

文章编号 1004-924X(2026)19-3027-29

涡旋光干涉精密位移测量技术：进展、挑战与展望

任凯利^{1,2}, 杜 艺¹, 段玉婷¹, 徐 咏¹, 李思奇², 刘继红^{1,2*}, 王国玺^{2*}

(1. 西安邮电大学 电子工程学院, 陕西 西安 710121;

2. 中国科学院 西安光学精密机械研究所 超快光科学与技术全国重点实验室,
陕西 西安 710119)

摘要:超精密光学位移测量是纳米基础研究、超精密加工与半导体装备制造的核心支撑技术。本文系统综述了共轭涡旋光干涉位移测量技术的研究进展,重点剖析基于轨道角动量结构化干涉光场的传感机制,总结该技术在提升探测灵敏度、拓展无歧义测量量程及实现紧凑光路集成方面的固有优势,并归纳当前工程应用中的关键技术瓶颈。文中分类梳理了六大主流技术路线:高精度图像与相位解调、光场结构优化以增强角向分辨、高速动态微振动测量、跨周期无歧义扩程、多自由度参量同步检测及非平面表面分布式形变重建。通过光学超表面与光纤光栅微纳调控器件、人工智能解调算法、双波长等效扩程及多源误差全域补偿等技术,可协同优化系统测量精度、动态响应带宽与环境抗扰动性能,从而推动共轭涡旋光干涉在纳米级定位、精密制造、曲面形变检测及高端装备在线状态监测等场景中的应用,为新一代超精密光学计量体系的构建提供理论依据与技术参考。

关键词:精密测量;光学干涉;涡旋光;轨道角动量;位移测量

中图分类号:O436.1;TH711 **文献标识码:**A

doi:10.3724/OPE.20263419.3027 **CSTR:**32169.14.OPE.20263419.3027

Precision displacement measurement based on vortex beam interferometry: progress, challenges, and perspectives

REN Kaili^{1,2}, DU Yi¹, DUAN Yuting¹, XU Yong¹, LI Siqi², LIU Jihong^{1,2*}, WANG Guoxi^{2*}

(1. School of Electronic Engineering, Xi'an University of Posts and Telecommunications,
Xi'an 710121, China;

2. State Key Laboratory of Ultrafast Optical Science and Technology, Xi'an Institute of Optics and
Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China)

* Corresponding author, E-mail: ong1705@xupt.edu.cn; wangguoxi@opt.ac.cn

Abstract: Ultraprecise optical displacement measurement is a key enabling technology for nanoscience, ultra-precision machining, and semiconductor equipment manufacturing. In this review, research advances in conjugate vortex interferometric displacement measurement are systematically examined. With a focus on the sensing paradigm based on structured orbital angular momentum (OAM) interference fields, the intrinsic advantages

收稿日期:2026-07-15;修订日期:2026-09-03.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 62305268, No. 62375282);陕西省重点研发计划资助项目(No. 2024QY2-GJHX-39, No. 2024RS-CXTD-48, No. 2025CY-JJQ-32);陕西省自然科学基金基础研究计划资助项目(No. 2025JC-JCQN-078)

es of this technology in enhancing detection sensitivity, extending the unambiguous measurement range, and enabling compact optical-path integration are summarized, and the principal technical bottlenecks limiting practical implementation are identified. Six major technical approaches are classified and reviewed: high-precision image and phase demodulation, optical-field optimization for enhanced angular resolution, high-speed dynamic microvibration measurement, cross-cycle extension of the unambiguous measurement range, simultaneous measurement of multiple degrees of freedom, and distributed deformation reconstruction of nonplanar surfaces. Synergistic improvements in measurement accuracy, dynamic response bandwidth, and environmental robustness may be achieved through the integration of optical metasurfaces, fiber-grating-based micro- and nanoscale modulation devices, artificial-intelligence-assisted demodulation algorithms, dual-wavelength equivalent-range extension, and comprehensive compensation for multiple error sources across the measurement domain. These developments are expected to advance the application of conjugate vortex interferometry to nanoscale positioning, precision manufacturing, curved-surface deformation measurement, and online condition monitoring of high-end equipment. This review provides a theoretical foundation and technical guidance for the development of next-generation ultraprecise optical metrology systems.

