, 26(23): 29600 – 29613.
- [26] 林芬芬. 基于聚焦光针干涉和共焦成像的多功能表面形貌测量系统[D]. 武汉: 华中科技大学, 2015.
LIN F F. Multifunction surface measurement system based on focusing optical stylus interference and confocal image[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2015. (in Chinese)
- [27] 向小燕. 光栅分光式移相干涉差分共焦位移传感技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
XIANG X Y. Study on grating-based phase-shifting interference differential confocal displacement sensing technology[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016. (in Chinese)
- [28] LEE C H, LIN W C, WANG J Y. Using differential confocal microscopy to detect the phase transition of lipid vesicle membranes [J]. *Optical engineering*, 2001, 40(10): 2077 – 2083.
- [29] SHAO R J, ZHAO W Q, QIU L R, et al. Divided-aperture subtraction-differential confocal method with nanoscale axial resolution[J]. *Applied optics*, 2019, 58(12): 3252 – 3259.
- [30] LUO D, KUANG C, LIU X. Fiber-based chromatic confocal microscope with Gaussian fitting method [J]. *Optics and laser technology*, 2012, 44: 788 – 793.
- [31] LIU T, WANG J, LIU Q, et al. Chromatic confocal measurement method using a phase Fresnel zone plate[J]. *Optics express*, 2022, 30(2): 2390 – 2401.
- [32] 王梓, 石俊凯, 陈晓梅. 光谱共焦测量技术综述[J]. *半导体光电*, 2022, 43(3): 752 – 759.
WANG Z, SHI J K, CHEN X M. Chromatic confocal microscopy measurement technique: a review[J]. *Semiconductor optoelectronics*, 2022, 43(3): 752 – 759. (in Chinese)
- [33] FLEISCHLE D, LYDA W, SCHAAL F, et al. Chromatic confocal sensor for in-process measurement during lathing [C]. *The 10 th International Symposium of Measurement Technology and Intelligent Instruments*, 2011: 1 – 5.
- [34] 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: 106540.
- [35] GODA K, TSIA K K, JALALI B. Serial time-encoded amplified imaging for real-time observation of fast dynamic phenomena[J]. *Nature*, 2009, 458(30): 1145 – 1150.
- [36] KIM T, KIM S H, DO D, et al. Chromatic confocal microscopy with a novel wavelength detection method using transmittance[J]. *Optics express*, 2013, 21(5): 6286 – 6294.
- [37] ZHAO G, HSU C, WANG Y, et al. Chromatic confocal microscopy to rapidly reveal nanoscale surface/interface topography by position-sensitive detection [J]. *Applied physics letters*, 2018, 113: 83106.
- [38] RUPRECHT A K, WIESENDANGER T F, TIZIANI H J. Chromatic confocal microscopy with a finite pinhole size [J]. *Optics letters*, 2004, 29(18): 2130 – 2132.
- [39] HILLENBRAND M, MITSCHUNAS B, BRILL F, et al. Spectral characteristics of chromatic confocal imaging systems[J]. *Applied optics*, 2014, 53(32): 7634 – 7642.
- [40] CHEN C, LEACH R, WANG J, et al. Two-dimensional spectral signal model for chromatic confocal microscopy [J]. *Optics express*, 2021, 29(5): 7179 – 7196.
- [41] 陈挺, 周闻青, 卢歆, 等. 光谱共焦技术在精密几何量计量测试中的应用[J]. *计测技术*, 2015, 35(S1): 4–6.
CHEN T, ZHOU W Q, LU X, et al. Application of spectral confocal technique in measurement and measurement of precise geometric quantities [J]. *Metrology and measurement technology*, 2015, 35(S1): 4 – 6. (in Chinese)
- [42] WANG W P, ZHANG S L, LI Y. Surface micro-structure profilometry based on laser confocal feedback [J]. *Review of scientific instruments*, 2015, 86(10): 103108–103113.
- [43] 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 X, WANG Q, MA X J, et al. Determination of the inner-surface profile of a capsule using chromatic confocal spectroscopy [J]. *Chinese optics*, 2020, 13(2): 266–272. (in Chinese)
- [44] CHEN L C, NGUYEN D T, CHANG Y W. Precise optical surface profilometry using innovative chromatic differential confocal microscopy [J]. *Optics letters*, 2016, 41(24): 5660 – 5663.
- [45] 定翔, 李飞, 洪宝玉. 三维轮廓扫描法测量透镜曲率半径的实验研究[J]. *应用光学*, 2012, 33(4): 761–765.
DING X, LI F, HONG B Y. Curvature radius measurement by three-dimension profilometry [J]. *Journal of applied optics*, 2012, 33(4): 761 – 765. (in Chinese)
- [46] TANG S, LI Y H, QIU L R, et al. High-precision laser transverse differential confocal radius measurement method [J]. *Optics express*, 2021, 29(19): 29960 – 29971.

