

激光与光电子学进展

高精度光谱共焦位移测量技术研究进展

白蛟¹, 李婧雯², 王晓浩², 李星辉^{2,3*}¹中国工程物理研究院材料研究所, 四川 江油 621908;²清华大学深圳国际研究生院, 广东 深圳 518055;³清华大学清华-伯克利深圳学院, 广东 深圳 518055

摘要 随着我国先进制造业的快速发展,光谱共焦位移测量技术以其精度高、适应性强、效率高等优势而得到广泛关注,被应用于诸多行业。本文首先介绍了光谱共焦技术的应用进展,对其在表面形貌及工件厚度测量方面的研究成果进行分析,从多个方面说明了光谱共焦技术在位移测量过程中的性能特点。其次,针对光谱共焦技术的关键组成阐述了其研究进展情况,包括宽谱光源、色散物镜、共轭小孔以及光谱检测与处理等方面的主要成果,展示了各种创新思想在光谱共焦技术中的具体实现,并对各种技术方案进行对比分析,梳理了光谱共焦仪器的技术特点及优缺点。最后,对光谱共焦位移测量技术存在的技术问题进行了总结和展望,以期光谱共焦技术的性能提升和应用拓展提供有益参考。

关键词 仪器,测量与计量;位移测量;光谱共焦技术;宽谱光源;色散物镜;共轭小孔

中图分类号 O436.1

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP222679

Research Progress of High Precision Chromatic Confocal Displacement Measurement Technology

Bai Jiao¹, Li Jingwen², Wang Xiaohao², Li Xinghui^{2,3*}¹Institute of Materials, China Academy of Engineering Physics, Jianguyou 621908, Sichuan, China;²Shenzhen International Graduate School, Tsinghua University, Shenzhen 518055, Guangdong, China;³Tsinghua-Berkeley Shenzhen Institute, Tsinghua University, Shenzhen 518055, Guangdong, China

Abstract With the rapid development of the advanced manufacturing industry, the chromatic confocal displacement measurement technology has attracted great attention due to its advantages of high precision, strong adaptability, and high efficiency. It has been widely used in many industries. This paper firstly introduces the application progress of chromatic confocal technology, analyzes some researches in surface topography and workpiece thickness measurement, and explains the performance characteristics of chromatic confocal technology in displacement measurement in many aspects. Secondly, this paper details the key components of chromatic confocal technology, including broad-band light source, dispersive objective, conjugate pinhole, and spectral detection and processing, and demonstrates various innovative ideas in the chromatic confocal technology. These specific implementation technical solutions are broadly compared and analyzed, including the technical characteristics, advantages and disadvantages. Finally, this paper summarizes and prospects the existing technical problems of chromatic confocal displacement measurement technology, in order to provide references for the performance improvement and application expansion of the chromatic confocal technology.

Key words instruments, measurement and metrology; displacement measurement; chromatic confocal technology; broadband light source; dispersion objective; conjugate pinhole

1 引言

21 世纪以来,制造业作为科学技术创新培育的基

础阵地之一,正朝着高性能、数字化和智能化的方向发展,对于我国迈向工业强国具有重大意义。在制造业中,位移测量技术是尺度表征、瞄准定位的基本手段,

收稿日期: 2022-09-30; 修回日期: 2022-10-24; 录用日期: 2022-10-27; 网络首发日期: 2022-11-06

基金项目: 中国工程物理研究院材料所特聘人才项目(TP201503-1)、国家自然科学基金(61905129)、广东省基础与应用基础研究基金(2021B1515120007)、深圳市科技计划基础研究稳定支持项目(WDZC20200820200655001)

通信作者: *li.xinghui@sz.tsinghua.edu.cn

能够帮助人们准确认识制造过程及制造结果,有利于制造工艺优化、生产质量控制以及服役性能监测等,被广泛应用于航天航空、国防军工、化工材料、生物医学等诸多行业^[1-4],比如:机器人往往需要在较大的自由空间内实现毫米级甚至微米级的精确定位,以对目标物体进行抓取或停放;精密和超精密加工中必须利用高精度位移测量仪器获取工件相对机床或刀具位置,以避免撞机事故,而且对已加工轮廓的检测也离不开位移测量技术;芯片制造中需要纳米级位移测量精度以保证光刻图形的准确性和复现性;高精度位移测量技术还能用来检测光伏玻璃、集成电路的保护层或减反射薄膜厚度,助力于薄膜制备工艺优化。

根据位移信息的转换方式不同,位移传感器可以分为接触式和非接触式两种类型。接触式位移传感器利用探针贴近待测表面,在探针的后端配置光电敏感杠杆或者电磁/电感开关,在发生接触时产生信号变化,即可记录待测表面当前位置,两次位置之间的距离即为待测表面的位移,典型仪器如三坐标测量机、探针轮廓仪、原子力显微镜等。接触式位移传感器的性能可靠、结构简单、测量范围大,但必须由导轨驱动探针,测量精度和速度受限于导轨的定位精度和移动速度,还需要对探针尖端尺寸的误差进行补偿,并且测量过程存在应力变形甚至表面损伤,不适于批量化、流水线式工业现场的快速检测。

非接触式位移传感器主要利用电磁或光学信号进行位移信息的转换,包括电容位移传感器、电涡流位移传感器、激光干涉仪、激光三角法传感器、光栅位移传感器等等^[5-9]。电磁式位移传感器的测量精度高但易受电磁干扰,且待测表面积需大于探头面积才能获得理想结果。光电式位移传感器种类丰富、性能全面,具有非接触、高精度、高速度、操作灵活等优势,尤其如激光干涉仪、激光三角法位移传感器、光栅位移传感器等,具有广泛的市场应用,但也存在环境干扰大、对待测表面普适性差等不足。

光谱共焦位移传感器是近年来发展非常迅速的一种光电式位移传感器^[10],利用色散物镜主动投射宽谱光到待测表面,并从反射光中提取聚焦波长,根据轴向色散理论和波长编码规律获取待测表面的轴向位置信息,为表面轮廓、薄膜厚度等位移测量需求提供了一种全新的测量手段。理论上,光的波长可以无限细分,因此与波长一一对应的轴向位置具备无限细分的潜力,则光谱共焦位移测量技术可获得理论无限小的轴向分辨率。实际上,光谱共焦位移测量技术主要受限于光谱仪波长分辨率及噪声影响,但通过光谱处理等技术手段,目前已经实现了纳米级的轴向位移测量分辨率,重复精度也达到了数十纳米水平,与高精度激光干涉仪相当,优于常规激光三角法位移传感器。另一方面,光谱共焦位移传感器结构简单,相对于激光干涉仪,其尺寸小且质量轻,可在多种测量场合进行快速安装和

集成,便捷性和可集成性与激光三角法位移传感器相当。简而言之,与其他常见的光电式位移测量技术相比,光谱共焦位移测量技术在精度、分辨率和可集成性等方面的综合优势突出,自诞生以来便受到众多学术机构和仪器公司的关注与研究,逐渐发展成为当前位移测量领域的重要组成部分之一。

本文主要介绍高精度光谱共焦位移测量技术的研究进展,首先阐述了光谱共焦技术的形成和应用对象,如表面轮廓和厚度测量;其次,在具体的技术细节上,分别对宽谱光源、色散物镜、共轭小孔、光谱检测及处理等关键技术进行了论述和分析;最后,总结了当前光谱共焦位移测量技术的研究难点和未来发展方向。

2 光谱共焦技术的应用进展

共聚焦技术在 20 世纪 40~50 年代由 Winston 等^[11-15]发现并不断完善,衍生出激光共聚焦技术、光谱共焦技术等重要分支。如图 1(a)所示,光谱共焦技术基于共聚焦技术,结合光学色散现象,将不同波长的光聚焦在不同的轴向位置,相当于对光轴上的点位进行波长编码,通过分析待测表面反射光的聚焦波长,进而根据图 1(b)提前标定的响应曲线求解待测表面位置。由于无需轴向扫描且测量结果与光强相关性小,光谱共焦技术测量效率高且对光源波动和环境光的抗干扰性强,已成为表面轮廓测量的国际标准之一。

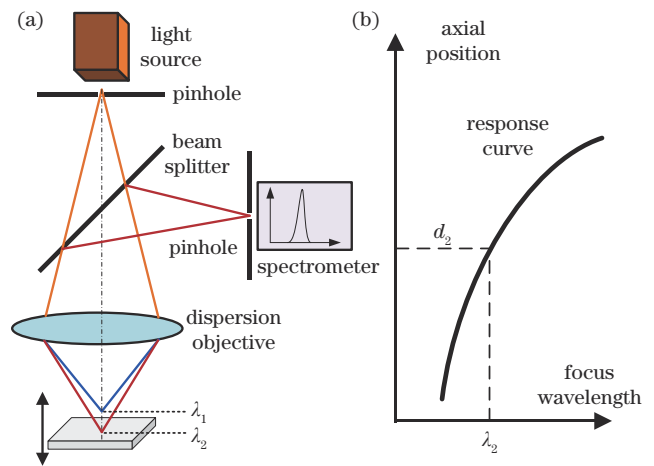


图 1 光谱共焦技术示意图。(a) 基本原理;(b) 响应曲线
Fig. 1 Diagram of chromatic confocal technology. (a) Basic principle; (b) response curve

随着光谱共焦位移测量技术的快速发展,市场上已出现多种商业级光谱共焦传感器产品,主要企业包括法国 Stil 公司、德国 Precitec 公司、德国 Micro-Epsilon 公司、国内的 ThinkFocus 公司和 LightE-Technology 公司等,覆盖多种型号规格的光学探头和光电控制器,以满足不同的测量需求。表 1 中给出了几种典型光谱共焦传感器产品的技术参数,其测量分辨率和线性精度基本都在数十纳米级别,而且适用于

表 1 几种光谱共焦传感器产品的性能参数

Table 1 Performance parameters of several chromatic confocal sensor products

Product	Stil (CL2-MG210)	Precitec (CHRcodile C)	Micro-Epsilon (IFS2402)	ThinkFocus (OP2)	LightE-Technology (D35A40R0S3)
Measuring range / μm	400	500	400	380	400
Maximal slope angle / $(^\circ)$	± 28	± 45	± 13	± 28	± 40
Spot size / μm	4	5	9	10	3.4
Axial resolution /nm	102	20	16	20	1
Linearity error	± 55 nm	170 nm	± 0.08 %	± 0.02 %	—
Diameter /mm	27	43	8	27	35
Measuring frequency /kHz	2.0	4.0	6.5	4.5	4.0