Key words: precision measurement; optical interference; vortex beams; orbital angular momentum; displacement measurement

1 引 言

光学纳米位移测量作为非接触式超精密传感的核心技术方向^[1-2],是支撑高端制造升级^[3]、精密仪器自主可控^[4-5]与前沿科学突破^[6-7]的共性计量基础,在先进制造^[8]、精密工程^[9-10]、超分辨显微^[11]及半导体制造^[12]等领域发挥着关键作用。作为超精密测量体系的重要组成部分,其技术水平直接体现国家精密制造与计量体系的核心竞争力,在超精密运动平台控制^[13]、空间光学载荷监测^[14-15]、微纳器件性能表征^[16-17]与生物单分子操控^[18-19]等关键场景中具有不可替代的应用价值。当前,测量对象正朝着小型化、运动高速化、运动形式多自由度化方向发展,位移传感技术也从单一高分辨测量向综合性能全面提升转型:既需实现纳米乃至皮米量级的分辨率,还需同时兼顾高精度、大量程、强抗干扰能力与实时解调性能^[20-21]。面对行业发展的共性需求,国家持续强化精密测量领域战略布局,《计量发展规划(2021—2035年)》^[22]明确将先进制造领域精密测量列为核心攻关方向,提出研发高精度、集成化、智能化新型传感技术,着力破解制造业计量准确度不足、参数量程覆盖有限、动态检测效率偏低及自主决策能力欠缺的行业痛点,推动高端检测装备自主可控,夯实制造强国建设的计量根基。

当前,微纳制造与前沿科研领域的技术演进正不断推高位移测量的性能极限:在半导体制造领域,制程向 3 nm 及以下持续推进^[23-24],光刻工作台步进定位^[25]与 3D 异质封装键合对准^[26-27]需达到亚纳米至百纳米级精度,同时需兼顾晶圆级大测量行程与量产线高速在线检测需求^[28-29];在超精密光学加工领域,加工平台需在数百毫米行程内实现亚纳米级长期稳定定位,以保障自由曲面元件的纳米级加工面形精度^[30];在空间前沿科学领域,引力波探测^[31-33]、高分辨率遥感载荷微形变监测等场景^[34]更是将位移分辨能力需求推向皮米量级。然而,传统测量技术的原理性局限日益凸显,难以匹配上述多维度的极致需求:激光干涉仪依靠相位细分实现高分辨率,但存在量程与精度相互制约^[35-37],易受环境温度变与气流扰动^[38-39],系统体积庞大难以集成^[40]等短板;电容、电感式位移传感器虽结构紧凑^[41-42],但测量范围有限^[43-44],且抗电磁干扰能力较弱^[45-46]。总体而言,传统方法无法同时满足超高分辨、大量程、强抗扰性与高集成度的要求,亟须探索新的测量原理以突破其性能瓶颈。

轨道角动量(Orbital Angular Momentum, OAM)涡旋光束的兴起为结构化光场调控开辟了全新的物理维度,也为突破位移测量性能极限提供了新的技术路径。涡旋光束具有螺旋相位分布、中心相位奇点与拓扑荷数可调的独特光场

属性,其与平面波、球面波等常规光场的干涉机理已得到系统揭示^[47-50]。共轭涡旋光干涉可形成花瓣状特征光强图样,被测位移信息能够映射为干涉图样的旋转角度变化,这种基于角度编码的解调机制突破了传统相位干涉的周期限制,为兼顾大量程与皮米级超高精度提供了全新实现方案。早期研究通过将共轭涡旋光束引入 Michelson 干涉结构,实现了皮米量级位移的可视化检测,初步验证了该技术路线的原理可行性^[51]。在此基础上,通过光楔将线性位移映射为花瓣状干涉图样的旋转量,明确了位移量与图样旋转角的定量对应关系,进一步证实了涡旋光干涉用于高灵敏位移测量的应用潜力^[52]。随着研究的深入,针对分立光路结构复杂、集成度低的问题,研究人员提出紧凑型涡旋光干涉仪方案,将被测固体或液体表面直接作为干涉结构的组成部分,为涡旋光位移测量系统的小型化应用提供了新的方案^[53]。与此同时,模式转换器^[54]、空间光调制器^[55-56]、超构表面^[57-59]等光场调控技术兴起,为超精密位移测量系统的研究提供支撑。目前,有关研究已从原理验证转向多维度性能优化与场景