- [47] 李彦宏, 杨帅, 唐顺, 等. 后置分光瞳激光差动共焦曲率半径测量[J]. 光学精密工程, 2021, 29 (10): 2287 - 2295.
LI Y H, YANG S, TANG S, et al. Detecting divided aperture laser differential confocal radius measurement[J]. Optics and precision engineering, 2021, 29 (10): 2287-2295. (in Chinese)
- [48] YU Q, ZHANG K, CUI C C, et al. Method of thickness measurement for transparent specimens with chromatic confocal microscopy[J]. Applied optics, 2018, 57(33): 9722 - 9728.
- [49] WANG Y, QIU L R, SONG Y X, et al. Laser differential confocal lens thickness measurement [J]. Measurement science and technology, 2012, 23(5): 55204 - 55208.
- [50] COSCI A, QUERCIOLO F, FARNESI D, et al. Confocal reflectance microscopy for determination of microbubble resonator thickness[J]. Optics express, 2015, 23(13): 16693 - 16701.
- [51] 马小军, 高党忠, 杨蒙生, 等. 应用白光共焦光谱测量金属薄膜厚度[J]. 光学精密工程, 2011, 19 (1): 17 - 22.
MA X J, GAO D Z, YANG M S, et al. Measurement of thickness of metal thin film by using chromatic confocal spectral technology[J]. Optics and precision engineering, 2011, 19(1): 17 - 22. (in Chinese)
- [52] CHOI Y M, YOO H, KANG D. Large-area thickness measurement of transparent multi-layer films based on laser confocal reflection sensor[J]. Measurement, 2020: 107390.
- [53] LI J F, ZHU X P, DU H, et al. Thickness measurement method for self-supporting film with double chromatic confocal probes[J]. Applied optics, 2021, 60(30): 9447- 9452.
- [54] 毕超, 刘红光, 徐昌宇, 等. 基于光谱共焦技术的叶尖间隙测量方法研究[J]. 航空精密制造技术, 2016, 52 (2): 14 - 18.
BI C, LIU H G, XU C Y, et al. Study on measuring method of tip clearance based on chromatic confocal technology [J]. Aviation precision manufacturing technology, 2016, 52(2): 14 - 18. (in Chinese)
- [55] PRAUSE K, HERKOMMER A, PINZER B R, et al. Single-shot high speed aerial chromatic confocal metrology sensor[J]. Optics engineering, 2021, 60(12): 1- 12.
- [56] 段发阶, 牛广越, 周琦, 等. 航空发动机叶尖间隙在线测量技术研究综述[J]. 航空学报, 2022, 43 (9): 626014 - 626028.
DUAN F J, NIU G Y, ZHOU Q, et al. A review of online

blade tip clearance measurement technologies for aeroengines [J]. Acta aeronautica et astronautica sinica, 2022, 43(9): 626014 - 626028. (in Chinese)

- [57] 孙浩琳, 吴娅辉, 谢兴娟. 旋转状态下微波叶尖间隙传感器校准影响因素[J]. 计测技术, 2018, 38 (1): 17 - 20.

SUN H L, WU Y H, XIE X J. Research on influence factors of microwave measurement sensor calibration in rotation status [J]. Metrology and measurement technology, 2018, 38(1): 17 - 20. (in Chinese)

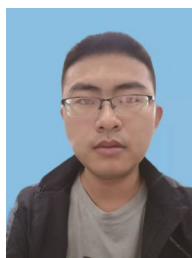
(本文编辑:刘圣晨)



第一作者: 黄向东(1970—),男,研究员,博士,主要研究方向为超精密光电测量技术、位移传感技术。



作者简介: 孙壮(1994—),男,博士研究生,主要研究方向为光谱共焦位移传感方法、三维形貌测量技术。



作者简介: 段剑秋 (1997—),男,硕士研究生,主要研究方向为光谱共焦位移传感方法。



通讯作者: 王伟波 (1983—),男,教授,博士,主要研究方向为超精密光学检测技术。