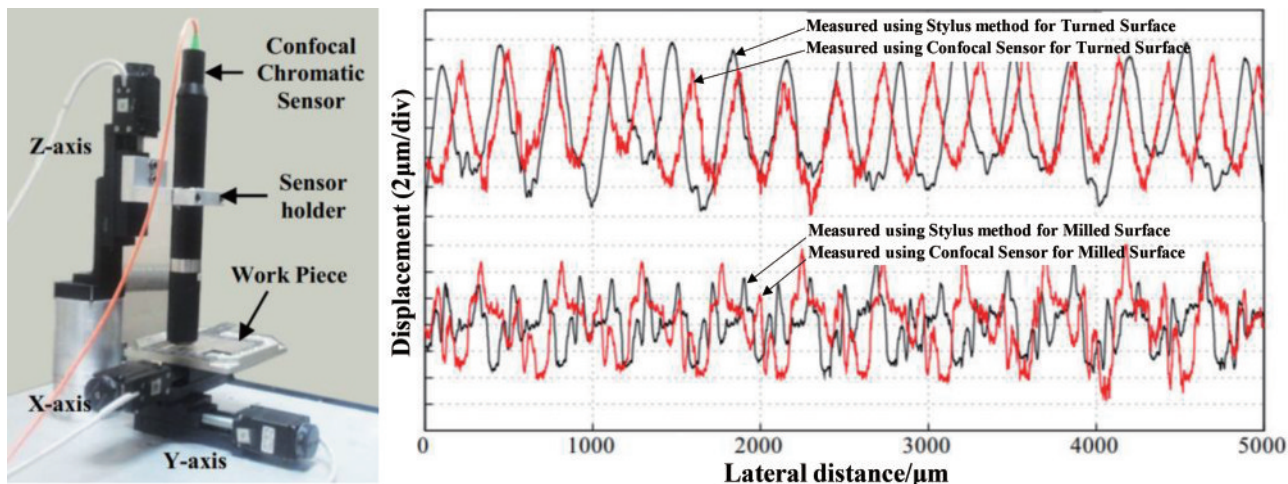
测量倾斜表面,测量频率为数千赫兹,在高精度位移测量中具有较为全面的综合优势。

除了商业级光谱共焦传感器产品之外,目前还有大量光谱共焦技术的科研实验样机被用于开展位移测量,以下从表面轮廓检测和工件厚度测量两种主要测量对象出发,对光谱共焦技术在位移测量领域的应用进展进行介绍,从实际使用的角度阐释其性能特点。

2.1 表面轮廓检测

光谱共焦传感器可以快速获取光轴上单个点位相对色散物镜的轴向距离,在测量过程中通过横向扫描可以得到扫描路径上多个点位的相对高度,选择适当

的基准平面即可得到待测物体的表面轮廓。Garzón 等^[16]、刘海霞^[17]、刘伯奇^[18]、Zhou 等^[19]、Nadim 等^[20]采用一般的单点光谱共焦位移传感器,通过横向扫描测得了硬币、平板、非球面透镜等物体的表面轮廓,凭借光谱共焦技术的高分辨率、倾斜表面适应性、高效率等优势,其测量结果更为精确。更进一步,光谱共焦位移测量技术所获取的表面轮廓可用于提取表面粗糙度,Rishikesan 等^[21]将光谱共焦传感器集成在三维位移平台,实现了对车削、铣削表面粗糙度的离线测量,结果与探针轮廓仪吻合,而且更能体现局部细节,如图 2 所示。

图 2 光谱共焦传感器离线测量车削和铣削表面^[21]Fig. 2 Turned and milled surface measurement by chromatic confocal sensor^[21]

另外,通过多个光谱共焦位移传感器协作的方式还可同步获取多维度的表面形貌,以提取更为全面的待测物体尺寸信息,如 Taek 等^[22]采用三个光谱共焦传感器对样品轮廓进行三个角度的同步测量;Nouira 等^[23]使用两个光谱共焦传感器同时测量单一对象,详细分析了测量过程中的探头倾斜、测量速度等产生的误差规律;Bai 等^[24]利用多个光谱共焦传感器进行回转件外圆轮廓测量,经误差分离后的圆度测量结果与超精密圆度仪基本一致,体现了其高精度和高效率优势;蓝河等^[25]通过对称布置两个光谱共焦传感器,实现了对精密主轴径向回转误差的高精度测量,所测标准球

圆度与标称值仅相差 5 nm。

除了离线测量工件的表面,光谱共焦传感器还很容易集成在加工设备,进而实现对表面轮廓的在线或在线测量。Zou 等^[26]通过在超精密车床上集成光谱共焦传感器,凭借车床导轨扫描了已加工的凸球面和周期微结构表面的三维形貌,测量不确定度仅为 83 nm,如图 3(a)、3(b)、3(c)所示;Wang 等^[27]、Ye 等^[28]、Kefersteine 等^[29]则在精密磨床上集成光谱共焦传感器来检测已加工表面形貌,显示了对磨削环境的良好适应能力,如图 3(d)、3(e)、3(f)所示,有利于快速检测磨削效果并调整磨削参数。同样地,光谱共焦

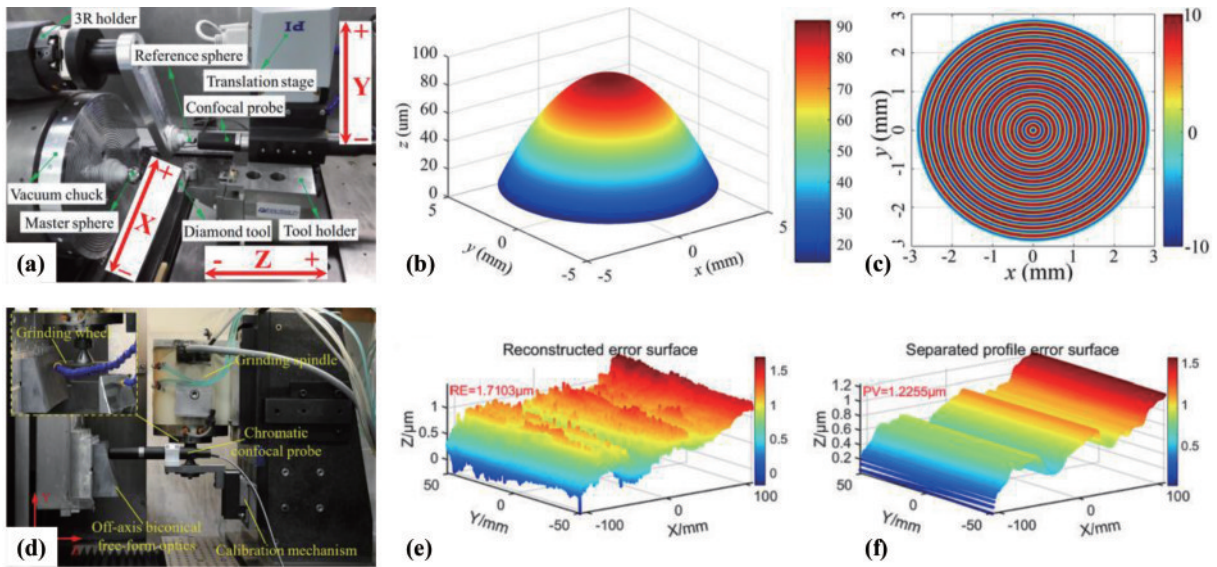


图 3 光谱共焦技术在机测量表面轮廓。(a)、(b)、(c) 车削球面^[26]; (d)、(e)、(f) 磨削自由曲面^[27]

Fig. 3 On-machine surface profile measurement by chromatic confocal technology. (a), (b), (c) Turned sphere surface^[26]; (d), (e), (f) grinded free-form surface^[27]

技术也可以进行表面粗糙度的在线测量,如Fu等^[30]进行了这方面研究,测量过程十分便捷高效。除了机械加工表面,其他加工或工艺现场也可以采用光谱共焦技术进行实时状态在线监测,如Zakrzewski等^[31]将光谱共焦位移测量光路集成到激光加工光路中进行加工表面检测;Bi等^[32]利用光谱共焦传感器的高采集效率和微细外径等优势,对空压机内高速旋转的叶片与定子的间隙进行工艺监测;Ueda等^[33]利用高分辨率光谱共焦传感器监测激光光阱中微球位置;Agoyan等^[34]利用光谱共焦传感器监测复杂辐射环境下核燃料形状变化;Dai等^[35]通过光谱共焦传感器检测微孔膜过滤时的变形情况;Berkovic等^[36]利用光谱共焦传感器实现对振动音叉的连续监测;Yang等^[37]利用光谱共焦技术研究原子力显微镜在扫描过程中的高频动态特性。这些广泛的应用场景充分表明了光谱共焦技术对测量对

象和环境的优异适应性。

单点光谱共焦传感器必须辅以横向扫描设备才能获得三维表面形貌,部分研究者提出利用小孔阵列、微透镜阵列或扫描振镜等方式改进单点光谱共焦传感器为线型或面型传感器,以实现多点快速测量,测量效率更高,但主要问题在于其横向分辨率受小孔间距限制,而且容易混杂待测表面不规则结构所引入的漫反射光,信噪比差,测量区域较小。Ang等^[38]、Tiziani等^[39-40]进行了小孔阵列及微透镜阵列的光谱共焦技术研究,获得了微柱阵列及微槽三维轮廓的高速测量,如图4(a)、4(b)所示;Chun等^[41]、Cha等^[42]、Wertjanz等^[43]、Yu等^[44]采用内置的扫描振镜旋转光路,通过校准和降噪处理,也顺利获得了微机电系统(MEMS)等微小结构的三维表面轮廓,如图4(c)、4(d)所示。

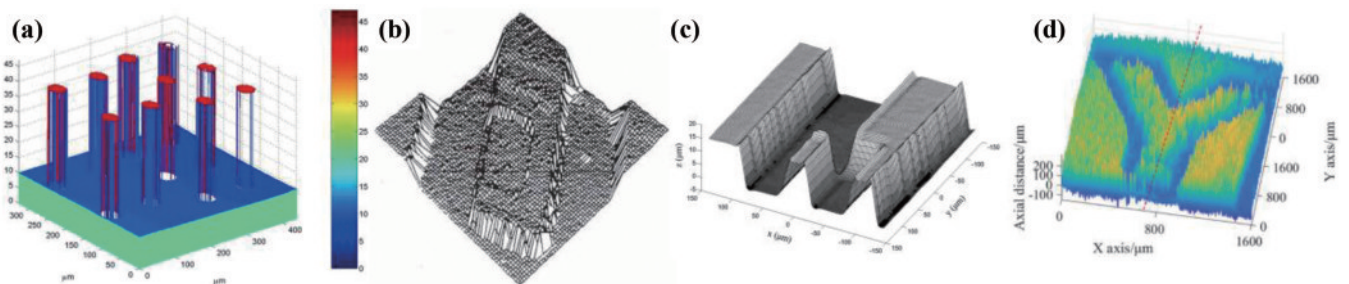


图 4 光谱共焦技术用于测量微小结构。(a) 微柱阵列^[38]; (b) 微槽^[40]; (c) MEMS 结构^[41]; (d) 微字母结构^[44]

Fig. 4 Micro structure measurement using chromatic confocal technology. (a) Microcolumn array^[38]; (b) microgroove^[40]; (c) MEMS structure^[41]; (d) micro letter structure^[44]

除了常规加工手段获得的表面轮廓,光谱共焦技术也可用于生物医学组织的轮廓测量,具有无伤害、无发热、安全性高的特点。如图5(a)所示,Cui等^[45]利用光谱共焦传感器实现了洋葱切片的三维成像,高度分

辨率为 $1.3 \mu\text{m}$;如图5(b)所示,Johnson等^[46]采用基于菲涅耳透镜的光谱共焦传感器,辅以横向扫描,测量了人眼角膜的中央厚度,对于眼角膜疾病诊断具有重要意义;如图5(c)、5(d)所示,Olsovsky等^[47-48]利用非球