拓展,涵盖分辨率提升、大量程拓展、动态测量、多参数解耦、复杂曲面检测与系统集成化等方向。性能指标层面,通过多环干涉放大^[60]、光束细分^[61]等机制提升角向响应灵敏度,可实现纳米至皮米级位移分辨;借助虚拟指针跨周期计数^[62]、合成波长拓展^[63]等方案,能将测量范围从纳米尺度延伸至宏观尺度。应用场景适配方面,结合高速光电探测^[64]与轻量化相位解调算法^[65],可满足高速在线测量需求;基于特殊结构光束能实现位移、速度、运动方向等多参数同步表征^[66],并将检测对象从平面刚体位移拓展至非均匀形变^[67]、三维形貌^[68]与自由曲面^[69]微位移测量。系统形态层面,通过紧凑型结构^[70]、光纤探针^[71]与超构表面集成设计^[72],推动测量系统向小型化、片上化与远端检测方向演进。此外,自校准^[73]等优化算法的发展,也进一步推动系统向紧凑化、智能化、工程化方向持续升级。

本文聚焦共轭涡旋光干涉精密位移测量研究,围绕其典型实现方法、关键科学问题、现存技术挑战与未来发展趋势展开系统梳理和评述,如图 1 所示。首先,针对模式转换器、螺旋相位板、