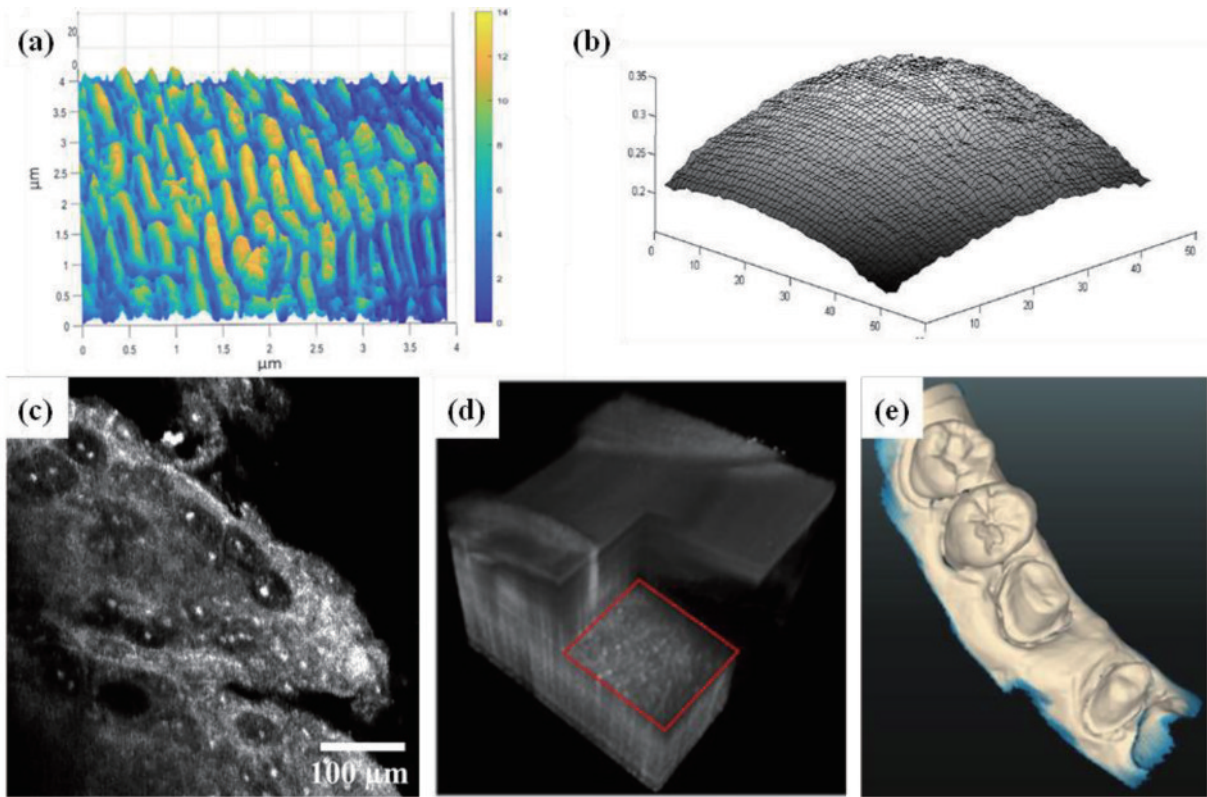


图 5 光谱共焦传感器用于检测生物组织。(a) 洋葱切片^[45]；(b) 人眼角膜^[46]；(c)、(d) 猪口腔粘膜^[48]；(e) 牙齿轮廓^[49]

Fig. 5 Biological tissues measurement using chromatic confocal sensors. (a) Onion slices^[45]; (b) human cornea^[46]; (c), (d) porcine oral mucosa^[48]; (e) teeth profile^[49]

面透镜在 590~775 nm 波段实现了 150 μm 的色散范围,能够在细胞凋亡前快速完成猪口腔粘膜的立体成像,且图像对比度丝毫不逊于单光子荧光共焦显微镜。此外,由于光谱共焦传感器结构简单、使用灵活,如图 5(e)所示,Zint 等^[49]利用微透镜阵列和小孔阵列搭建的光谱共焦系统,在牙齿轮廓测量中显示了较高的分辨率和精度,与微型计算机断层扫描(CT)的测量结果相当,而成本大大降低。

2.2 工件厚度测量

为了实现对工件厚度的测量,最直接的方案是将工件置于平面上进行台阶高度测量,如刘雪原^[50]采用光谱共焦传感器对放置于平面上的石英摆片厚度进行对比测量,多次测量结果的标准差仅 100 nm 左右,如图 6(a)所示。但是这种方式需要扫描结构或者改变工件位置,会给测量带来较大不确定性。另一种方案则是在工件上下对称布置两个位移传感器,利用两个

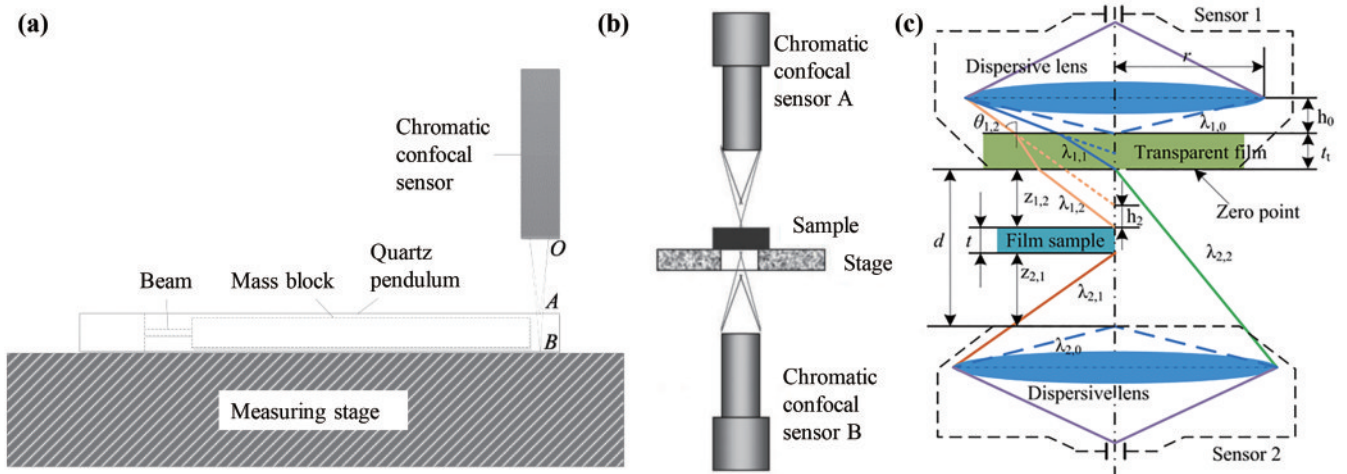


图 6 光谱共焦传感器用于测量工件厚度。(a) 台阶高度测量法^[50]；(b) 对称测量法^[51]；(c) 辅助膜对称测量法^[54]

Fig. 6 Workpiece thickness measurement using chromatic confocal sensor. (a) Step height measurement^[50]; (b) symmetrical measurement^[51]; (c) auxiliary membrane symmetry measurement^[54]

传感器的轴向距离来求解工件厚度:如马小军等^[51]通过上下对称布置的光谱共焦传感器对不透明金属薄膜进行厚度检测,不确定度仅为 120 nm,解决了惯性约束聚变中金属薄膜样品制备及质量控制的难题,如图 6(b)所示;顾倩倩等^[52]同样利用对称布置的光谱共焦传感器检测了惯性约束聚变(ICF)靶零件的平行度,不确定度可达 0.0016°。显然,对称布置传感器的方案更为直接,但对光轴的共轴校准比较困难,有部分研究人员对此开展了研究:孙仕凯^[53]利用两个光谱共焦传感器实时校正的方式对薄膜厚度进行测量,可测范围为 100~800 μm ,重复测量精度为 8 μm ;Li 等^[54]采用辅助膜的方式对称布置光谱共焦传感器,以此实现薄膜样品厚度的测量,达到亚微米级测量精度,如图 6(c)所示。

此外,也有研究人员基于薄膜多界面反射原理,将光谱共焦传感器用于透明薄膜的厚度测量,其基本原理如图 7(a)所示,在透明薄膜的上下表面将会反射不

同波长光线,反射光谱存在两个高峰,即对应两个轴向位置,求差可解算薄膜厚度。王佳怡等^[55]、张宁等^[56]采用这种方案测厚度范围为 1~20 mm 的薄膜,精度达 $\pm 5 \mu\text{m}$,刘伯奇^[18]、周勇^[57]分别实现了手机钢化玻璃、透镜的厚度测量,也取得了良好效果。依托光谱共焦传感器的可集成性强,透明薄膜厚度在线测量也已实现,如 Chen 等^[58]将光谱共焦传感器集成到辊对辊热压印机,完成了 260 μm 薄膜厚度的在线监测,标准差仅 1.43 μm ,如图 7(b)所示;Niese 等^[59]利用光谱共焦传感器监测聚合物薄膜厚度,可快速反馈优化薄膜制备工艺。

特别地,Bai 等^[60]结合光谱共焦技术和薄膜干涉理论来获取确定入射角度的反射光谱,然后进行全光谱拟合来反演二氧化硅薄膜厚度,可达纳米级测量精度,与国际先进的反射膜厚仪相当,而且该方案聚焦光线于薄膜表面,横向分辨率仅数微米,非常适合微小区域膜厚的精细化测量,其光路模型如图 7(c)所示。



图 7 光谱共焦技术用于膜厚测量。(a)、(b)双层反射式^[58]; (c)定入射角度式^[60]

Fig. 7 Film thickness measurement by chromatic confocal technology. (a), (b) Double-layer reflective method^[58]; (c) constant incident-angle method^[60]

总之,以上从多个方面介绍了光谱共焦技术在位移测量中的应用研究进展:单点光谱共焦传感器辅助横向扫描获取表面轮廓或表面粗糙度、多个光谱共焦传感器协作获取多维度尺寸信息、集成光谱共焦传感器实现在机/在线的实时表面轮廓或工艺状态监测、改进线型或面型光谱共焦传感器快速获取表面轮廓、利用光谱共焦传感器开展生物医学组织轮廓测量、台阶式工件厚度测量、对置双光谱共焦传感器测厚、薄膜多界面反射式透明膜厚测量、薄膜干涉光谱拟合法反演厚度等。诸多研究表明,光谱共焦技术具有精度高、倾斜表面适应性强、安装集成简单、测量效率高、实时性好、对待测表面损伤小等综合性能优点,能较好地满足普通加工表面、倾斜表面、在线/在机尺寸状态、三维微结构以及生物医学组织等多种表面轮廓测量以及透明/不透明薄膜厚度测量的广泛需求,为高精度位移测量提供了一种可靠选择。

但是,光谱共焦技术也存在一定局限性,比如测量

精度和稳定性还有待进一步提高至纳米级别,对大倾角、弱反射表面等的测量效果也并不理想,这些难题激励着相关研究人员对光谱共焦的关键技术内涵开展更加深入的研究和优化,比如宽谱光源、色散镜头、光谱检测等,以期不断提升光谱共焦技术的位移测量能力。

3 光谱共焦技术的研究进展

光谱共焦技术在光学和光电探测技术的共同促进下得以不断创新和拓展,产生了丰富的研究成果。以下从光谱共焦位移测量系统的四个关键技术内涵对当前的研究进展情况进行梳理,并对这些技术方案进行简要分析。

3.1 宽谱光源

光谱共焦技术采用宽谱光源进行轴向位置的波长编码,因此光源的连续性和稳定性直接影响位移测量的分辨率和稳定性。

早期的光谱共焦技术基本都采用普通白炽灯,后

来白光光源种类不断增多,如卤钨灯、氙灯、发光二极管(LED)等,特别是白光LED,具有光谱范围适当(380~760 nm)、光能利用率高、简单易集成等优点,在光谱共焦传感器研制与开发中被广泛使用^[61-62]。虽然卤钨灯和氙灯也能产生白光,但其在可见波段光强变化幅度大,导致全量程的信噪比差别明显,而且开机预热时间长,寿命也不高。

此外,根据光学非线性效应,脉冲激光通过非线性调制后其波长带宽增宽,形成超连续谱光源,具有高亮度、高稳定性等优点,成为光谱共焦技术研究的热点光源之一。如图 8(a)所示,Shi 等^[63]利用光子晶体光纤(PCF)获得超连续谱光源(350~1750 nm),在

其白光波段进行光谱共焦技术研究,照明效率和信噪比得到极大提升;如图 8(b)所示,Minoni 等^[64]利用微结构光纤(MOF)获取超连续谱光源(488~1064 nm),其光谱曲线连续光滑,且强度稳定,位移测量的重复精度达到 0.36%;Liu 等^[65]、Johnson 等^[66]、Matsukuma 等^[67]采用了超连续谱光源(400~2400 nm)进行光谱共焦成像技术研究,可产生更大的色散范围,有利于增加位移测量量程。再者,Chen 等^[68]使用锁模飞秒激光器作为光源,在 1.46~1.64 μm 红外波段实现光谱共焦位移测量,轴向分辨率可达 30 nm,显示了该光源良好的稳定性,但由于带宽有限,其色散范围仅 40 μm 。

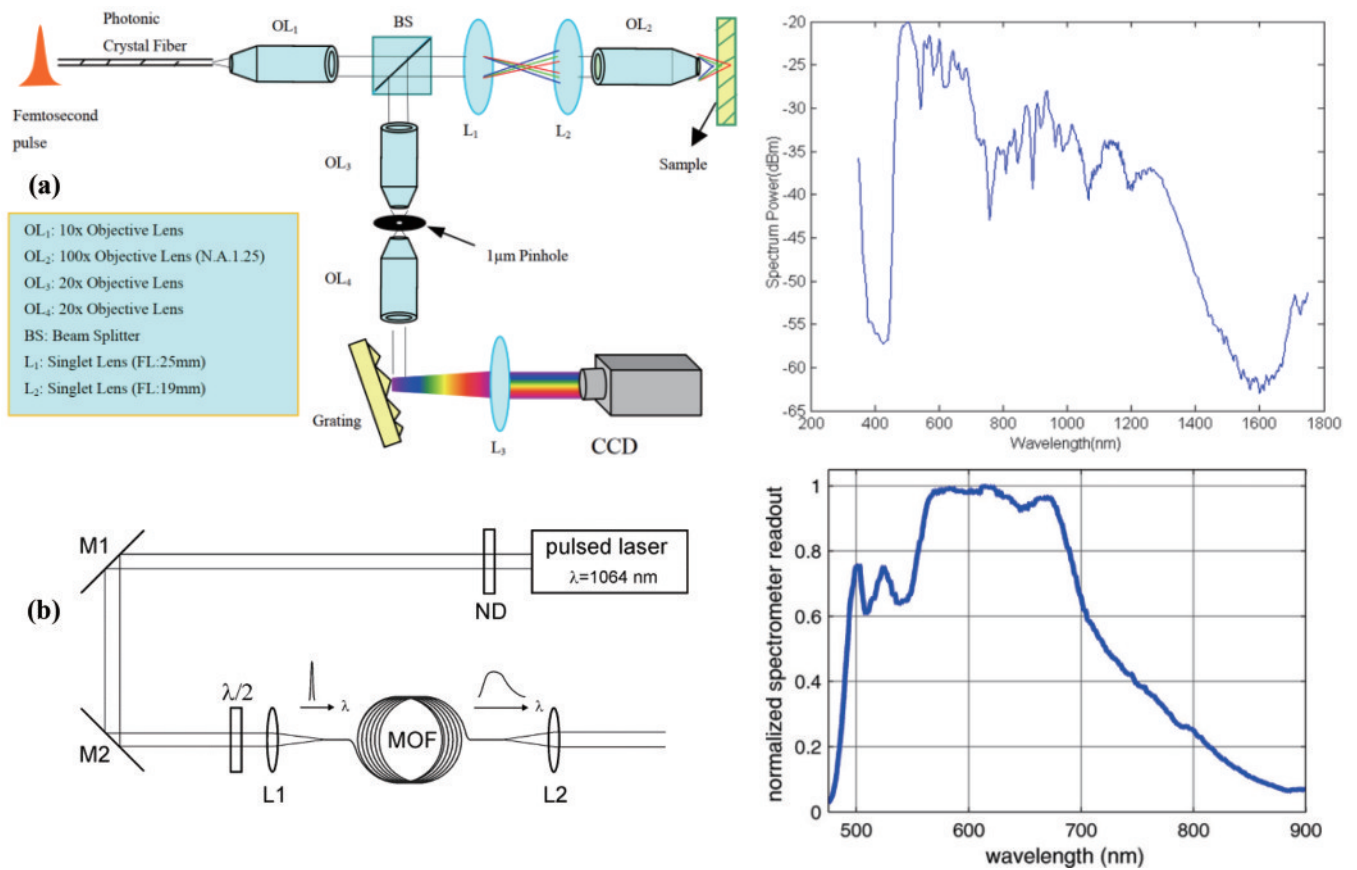


图 8 光谱共焦系统的光源。(a) PCF 器件及其光谱^[63]; (b) MOF 超连续谱光源及其光谱^[64]

Fig. 8 Light source of chromatic confocal system. (a) PCF device and its spectrum^[63]; (b) MOF supercontinuum light source and its spectrum^[64]

虽然超连续谱光源或锁模飞秒光源同样能为光谱共焦技术提供宽谱光,并且波长稳定性更好,但是此类设备需配置大功率激光器,结构复杂、价格昂贵且存在安全隐患,目前多数停留在实验室研究阶段,而简单可靠、低成本的 LED 白光光源、卤素光源仍然是光谱共焦技术研究和商业化产品开发的主流选择。

3.2 色散物镜

色散物镜是光谱共焦技术的关键,决定了其测量范围、待测表面允许倾角、回光效率等使用性能。经过多年研究,涌现出各式各样的色散物镜,但基本上可以

分为两类,分别由折射率光学元件或衍射光学元件(DOE)组成。

折射率光学元件最容易获取,其色散原理最为人熟知,也是光谱共焦色散物镜的最主要形式^[69]。Molesini 等^[13]将白光进行准直,然后通过平凸透镜实现色散现象,最后利用显微镜聚焦,由于准直环节就已经引入色散,而且单个平凸透镜很难优化除色差外的其他像差,不能保证落在待测表面的光斑质量;Shi 等^[63]、余卿等^[70]则在准直后利用两块薄凸透镜组进行色散,同样对像差的优化效果有限;李煌^[71]、

Li 等^[72]、牛春晖等^[73]、刘乾等^[74-75]、邵谭彬等^[76]通过 Zemax 光学仿真软件设计了由多块透镜组成的整体式色散物镜,在具备色散功能的前提下对像差进行了优化,但未给出实际的成像效果,可行性尚不确定,如图 9(a)、9(b)、9(c)所示;Wang 等^[77]、杨锐等^[78]利用多级串联的方式扩大色散范围,如图 9(d)所示为 Wang 等设计的四级串联的色散物镜,色散范围达到 30 mm,

但是由于使用了过多双胶合透镜,增加了镜头复杂度,并且大量透镜表面的无序折反射将极大降低回光效率及反射光谱信号的信噪比。此外,由于自主定制色散物镜的成本较高,还有部分研究人员直接使用商品化色散物镜,这些色散物镜基本都是由多个薄透镜组成,经过光学设计和优化,具备较好的使用性能,但具体参数不公开。

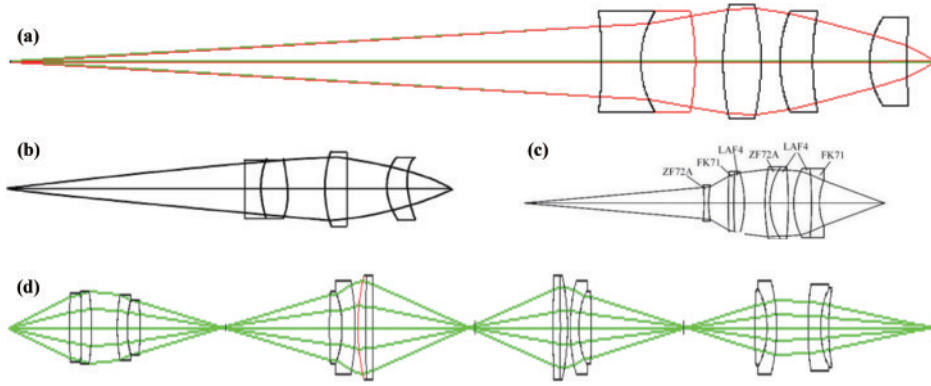


图 9 光谱共焦色散物镜。(a)、(b)、(c) 透镜组形式^[72-73,75]; (d)多级串联形式^[77]

Fig. 9 Dispersion objective of chromatic confocal system. (a), (b), (c) Lens group^[72-73, 75]; (d) series lens^[77]

此外,DOE 也被广泛应用于色散透镜的设计。如图 10(a)所示,根据衍射原理,对于同一级次衍射,不同波长光线的偏折角度不同而产生色散,波长越长,焦点

越靠近 DOE^[79]。Dobson 等^[80]、Garzón 等^[81]、Rayer 等^[82]、Liu 等^[83]利用典型的 DOE(菲涅耳透镜)来产生色散,并研究了衍射效率对波长-位置响应曲线、分辨率等的影

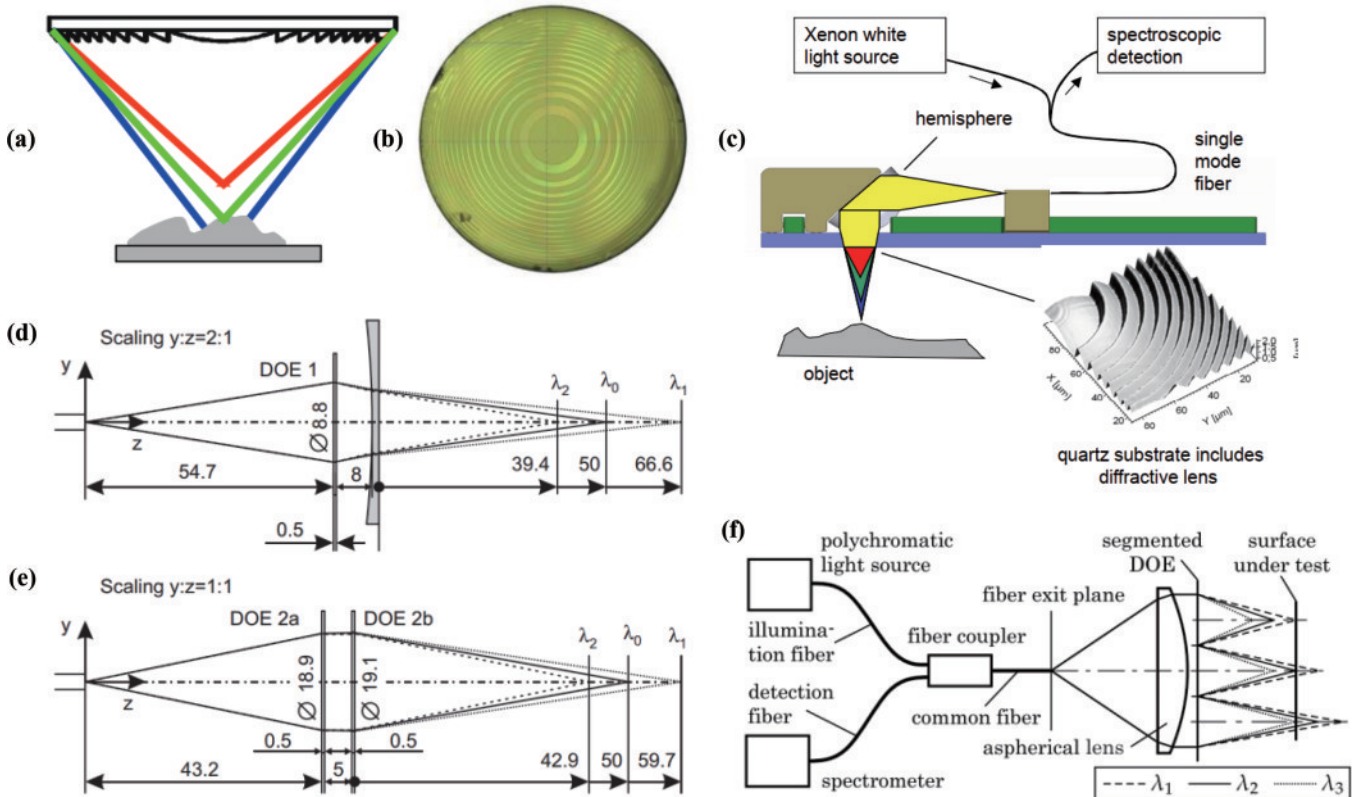


图 10 基于 DOE 的色散物镜。(a) DOE 的色散特性^[79]; (b) DOE 实物^[87]; (c) DOE 光谱共焦系统^[79]; (d)、(e) DOE 与透镜混合^[85]; (f) DOE 多点位光谱共焦系统^[84]