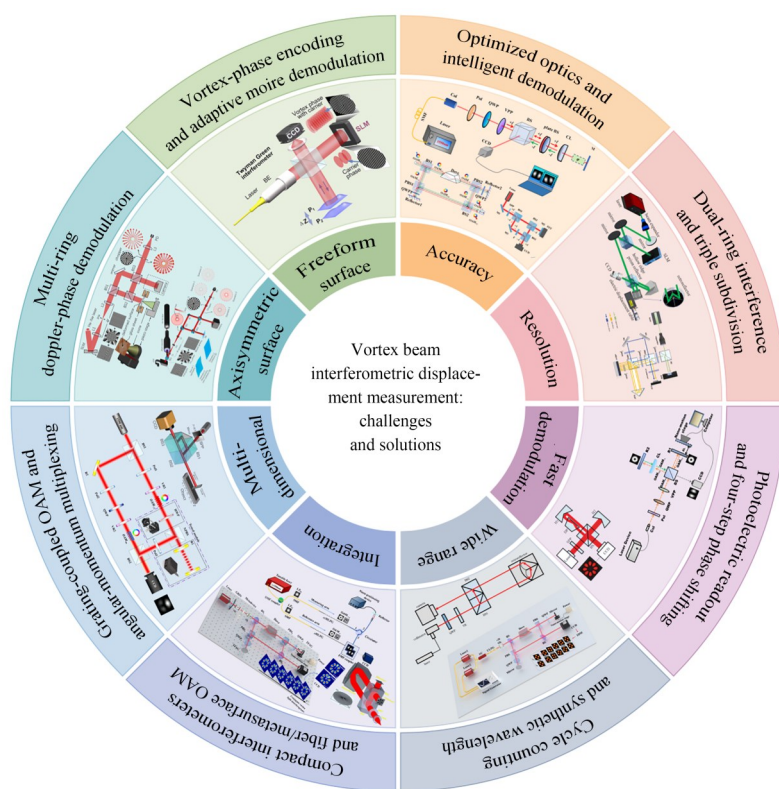


图 1 涡旋光位移测量中的关键挑战与方法

Fig. 1 Key challenges and methods in vortex beam displacement measurement

空间光调制器、超构表面等典型OAM光场调控器件,分析各类器件生成与调制共轭涡旋光场的技术方案。这类调控方案基于不同的光场调制机理,各具技术特点与适用场景,为共轭涡旋光干涉测量系统的构建提供核心器件支撑。其次,面向平面位移测量的核心应用需求,从分辨率提升、动态响应优化、量程扩展、多自由度测量及系统小型化等维度,系统梳理共轭涡旋光干涉位移测量的各类典型技术路线。这类技术路线依托涡旋光干涉的相位敏感特性,将位移信息编码至干涉光场的相位与强度分布中,各自具备差异化的性能特征与适用范围。然后,重点阐述共轭涡旋光干涉技术在非平面形变、动态三维形貌及自由曲面微位移测量中的应用研究。OAM涡旋光场具备多维光场信息携带能力,可对复杂面形的空间位移信息进行高分辨表征。通过结构化光场与干涉测量机理的结合,能够突破传统平面位移测量的场景限制,实现对复杂位移场的高精度重构,是涡旋光精密测量领域的重要拓展方向。最后,对共轭涡旋光干涉精密位移测量技术当前面临的核心挑战进行总结,并从测量精度提升、动态性能优化、系统集成化与智能化解调等方面展望未来发展方向,如结合深度学习、物理约束算法与多源信息融合等新兴技术进一步赋能测量系统的性能升级。通过系统梳理该技术领域的发展现状与发展趋势,对比不同技术路线的优势与局限性,以期光学超精密位移测量领域的

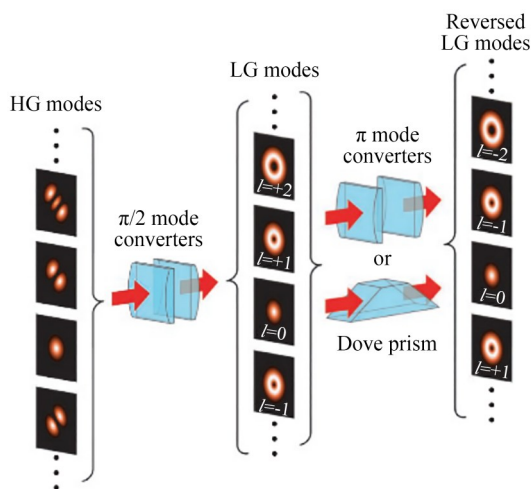
理论研究、系统设计与工程应用提供一定的参考。

2 基于共轭涡旋光干涉的位移测量

2.1 OAM光束调制器

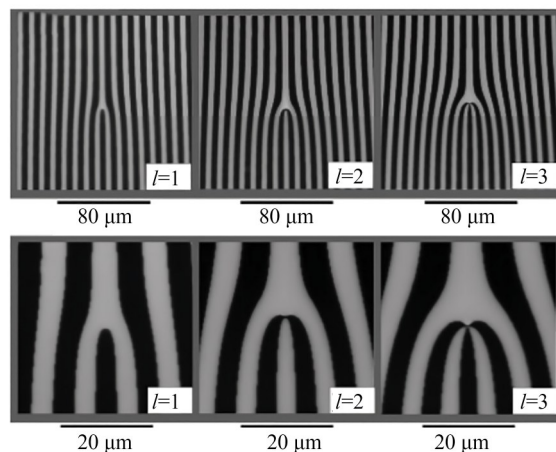
OAM调制器是涡旋光干涉测量系统的核心功能器件,其通过对入射光场施加螺旋相位调控,可生成携带轨道角动量的涡旋光束。理想涡旋光束的螺旋相位波前可表示为 $\exp(i l \theta)$,其中 l 为拓扑荷数, θ 为方位角,光束绕光轴完成一周旋转对应的总相位累积量为 $2\pi l$ 。共轭涡旋光干涉技术依托拓扑荷为 $+l$ 与 $-l$ 的共轭光束对实现精密测量,因此OAM调制器不仅需具备精准的螺旋相位调制能力,还需满足高模式纯度、稳定的拓扑荷阶数、优异的波前质量与低附加相位噪声等关键性能指标。现阶段,涡旋光束的主流生成与调制技术主要包括模式转换法、螺旋相位板调制、计算全息技术、空间光调制器以及超构表面调控等方案。

早期涡旋光束多采用柱透镜模式转换方案生成。Beijersbergen等^[74]构建双柱透镜像散模式转换器,利用正交方向Gouy相位差实现厄米-高斯(Hermite-Gauss, HG)模式向拉盖尔-高斯(Laguerre-Gauss, LG)模式的转换, $\pi/2$ 模式转换器的转换原理如图2(a)所示^[75]。该方法依赖高阶HG入射模式,且需满足严格的透镜间距与模式匹配条件^[76],光路结构复杂,拓扑荷动态切



(a) 利用模式转换产生OAM光束^[75]

(a) Generation of OAM beams using mode conversion^[75]