Fig. 10 Dispersion objective based on DOE. (a) Dispersion characteristics of DOE^[79]; (b) DOE physical object^[87]; (c) chromatic confocal system with DOE^[79]; (d), (e) DOE mixed with lens^[85]; (f) DOE multipoint chromatic confocal system^[84]

响;Hillenbrand 等^[84-85]对比了纯 DOE 组成的色散物镜和 DOE 与透镜混合的色散物镜的成像效果,如图 10(d)、10(e)所示;金博石等^[86]也对 DOE 与透镜混合的色散物镜进行了设计和分析。DOE 的设计简单,波长-位置响应曲线的线性度更高,而且无需多个透镜组来校正像差,因此可以制作尺寸非常小的色散物镜,如 Pruss 等^[79]、Fleischle 等^[87]、Ruprecht 等^[88]、Park 等^[89]、Luecke 等^[90],利用 DOE 设计并制作了毫米级外径的色散透镜,如图 10(b)、10(c)所示,可用于微孔内径检测。此外,DOE 容易实现阵列式设计,比如 Hillenbrand 等^[85]采用分区域的 DOE,实现了横向三个点位同步的光谱共焦位移测量,如图 10(f)所示,有效提升了测量效率。

但是由于衍射光学元件通常存在多个衍射级次,不可避免产生额外的反射光而影响信噪比,并且光线两次经过衍射光学元件,导致回光效率不高,所以实际的测量精度并不高,在实际应用中尚未大规模使用。相对而言,折射率光学元件组成的色散物镜的研究更为成熟,具有设计灵活、杂散光少、回光效率高等优点,

依然是目前的研究重点。

3.3 共轭小孔

共轭小孔是共聚焦技术的具体实现手段,其孔径大小对系统分辨率和反射光的信噪比都极为重要,如 Ruprecht 等^[91]、武芑樾等^[92]分析了孔径大小对光谱共焦传感器分辨率和回光效率的影响,必须进行兼顾考虑。此外,阵列式分布的小孔也被广泛研究,以增加横向测量点位,提高测量效率。Tiziani 等^[39-40]、Ang 等^[38]利用尼普科夫圆盘进行光线的分束,设置于分光镜和色散物镜之间,兼有光源小孔和探测小孔的功能,可实现快速轮廓扫描;Hwang 等^[93]通过带小孔的旋转原盘对光频调制,实现了高对比度的三维成像。类似地, Hillenbrand 等^[94]、Chanbai 等^[95]、Hu 等^[96]利用阵列小孔对平行白光进行分束,并设置共轭阵列小孔进行光谱检测,可实现表面轮廓的同步测量,如图 11(a)所示;Cui 等^[45]利用两个矩阵液晶显示屏(LCD)代替阵列小孔,实现了测量点位的计算机自动控制,增强了表面轮廓检测的灵活性,如图 11(b)所示。

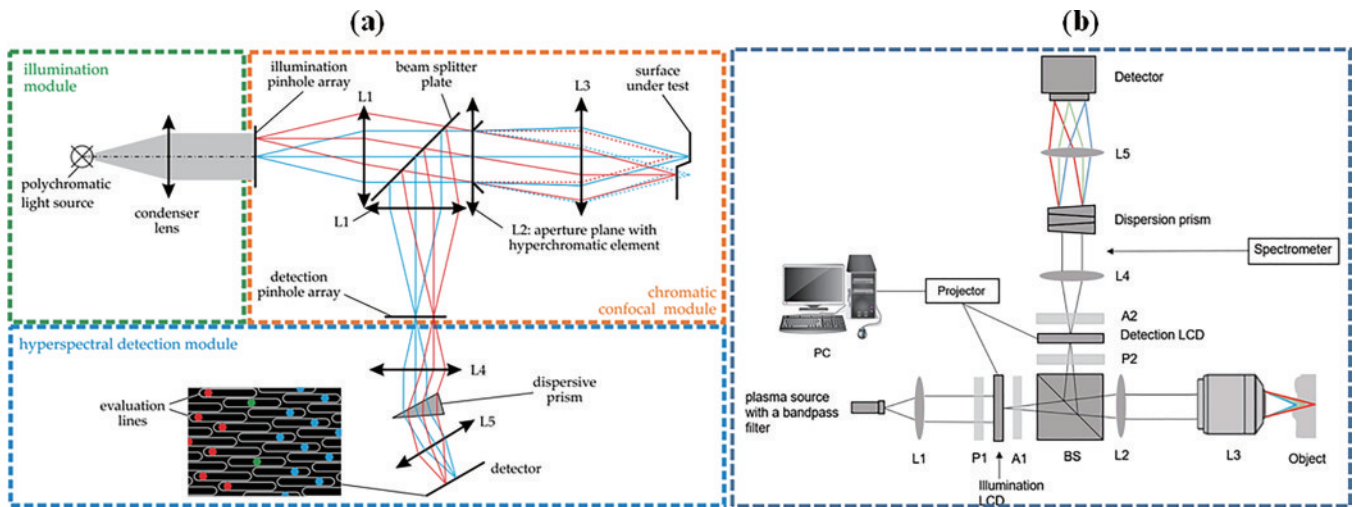


图 11 光谱共焦系统共轭形式。(a) 阵列小孔式^[94]; (b) LCD 像素阵列式^[45]

Fig. 11 Chromatic confocal system with different confocal types. (a) Pinhole array^[94]; (b) LCD pixel array^[45]

此外,除了传统的小孔光阑形式,多模光纤也常被用来承担共轭小孔的角色,其芯径有多种规格,从几十到上百微米,大大简化了光路结构,安装调节都十分方便,而且损耗低、传输稳定且有利于光谱共焦传感器的模块化布局,在商业化产品开发中得到广泛使用。此外,Luo 等^[97]、Chen 等^[68]、Bai 等^[62]、Chen 等^[98]、王津楠等^[99]采用多模光纤或多模光纤耦合器来传输光线,以实现共聚焦效果,如图 12 所示。

总之,小孔阵列的形式虽然能够实现快速多点位成像,提高测量效率,但是精度和分辨率有限,而多模光纤或光纤耦合器的形式常被用于单点位的位移检测,效率有限但精度和分辨率更高,且在模块化布局和远距离传输上具有优势。

3.4 光谱检测及处理

由于光谱共焦技术需根据反射光的聚焦波长求轴向位置,因此必须对反射光进行光谱检测并进行寻峰处理。光谱检测通常利用色散元件将复色光分解成单色光,然后利用光电探测器获得各波长的光强,如棱镜光谱仪、光栅光谱仪等。Molesini 等^[13]、Shi 等^[100]利用三角棱镜进行光谱分析,Shi 等^[63]也曾利用光栅进行分光,Taphanel 等^[101-102]利用彩色相机进行粗略光谱分析。实际上,Minoni 等^[64]、Luo 等^[97]使用的商用光谱仪的内部采用的分光元件同样是三角棱镜或光栅。

与此完全不同的是,部分研究者还利用波长响应特性来提取轴向位置。如图 13(a)所示, Kim 等^[103]根据波长与滤光片透过率一一对应的关系,直接使用透过率代替波长来标定位置,由于只采用两个光电倍增

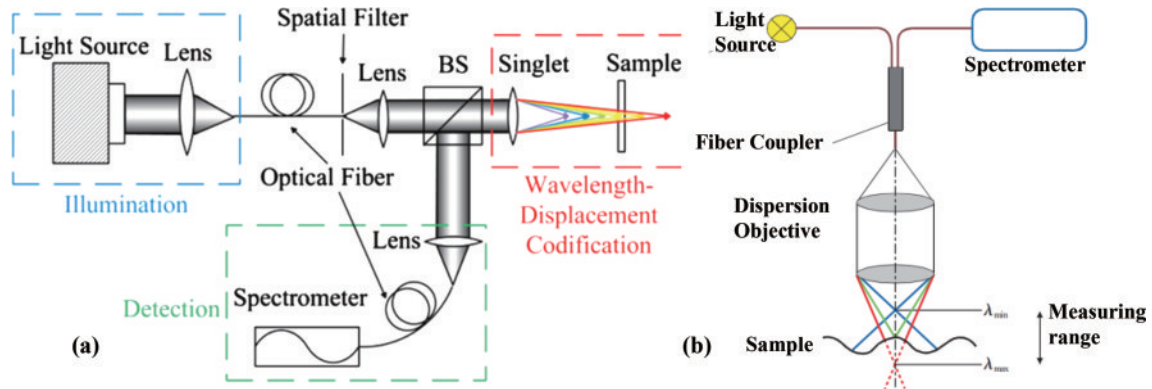


图 12 光纤在光谱共焦系统中的使用。(a) 多模光纤^[97]；(b) 光纤耦合器^[99]
Fig. 12 Chromatic confocal system with fiber. (a) Multimode fiber^[97]；(b) fiber coupler^[99]

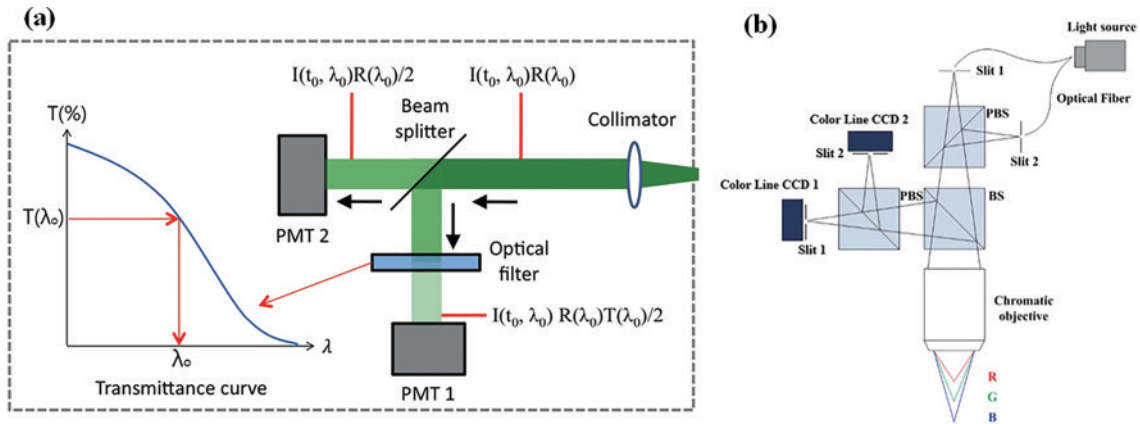


图 13 光谱共焦系统探测形式。(a) 透射率差异式^[103]；(b) CCD 差分式^[104]
Fig. 13 Detection methods of chromatic confocal system. (a) Transmissivity difference^[103]；(b) CCD difference^[104]

管,无需时间积分,测量速度得到极大提升,可达上百兆赫兹。类似地,如图 13(b)所示,Chen 等^[104]利用两个彩色 CCD 来获取与位置对应的差分信号,进而通过该信号代替波长实现位置标定与测量,同样获得了较高的探测效率。但是这两种方法仅能识别特定波段,而且波长分辨率较低,直接导致光谱共焦系统的位移测量分辨率难以提高。

其次,为降低光源光谱不一致和抖动影响,对光谱共焦系统反射光谱的归一化处理方式也得到了深入研究。部分研究者根据反射光谱信号的尖峰形状,直接利用激光共聚焦显微镜中常见的寻峰方法进行处理,从而获得聚焦波长,如 Molesini 等^[13]、Shi 等^[100]均未考虑反射光谱展宽对测量结果的影响。实际上,虽然共聚焦技术可以使大部分非聚焦波长的光线被阻拦,仍旧会有少量其他波长的光线进入探测器,导致反射光谱并非理想的尖峰,而是具有一定的光谱宽度,并且共轭小孔或光纤芯径越大,这种展宽效果越明显^[48, 100, 105-106]。在孔径固定的前提下,一般认为反射光谱的强度分布与光源直接相关,因此产生了两种典型的反射光谱归一化方案:直接利用光源光谱作为参考光谱^[97],如图 14(a)、14(b)所示;将移除色散物镜时的反射光谱作为参考光谱^[64],如图 14(c)、14(d)所示。

另一方面也有研究者提出待测表面反射特性将影响反射光谱的强度分布,提出了不同校正方案,如 Noura 等^[23]分析了样品材料、颜色、粗糙度等对测量的影响, Yu 等^[107]针对不同颜色的待测表面,对其聚焦波长进行补偿,以降低测量误差, Bai 等^[108]提出预先扫描的自参考方案来校正不同待测表面的反射能力差异,所得聚焦波长-位置响应曲线的普适性较强,如图 14(e)、14(f)所示。

实际上,无论是否进行了归一化处理,反射信号都需要采用寻峰算法来获取聚焦波长。Molesini 等^[13]采用抛物线拟合法寻峰; Shi 等^[100]根据其实际光谱信号的半高宽较窄而直接采用最大光强法; Tan 等^[109]采用 sinc^2 曲线拟合法进行寻峰; 王津楠^[99]、Ruprecht 等^[110]、Deng 等^[111]、苏庆庆等^[112]利用质心法进行寻峰,算法简单,运算效率高; Niu 等^[113]、Luo 等^[97]对比了质心法、高斯拟合法、阈值质心法、阈值高斯拟合法等典型寻峰算法,认为高斯拟合法的寻峰精度最高,质心法的效率最高; Chen 等^[98]、朱鸿^[114]、Lu 等^[115]提出修正差分拟合法及均值偏移法进行寻峰,与高斯拟合法精度相当,但寻峰效率得到大大提升。

总之,以上分别从宽谱光源、色散物镜、共轭小孔、光谱检测及处理等四个方面对光谱共焦技术的研究细

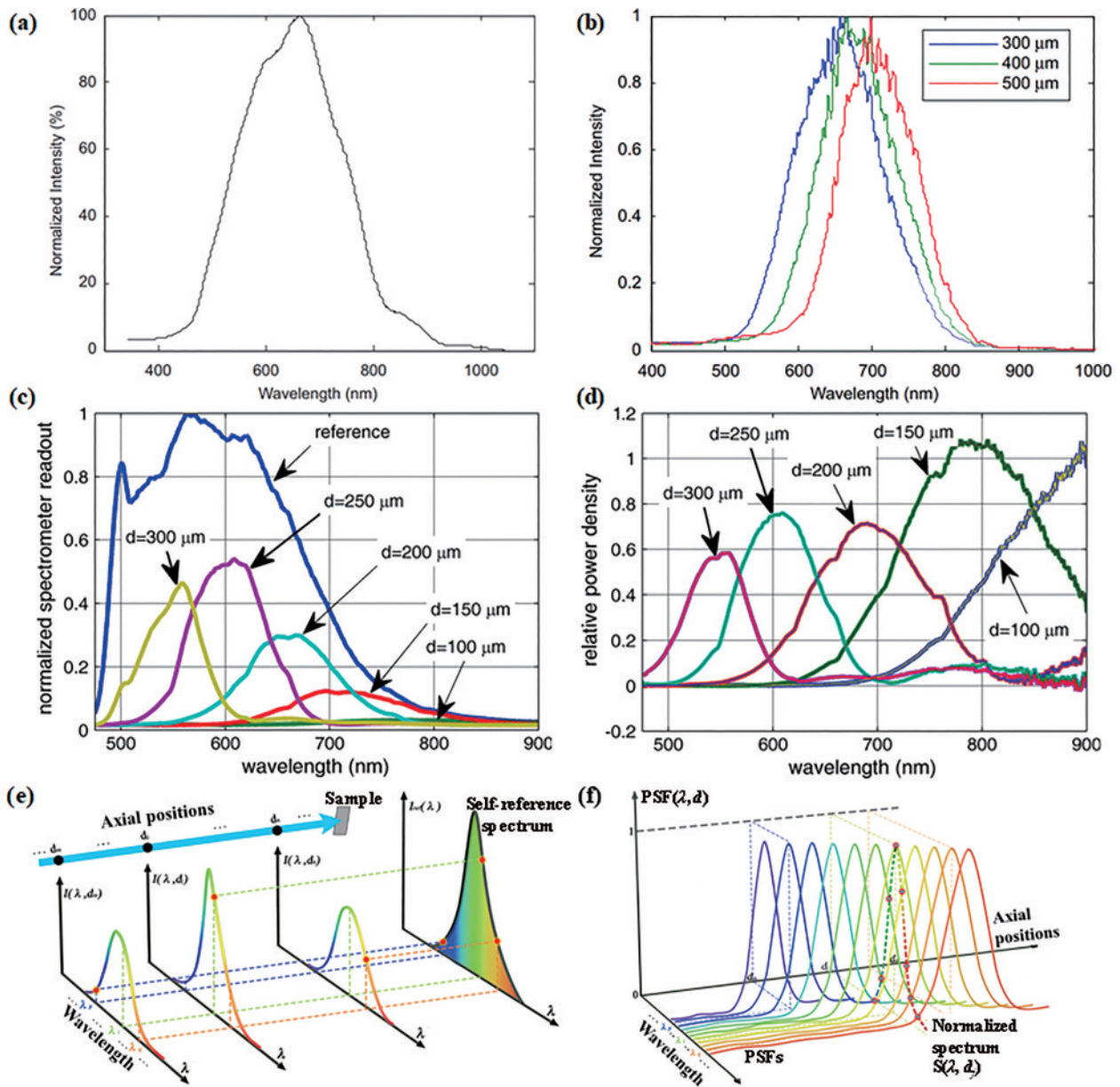


图 14 光谱共焦系统归一化策略。(a)、(b) 光源光谱^[97]；(c)、(d) 移除色散物镜的反射光谱^[64]；(e)、(f) 预扫描自参考光谱^[108]的归一化策略

Fig. 14 Normalization strategies of chromatic confocal system. Normalization strategies of (a), (b) light source spectrum^[97]；(c), (d) reflected spectrum after removing dispersion objective^[64]；(e), (f) pre-scanned self-reference spectrum^[108]

节进行了阐述,不同技术方案的有机融合形成了纷繁多样的光谱共焦系统,拓宽了光谱共焦技术的研究广度,其位移测量能力也不断提高。

4 总结与展望

先进制造技术的发展离不开高精度位移测量,光谱共焦技术是当前发展十分迅速的高精度位移测量技术之一,具有精度高、适应性强、可集成性强、实时性好等综合优势,在诸多领域得到关注和应用,尤其在表面轮廓检测以及工件厚度测量等方面取得了丰硕成果,如倾斜表面、曲面、在线尺寸状态、生物医学组织表面、透明薄膜厚度等。广泛的应用需求也进一步推动着光

谱共焦技术的创新和性能提升,包括宽谱光源、色散物镜、共轭小孔以及光谱检测和处理方法等几方面的关键技术细节,相关研究不断引入创新元素,如超连续光源、衍射物镜、小孔阵列等,使得光谱共焦技术的性能和规格得到不断发展,促进了光谱共焦技术的理论发展,提高了其工程价值。

但光谱共焦技术还存在一些仍然需要优化的技术问题。如宽谱光源的选择问题,多数光源的光强分布曲线不平坦,势必影响反射光谱中的聚焦波长和非聚焦波长的光强对比,进而导致系统性误差,即便采用参考光谱的方式对反射光谱进行归一化,但由于参考光路和测量光路不可能完全一致,则光线传输路径不同,

仍然会造成参考光谱不准确,甚至加剧反射光谱的共焦效果;衍射光学元件组成的色散物镜虽然有线性响应优势,但多级次的衍射光斑大大降低了光能利用率,并且信噪比较低;共轭小孔阵列虽然测量效率高,但是增加了结构复杂度,而且散射光会降低信噪比,测量精度有限;光源抖动、光纤及探测器的非线性响应等问题会导致实际的反射光谱不是单峰对称的理想曲线,而是拖尾型非对称光谱,使得寻峰算法的精度与运算效率常常难以兼顾。

针对这些技术问题,除了本文所论述的一些解决方案外,还需要相关研究者更深入地去探索,加强对光谱共焦仪器的系统性认识,以光学理论分析和光学仿真为基本手段,广泛借鉴和吸收其他光学测量技术的有益经验,全面优化光谱共焦系统的组成结构和光路,统筹考虑宽谱光源等硬件改造、光路结构设计、光谱归一化及聚焦波长提取算法等技术环节,提升光谱共焦位移测量的精度、效率以及稳定性,增强相关产业的国产化水平和市场竞争力。具体来说,光谱共焦技术的发展热点和趋势主要有以下几个方面:1)使用更平坦、更稳定的宽谱光源,如超连续光谱光源、全光谱光源、有机发光二极管(OLED)或微型发光二极管(Micro-LED)等,提高反射光谱的信噪比和稳定性;2)色散物镜设计更加多样化,通过非球面透镜、衍射元件甚至超表面等方式调节光线,提升成像质量以及色散响应曲线的线性度;3)完善共轭小孔的阵列式设计或替代方案,形成线型或面型光谱共焦成像,实现多点位同步测量,并通过微纳制造技术提高小孔密度,以增加单位面积的测量点位,提升测量效率和横向分辨能力;4)探索更为便捷可靠的光谱归一化处理办法,增强对待测表面的适应能力;5)明确光纤、透镜等光学元件非线性响应对反射光谱的影响规律,掌握反射光谱的形成机制,提升光谱探测设备的波长分辨率以及高速探测能力,利用神经网络等手段提高光谱处理和寻峰算法的可靠性和智能化;6)推动更为灵活便捷的光谱共焦模块化设计,提高集成安装效率;7)融合光谱共焦技术与其他加工或检测技术,以满足超大量程或者纳米级精度等特殊需求。

总之,随着我国先进制造业的快速发展以及光谱共焦相关研究的不断突破,我国的光谱共焦行业正迎来重要机遇,将朝着高精度、多规格、高效率、高集成性的方向,努力克服光谱共焦位移测量仪器的技术和应用难题,助力我国先进制造业的高质量发展。

参 考 文 献

- [1] Gao W, Kim S W, Bosse H, et al. Measurement technologies for precision positioning[J]. *CIRP Annals*, 2015, 64(2): 773-796.
- [2] 王燕山, 胡飞, 张梅菊, 等. 智能制造中的状态在线监测技术[J]. *测控技术*, 2018, 37(5): 3-8, 19.