(b) 利用计算全息产生OAM光束^[80]

(b) Generation of OAM beams using computer-generated holography^[80]

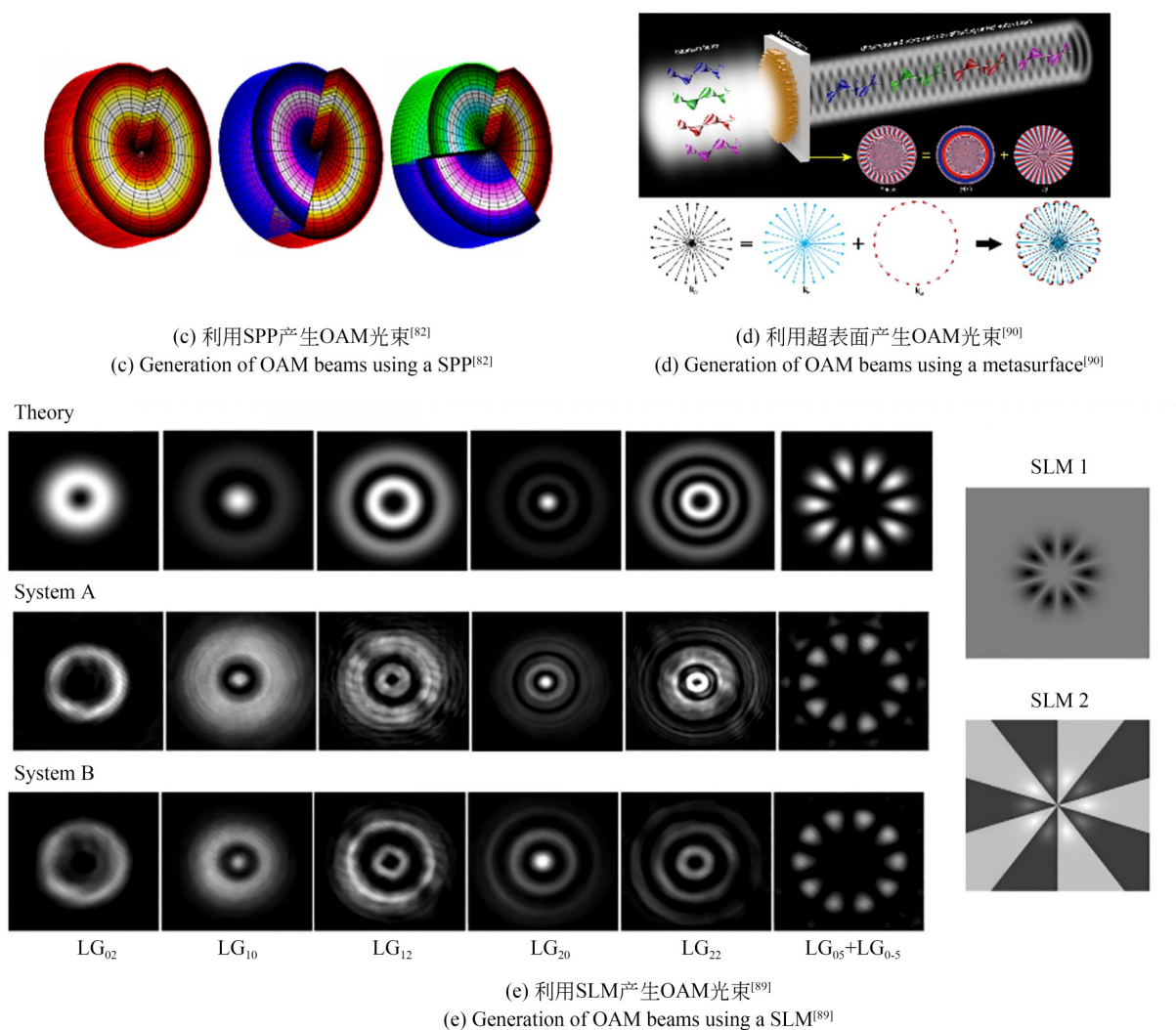


图 2 OAM 光束的调制方法

Fig. 2 Modulation methods for generating OAM beams

换能力有限。计算全息法为涡旋光生成提供了更灵活的波前调控途径^[77-81]。Heckenberg 等^[77]率先基于计算全息图生成 OAM 光束,该研究将目标涡旋光场与参考平面波干涉,依据干涉光强分布设计全息结构;二者干涉形成中心带分叉位错的叉形光栅(图 2(b)^[80]),条纹错位数对应拓扑荷数,分叉方向反映拓扑荷符号。该方法可灵活生成 LG、贝塞尔-高斯(Bessel-Gauss, BG)等复杂 OAM 模式,但入射能量易分散至非目标衍射级次,能量利用率与衍射效率偏低。螺旋相位板(Spiral Phase Plate, SPP)是典型静态相位调制器件,通过器件厚度或等效折射率沿方位角连续变化为入射光加载螺旋相位(图 2(c)^[82])。Beijersbergen 等^[83]利用 SPP 将基模高斯光转换为涡

旋光束,奠定了折射式涡旋相位调制的实验基础。该类器件结构简单、无需电驱动、操作便捷,但固定式 SPP 针对特定拓扑荷与设计波长制备,难以快速切换拓扑荷,且输出模式质量易受加工误差、中心对准偏差、材料色散与相位台阶离散化等因素影响^[84-86]。SPP、叉形光栅等静态光学元件均针对特定拓扑荷设计,普遍难以实现灵活快速的模式切换。空间光调制器(Spatial Light Modulator, SLM)是由电压调控液晶分子构成的电光器件,可实现光场振幅与相位的灵活调控,主要分为反射式硅基液晶与透射式液晶显示两类结构^[87]。Reicherter 等^[88]利用液晶 SLM 加载计算全息图,动态生成带相位奇点的环形涡旋光束并应用于微粒捕获操控;基于 SLM 生成 LG 光束