- Wang Y S, Hu F, Zhang M J, et al. Status online monitoring technology for intelligent manufacturing[J]. *Measurement & Control Technology*, 2018, 37(5): 3-8, 19.
- [3] 杨光, 侯钰. 工业机器人的使用、技术升级与经济增长[J]. *中国工业经济*, 2020(10): 138-156.
- Yang G, Hou Y. The usage of industry robots, technology upgrade and economic growth[J]. *China Industrial Economics*, 2020(10): 138-156.
- [4] 杨宏兴, 付海金, 胡鹏程, 等. 超精密高速激光干涉位移测量技术与仪器[J]. *激光与光电子学进展*, 2022, 59(9): 0922018.
- Yang H X, Fu H J, Hu P C, et al. Ultra-precision and high-speed laser interferometric displacement measurement technology and instrument[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(9): 0922018.
- [5] 尚妍, 徐春广. 光学非接触廓形测量技术研究进展[J]. *光学技术*, 2008, 34(S1): 216-217, 220.
- Shang Y, Xu C G. Research advances on optical non-contact measurement of profiles[J]. *Optical Technique*, 2008, 34(S1): 216-217, 220.
- [6] Gao W, Haitjema H, Fang F Z, et al. On-machine and in-process surface metrology for precision manufacturing[J]. *CIRP Annals*, 2019, 68(2): 843-866.
- [7] 廖平, 任成, 杨小雨. 基于线阵 CCD 的高精度位移传感器前端设计[J]. *光电工程*, 2017, 44(5): 498-504, 561.
- Liao P, Ren C, Yang X Y. Front-end design of high precision displacement sensor based on linear array CCD[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2017, 44(5): 498-504, 561.
- [8] 陈泓波, 黄向东, 刘立丰, 等. 高精度调频式电容位移传感器[J]. *仪表技术与传感器*, 2011(12): 10-11, 26.
- Chen H B, Huang X D, Liu L F, et al. High-precision FM displacement capacitance sensor[J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2011(12): 10-11, 26.
- [9] 谈宜东, 徐欣, 张书练. 激光干涉精密测量与应用[J]. *中国激光*, 2021, 48(15): 1504001.
- Tan Y D, Xu X, Zhang S L. Precision measurement and applications of laser interferometry[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(15): 1504001.
- [10] 王梓, 石俊凯, 陈晓梅, 等. 光谱共焦测量技术综述[J]. *半导体光电*, 2022, 43(4): 752-759.
- Wang Z, Shi J K, Chen X M, et al. Chromatic confocal microscopy measurement technique: a review[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2022, 43(4): 752-759.
- [11] Winston P H, Marvin L. Minsky (1927-2016)[J]. *Nature*, 2016, 530(7590): 282.
- [12] Naora H. Schwarzschild-Villiger effect in microspectrophotometry[J]. *Science*, 1952, 115(2983): 248-249.
- [13] Molesini G, Pedrini G, Poggi P, et al. Focus-wavelength encoded optical profilometer[J]. *Optics Communications*, 1984, 49(4): 229-233.
- [14] 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 Y L, Yu Q, Shang W J, et al. Chromatic confocal

- measurement system and its experimental study based on inclined illumination[J]. *Chinese Optics*, 2022, 15(3): 514-524.
- [15] 王津楠, 陈凤东, 刘炳国, 等. 基于白光 LED 的光谱共焦位移传感器[J]. *中国测试*, 2017, 43(1): 69-73.
Wang J N, Chen F D, Liu B G, et al. White LED-based spectrum confocal displacement sensor[J]. *China Measurement & Test*, 2017, 43(1): 69-73.
- [16] Garzón R J, Meneses J, Plata A, et al. Chromatic confocal profilometer[J]. *Revista Colombiana De Fisica*, 2003, 35(2): 377-379.
- [17] 刘海霞. 基于色散共焦法的精密元件三维检测方法研究[D]. 天津: 天津工业大学, 2017.
Liu H X. Research on 3D testing method of precision components based on dispersive confocal method[D]. Tianjin: Tianjin Polytechnic University, 2017.
- [18] 刘伯奇. 基于彩色光谱共焦的轮廓及厚度精确测量[D]. 武汉: 武汉工程大学, 2018.
Liu B Q. Precise measurement of profile and thickness based on color spectral confocal[D]. Wuhan: Wuhan Institute of Technology, 2018.
- [19] Zhou R J, Shen D R, Huang P, et al. Chromatic confocal sensor-based sub-aperture scanning and stitching for the measurement of microstructured optical surfaces[J]. *Optics Express*, 2021, 29(21): 33512-33526.
- [20] Nadim E H, Hichem N, Nabil A, et al. Comparison of tactile and chromatic confocal measurements of aspherical lenses for form metrology[J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2014, 15(5): 821-829.
- [21] Rishikesan V, Samuel G L. Evaluation of surface profile parameters of a machined surface using confocal displacement sensor[J]. *Procedia Materials Science*, 2014, 5: 1385-1391.
- [22] Yeon Taek O H. Technology development to measure vertical height and high aspect ratio using chromatic confocal[J]. *International Journal of Engineering and Technology*, 2016, 8(5): 2355-2365.
- [23] Nouira H, El-Hayek N, Yuan X, et al. Characterization of the main error sources of chromatic confocal probes for dimensional measurement[J]. *Measurement Science and Technology*, 2014, 25(4): 044011.
- [24] Bai J, Wang Y Z, Wang X H, et al. Three-probe error separation with chromatic confocal sensors for roundness measurement[J]. *Nanomanufacturing and Metrology*, 2021, 4(4): 247-255.
- [25] 蓝河, 雷大江, 钱林弘, 等. 基于光谱共焦位移传感器的非接触式回转误差测量系统[J]. *制造技术与机床*, 2017(3): 141-145.
Lan H, Lei D J, Qian L H, et al. A non contact system for measurement of rotating error based on confocal chromatic displacement sensor[J]. *Manufacturing Technology & Machine Tool*, 2017(3): 141-145.
- [26] Zou X C, Zhao X S, Li G, et al. Non-contact on-machine measurement using a chromatic confocal probe for an ultra-precision turning machine[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, 90(5): 2163-2172.
- [27] Wang S, Zhao Q L. Development of an on-machine measurement system with chromatic confocal probe for measuring the profile error of off-axis biconical free-form optics in ultra-precision grinding[J]. *Measurement*, 2022, 202: 111825.
- [28] Ye L, Qian J, Haitjema H, et al. On-machine chromatic confocal measurement for micro-EDM drilling and milling[J]. *Precision Engineering*, 2022, 76: 110-123.
- [29] Keferstein C P, Honegger D, Thurnherr H, et al. Process monitoring in non-circular grinding with optical sensor[J]. *CIRP Annals*, 2008, 57(1): 533-536.
- [30] Fu S W, Kor W S, Cheng F, et al. *In-situ* measurement of surface roughness using chromatic confocal sensor[J]. *Procedia CIRP*, 2020, 94: 780-784.
- [31] Zakrzewski A, Koruba P, Ćwikła M, et al. The determination of the measurement beam source in a chromatic confocal displacement sensor integrated with an optical laser head[J]. *Optics & Laser Technology*, 2022, 153: 108268.
- [32] Bi C, Li D, Fang J G, et al. Application of chromatic confocal displacement sensor in measurement of tip clearance[J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, 10155: 101551S.
- [33] Ueda S I, Michihata M, Hayashi T, et al. Wide-range axial position measurement for jumping behavior of optically trapped microsphere near surface using chromatic confocal sensor[J]. *International Journal of Optomechanics*, 2015, 9(2): 131-140.
- [34] Agoyan M, Fourneau G, Cheymol G, et al. Toward confocal chromatic sensing in nuclear reactors: *in situ* optical refractive index measurements of bulk glass[J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2022, 69(4): 722-730.
- [35] Dai W Z, Liu Y P, Su F, et al. Chromatic confocal imaging based mechanical test platform for micro porous membrane[C]//2016 13th IEEE International Conference on Solid-State and Integrated Circuit Technology, October 25-28, 2016, Hangzhou, China. New York: IEEE Press, 2016: 266-268.
- [36] Berkovic G, Zilberman S, Shafir E, et al. Vibrometry using a chromatic confocal sensor[J]. *AIP Conference Proceedings*, 2014, 1600(1): 439-444.
- [37] Yang W J, Liu X J, Lu W L, et al. Influence of probe dynamic characteristics on the scanning speed for white light interference based AFM[J]. *Precision Engineering*, 2018, 51: 348-352.
- [38] Ang K T, Fang Z P, Tay A. Note: development of high speed confocal 3D profilometer[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2014, 85(11): 116103.
- [39] Tiziani H J, Achi R, Krämer R N. Chromatic confocal microscopy with microlenses[J]. *Journal of Modern Optics*, 1996, 43(1): 155-163.
- [40] Tiziani H J, Uhde H M. Three-dimensional image sensing by chromatic confocal microscopy[J]. *Applied Optics*, 1994, 33(10): 1838-1843.
- [41] Chun B S, Kim K, Gweon D. Three-dimensional surface profile measurement using a beam scanning chromatic

- confocal microscope[J]. Review of Scientific Instruments, 2009, 80(7): 073706.
- [42] Cha S, Lin P C, Zhu L, et al. Nontranslational three-dimensional profilometry by chromatic confocal microscopy with dynamically configurable micromirror scanning[J]. Applied Optics, 2000, 39(16): 2605-2613.
- [43] Wertjanz D, Kern T, Csencsics E, et al. Compact scanning confocal chromatic sensor enabling precision 3-D measurements[J]. Applied Optics, 2021, 60(25): 7511-7517.
- [44] Yu Q, Zhang Y L, Zhang Y, et al. A novel chromatic confocal one-shot 3D measurement system based on DMD[J]. Measurement, 2021, 186: 110140.
- [45] Cui Q, Liang R G. Chromatic confocal microscopy using liquid crystal display panels[J]. Applied Optics, 2019, 58(8): 2085-2090.
- [46] Johnson G R, Duque Q D, Gharbi T, et al. Measurement of optical thickness in human corneas by mean of a chromatic confocal probe[J]. Bistua: Revista De La Facultad De Ciencias Básicas, 2008, 6(2): 58-67.
- [47] Olsovsky C, Shelton R, Carrasco-Zevallos O, et al. Chromatic confocal microscopy for multi-depth imaging of epithelial tissue[J]. Biomedical Optics Express, 2013, 4(5): 732-740.
- [48] Olsovsky C A, Shelton R L, Saldua M A, et al. Multidepth imaging by chromatic dispersion confocal microscopy[J]. Proceedings of SPIE, 2012, 8214: 82140L.
- [49] Zint M, Stock K, Graser R, et al. Development and verification of a novel device for dental intra-oral 3D scanning using chromatic confocal technology[J]. Proceedings of SPIE, 2015, 9313: 93130U.
- [50] 刘雪原. 基于光谱共焦传感器的石英摆片几何参数测量系统研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2015.
Liu X Y. Research on the geometrical parameters measurement of quartz pendulous reed with chromatic confocal sensor[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2015.
- [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.
- [52] 顾倩倩, 王冰, 陈雪, 等. 一种基于双面白光共焦光谱的 ICF 靶零件平行度测量方法[J]. 计量与测试技术, 2019, 46(2): 51-53.
Gu Q Q, Wang B, Chen X, et al. A method for measuring the parallelism of ICF target component based on double-sided white light confocal spectrum[J]. Metrology & Measurement Technique, 2019, 46(2): 51-53.
- [53] 孙仕凯. 基于像散原理的薄膜厚度测量系统设计与实现[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2017.
Sun S K. Design and realization of film thickness measurement system based on astigmatism method[D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2017.
- [54] 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.
- [55] 王佳怡, 刘涛, 唐晓锋, 等. 光纤式色散共焦三维测量系统及算法比较研究[J]. 光子学报, 2021, 50(11): 1112001.
Wang J Y, Liu T, Tang X F, et al. Fiber-coupled chromatic confocal 3D measurement system and comparative study of spectral data processing algorithms[J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(11): 1112001.
- [56] 张宁, 徐熙平, 吴嘉辉, 等. 基于复色共焦的透明材料厚度测量系统研究[J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2013, 36(5): 1-6.
Zhang N, Xu X P, Wu J H, et al. Research on the measurement system of transparent material's thickness based on polychromatic confocal technology[J]. Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2013, 36(5): 1-6.
- [57] 周勇. 基于色差共焦原理的透镜中心厚度测量设备的研制[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2015.
Zhou Y. The development of lens central thickness measurement based on confocal principle[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2015.
- [58] Chen Y C, Dong S P, Wang C C, et al. Using chromatic confocal apparatus for *in situ* rolling thickness measurement in hot embossing process[J]. Proceedings of SPIE, 2010, 7767: 77670P.
- [59] Niese S, Quodbach J. Application of a chromatic confocal measurement system as new approach for in-line wet film thickness determination in continuous oral film manufacturing processes[J]. International Journal of Pharmaceutics, 2018, 551(1/2): 203-211.
- [60] Bai J, Li J W, Wang X H, et al. A new method to measure spectral reflectance and film thickness using a modified chromatic confocal sensor[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2022, 154: 107019.
- [61] Li S B, Song B F, Peterson T, et al. MicroLED chromatic confocal microscope[J]. Optics Letters, 2021, 46(11): 2722-2725.
- [62] Bai J, Li X H, Wang X H, et al. Chromatic confocal displacement sensor with optimized dispersion probe and modified centroid peak extraction algorithm[J]. Sensors, 2019, 19(16): 3592.
- [63] Shi K B, Li P, Yin S Z, et al. Chromatic confocal microscopy using supercontinuum light[J]. Optics Express, 2004, 12(10): 2096-2101.
- [64] Minoni U, Manili G, Bettoni S, et al. Chromatic confocal setup for displacement measurement using a supercontinuum light source[J]. Optics & Laser Technology, 2013, 49: 91-94.
- [65] Liu H P, Wang B H, Wang R, et al. Photopolymer-based coaxial holographic lens for spectral confocal displacement and morphology measurement[J]. Optics Letters, 2019, 44(14): 3554-3557.

- [66] Johnson G R, Meneses J, Arturo P, et al. Axial resolution of a chromatic dispersion confocal microscopy [J]. *Proceedings of SPIE*, 2004, 5622: 766-771.
- [67] Matsukuma H, Sato R, Shimizu Y, et al. Measurement range expansion of chromatic confocal probe with supercontinuum light source[J]. *International Journal of Automation Technology*, 2021, 15(4): 529-536.
- [68] Chen X G, Nakamura T, Shimizu Y, et al. A chromatic confocal probe with a mode-locked femtosecond laser source[J]. *Optics & Laser Technology*, 2018, 103: 359-366.
- [69] 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.
- [70] 余卿, 张学典, 崔长彩. 色散聚焦分离式彩色共聚焦测量系统研究[J]. *仪器仪表学报*, 2018, 39(3): 100-107.
Yu Q, Zhang X D, Cui C C. Study on chromatic confocal measurement system with dispersion and focusing separation technique[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2018, 39(3): 100-107.
- [71] 李煌. 彩色共聚焦测量系统光学设计与实验研究[D]. 泉州: 华侨大学, 2017.
Li H. Optical design and experimental study of chromatic confocal microscopy[D]. Quanzhou: Huaqiao University, 2017.
- [72] Li Y L, Fan J P, Wang J, et al. Design research of chromatic lens in chromatic confocal point sensors[J]. *Proceedings of SPIE*, 2018, 10827: 108270D.
- [73] 牛春晖, 李晓英, 郎晓萍. 光谱共焦透镜组设计及性能优化[J]. *北京信息科技大学学报(自然科学版)*, 2013, 28(2): 42-45.
Niu C H, Li X Y, Lang X P. Design and performance optimization of chromatic confocal lens[J]. *Journal of Beijing Information Science & Technology University*, 2013, 28(2): 42-45.
- [74] 刘乾, 王洋, 杨维川, 等. 线性色散设计的光谱共焦测量技术[J]. *强激光与粒子束*, 2014, 26(5): 051010.
Liu Q, Wang Y, Yang W C, et al. Chromatic confocal microscope with linear dispersive objective[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2014, 26(5): 051010.
- [75] 刘乾, 杨维川, 袁道成, 等. 光谱共焦显微镜的线性色散物镜设计[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(10): 2473-2479.
Liu Q, Yang W C, Yuan D C, et al. Design of linear dispersive objective for chromatic confocal microscope[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(10): 2473-2479.
- [76] 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 T B, Guo W P, Xi Y H, et al. Design and performance evaluation of chromatic confocal displacement sensor with high measuring range[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2022, 49(18): 1804002.
- [77] Wang A S, Xie B, Liu Z W. Design of measurement system of 3D surface profile based on chromatic confocal technology[J]. *Proceedings of SPIE*, 2018, 10616: 1061618.
- [78] 杨锐, 云宇, 解滨, 等. 光谱共焦三维形貌仪用超大色散线性物镜组设计[J]. *强激光与粒子束*, 2018, 30(5): 051002.
Yang R, Yun Y, Xie B, et al. Design of dispersive objective lens of large linear chromatic confocal 3D surface profiler[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2018, 30(5): 051002.
- [79] Pruss C, Ruprecht A K, Körner K, et al. Diffractive elements for chromatic confocal sensors[EB/OL]. (2022-05-08)[2022-09-28]. https://www.dgao-proceedings.de/download/106/106_a1.pdf.
- [80] Dobson S L, Sun P C, Fainman Y. Diffractive lenses for chromatic confocal imaging[J]. *Applied Optics*, 1997, 36(20): 4744-4748.
- [81] Garzón J, Duque D, Alean A, et al. Diffractive elements performance in chromatic confocal microscopy[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2011, 274(1): 012069.
- [82] Rayer M, Mansfield D. Chromatic confocal microscopy using staircase diffractive surface[J]. *Applied Optics*, 2014, 53(23): 5123-5130.
- [83] Liu T, Wang J Y, Liu Q, et al. Chromatic confocal measurement method using a phase Fresnel zone plate[J]. *Optics Express*, 2022, 30(2): 2390-2401.
- [84] Hillenbrand M, Lorenz L, Kleindienst R, et al. Spectrally multiplexed chromatic confocal multipoint sensing[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(22): 4694-4697.
- [85] Hillenbrand M, Mitschunas B, Wenzel C, et al. Hybrid hyperchromats for chromatic confocal sensor systems[J]. *Advanced Optical Technologies*, 2012, 1(3): 187-194.
- [86] 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.
- [87] Fleischle D, Lyda W, Schaal F, et al. Chromatic confocal sensor for in-process measurement during lathing [EB/OL]. (2022-05-06)[2022-09-28]. http://www.ismtii2011.org/article/xml/sub/file_download.kin?main_no=120&mode=pdf.
- [88] Ruprecht A K, Pruss C, Tiziani H J, et al. Confocal micro-optical distance sensor: principle and design[J]. *Proceedings of SPIE*, 2005, 5856: 128-135.
- [89] 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.
- [90] Luecke P, Last A, Mohr J, et al. Confocal micro-optical distance sensor for precision metrology[J]. *Proceedings of SPIE*, 2004, 5459: 180-184.
- [91] 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.
- [92] 武芑樾. 光谱共焦位移传感器设计技术研究[D]. 绵阳: 中国工程物理研究院, 2012.
Wu P Y. Research on design technology of spectral confocal displacement sensor[D]. Mianyang: China Academy of Engineering Physics, 2012.
- [93] Hwang J, Kim S, Heo J, et al. Frequency- and spectrally-encoded confocal microscopy[J]. *Optics*

- Express, 2015, 23(5): 5809-5821.
- [94] Hillenbrand M, Weiss R, Endrödy C, et al. Chromatic confocal matrix sensor with actuated pinhole arrays[J]. Applied Optics, 2015, 54(15): 4927-4936.
- [95] Chanbai S, Wiora G, Weber M, et al. A novel confocal line scanning sensor[J]. Proceedings of SPIE, 2009, 7378: 737822.
- [96] Hu H, Mei S, Fan L M, et al. A line-scanning chromatic confocal sensor for three-dimensional profile measurement on highly reflective materials[J]. Review of Scientific Instruments, 2021, 92(5): 053707.
- [97] Luo D, Kuang C F, Liu X. Fiber-based chromatic confocal microscope with Gaussian fitting method[J]. Optics & Laser Technology, 2012, 44(4): 788-793.
- [98] Chen C, Yang W J, Wang J, et al. Accurate and efficient height extraction in chromatic confocal microscopy using corrected fitting of the differential signal[J]. Precision Engineering, 2019, 56: 447-454.
- [99] 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.
- [100] Shi K B, Li P, Yin S Z, et al. Surface profile measurement using chromatic confocal microscopy[J]. Proceedings of SPIE, 2004, 5606: 124-131.
- [101] Ruprecht A K, Koerner K, Wiesendanger T F, et al. Chromatic confocal detection for high-speed microtopography measurements[J]. Proceedings of SPIE, 2004: 53-60.
- [102] Taphanel M, Hovestreydt B, Beyerer J. Speed-up chromatic sensors by optimized optical filters[J]. Proceedings of SPIE, 2013, 8788: 87880S.
- [103] 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.
- [104] 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.
- [105] Vaishakh M. Optical sectioning in reciprocal fiber-optic based chromatic confocal microscope[J]. Optik, 2012, 123(16): 1450-1452.
- [106] Rauf N M, Daniel C. A wave-optical model for chromatic confocal sensing using multimode fibre incoherent illumination[J]. Journal of Optics, 2021, 23(11): 115608.
- [107] Yu Q, Zhang K, Zhou R L, et al. Calibration of a chromatic confocal microscope for measuring a colored specimen[J]. IEEE Photonics Journal, 2018, 10(6): 6901109.
- [108] Bai J, Li X H, Wang X H, et al. Self-reference dispersion correction for chromatic confocal displacement measurement[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2021, 140: 106540.
- [109] Tan J B, Liu C G, Liu J, et al. Sinc2 fitting for height extraction in confocal scanning[J]. Measurement Science and Technology, 2016, 27(2): 25006.
- [110] Ruprecht A K, Wiesendanger T F, Tiziani H J. Signal evaluation for high-speed confocal measurements[J]. Applied Optics, 2002, 41(35): 7410-7415.
- [111] Deng W Y, Niu C H, Lü N G, et al. Research on chromatic confocal technology for displacement measurement [J]. Proceedings of SPIE, 2010, 7997: 79971Z.
- [112] 苏庆庆, 马游春, 姜德, 等. 一种基于质心法寻峰的光功率补偿算法[J]. 光通信技术, 2017, 41(9): 49-52.
Su Q Q, Ma Y C, Jiang D, et al. Optical power compensation algorithm based on centroid method for seeking peak[J]. Optical Communication Technology, 2017, 41(9): 49-52.
- [113] Niu C H, Lü Y. Chromatic confocal displacement measurement based on correlation algorithm[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 446/447: 909-914.
- [114] 朱鸿. 光谱共焦位移传感器信号处理与校准研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.
Zhu H. Research on signal processing and calibration of spectral confocal displacement sensor[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2019.
- [115] Lu W L, Chen C, Zhu H, et al. Fast and accurate mean-shift vector based wavelength extraction for chromatic confocal microscopy[J]. Measurement Science and Technology, 2019, 30(11): 115104.