的实验结果与相位图案如图 2(e) 所示^[89]。与静态元件相比,SLM 可实时调控,大幅简化实验流程,但其生成的涡旋光束质量受像素数量制约。

上述涡旋光生成与调控方案多依赖自由空间分立光学元件,系统体积大、集成度低,难以满足微型化与片上集成的需求。基于亚波长人工微结构的超表面技术,已成为紧凑型涡旋光调控的重要路径^[91],可通过几何相位、传输相位与谐振相位实现光场相位、振幅及偏振的局域调控^[92-94]。几何相位超表面通过调控各向异性纳米结构,在圆偏光偏振转换中引入方位角相关相位延迟,可集成螺旋相位与聚焦功能,生成聚焦涡旋光与完美涡旋光^[90, 95-96]。传输相位超表面通过改变纳米单元尺寸与形貌调控透射或反射相位,构建目标螺旋波前^[97];超表面生成超宽带、无色散、无衍射完美涡旋光的原理如图 2(d) 所示^[90]。Capasso 团队^[98]通过调控纳米柱的色散与动力学相位,实现了入射波长对输出 OAM 的动态调控。

此外,传输相位与几何相位结合可独立调控不同自旋态入射光,实现偏振复用与多拓扑荷涡旋光生成^[99]。

当前 OAM 光束调制技术正向高效率、高模式纯度、宽波段、动态可调与集成化方向发展。在共轭涡旋光干涉测量系统中,调制器性能直接决定输出光束的波前质量、拓扑荷稳定性与干涉条纹对比度;其中共轭光束的模式匹配度与相位稳定性,是保障系统测量灵敏度与精度的核心前提。因此,提升 OAM 调制器的调控精度、能量利用率与环境稳定性,对构建高性能共轭涡旋光干涉测量系统至关重要。

2.2 共轭涡旋光位移测量基本原理

图 3 为典型的 Mach-Zehnder 与 Michelson 型共轭干涉位移测量系统示意图,主要由光源、OAM 光束调制器、干涉光路及电荷耦合器件 (Charge-Coupled Device, CCD) 相机组成。

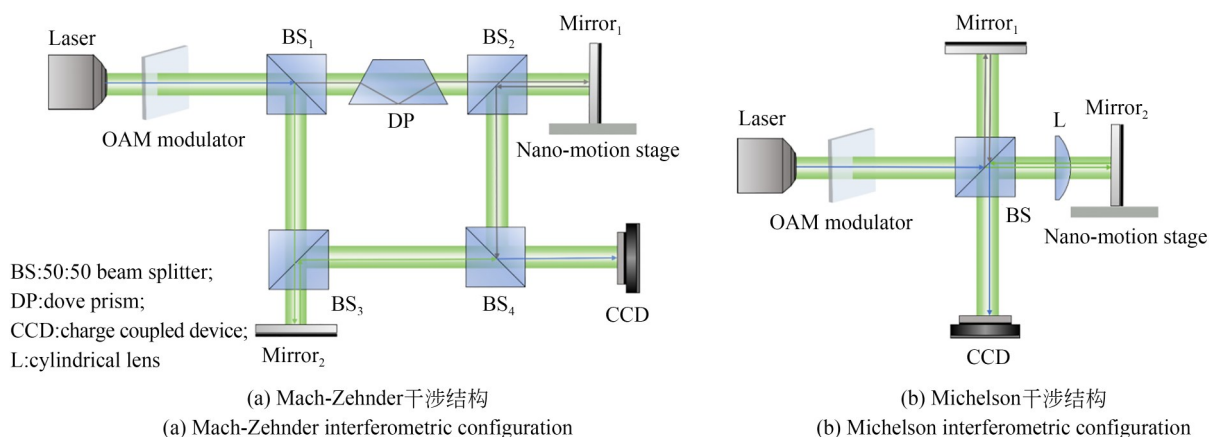


图 3 基于共轭 OAM 光束干涉的位移测量系统结构示意图

Fig. 3 Schematic diagrams of displacement measurement systems based on conjugated OAM beam interference

激光器产生的高斯光束经 OAM 调制器转换为涡旋光束,进入干涉结构后分束进入参考臂与测量臂。两臂光程差变化引入相对相位偏移,引起干涉花瓣图样绕光轴旋转,对应干涉光强分布可表达为^[100]:

$$I_e = |E_r + E_l|^2 = C + C \cdot \cos(2l\theta + k(z_1 - z_2) - 2kd), \quad (1)$$

其中: E_r, E_l 分别为参考光与测量光的光强幅值, C 为两束光的光强之和, l 为拓扑荷数, θ 为方位

角, k 为波数, z_1, z_2 分别为两臂光程。当测量臂引入位移 d 时,共轭涡旋光干涉图样的旋转角变化量 $\Delta\theta$ 与位移 d 呈线性关系(λ 为工作波长),其关系表示为^[101]:

$$d = \frac{\lambda l \Delta\theta}{2\pi}. \quad (2)$$

实际测量中多采用相机采集干涉图样,通过质心解调、角向峰值定位、极坐标变换、图像相关匹配、方位角频谱分析及深度学习等算法提取花瓣旋转角。依靠图像处理对旋转角的亚像素级

高精度识别,该方案可将微位移转化为可观测的角向变化,实现纳米、亚纳米乃至皮米量级的位移测量。

3 涡旋光平面位移测量系统

随着涡旋光位移测量技术从原理验证向高精度、跨尺度与智能化方向发展,研究重点已从单一关注干涉图样角向旋转响应,转向精度、量程、分辨力、动态响应与系统集成度的协同优化。当前研究主要聚焦高精度解调与误差抑制、大量程测量、分辨力提升及集成化小型化系统构建等。下文将围绕上述方向,系统梳理涡旋光平面位移测量系统的性能优化方法。

3.1 高精度位移测量方法

2017年,法国雷恩大学 O. Emile 与 J. Emile 率先提出共轭涡旋光干涉位移测量方案,为该领域早期代表性研究^[51]。该团队在 Michelson 干涉仪两臂引入拓扑荷相反的涡旋光束,合束形成花瓣状干涉图样(图 4(a), 4(b));测量臂微位移引发相对相位变化,引起花瓣图样旋转,通过放大干涉图样至约 2 m,实现了皮米级位移的可视化检测,明确了位移与图样旋转的对应关系。2019 年,英国利物浦大学 G. Yadav 等^[53]基于紧凑型干涉仪进一步验证了该方案的皮米级测量可行性;实验装置如图 4(c)所示,采用 CCD 采集图样,沿环形光强提取角向信号反演位移的流程如图 4(d)所示。但目视观测与简易角度判读难以满足高精度测量要求。针对旋转角提取的解调技术逐步从几何图像解调发展至频域相位解调,进

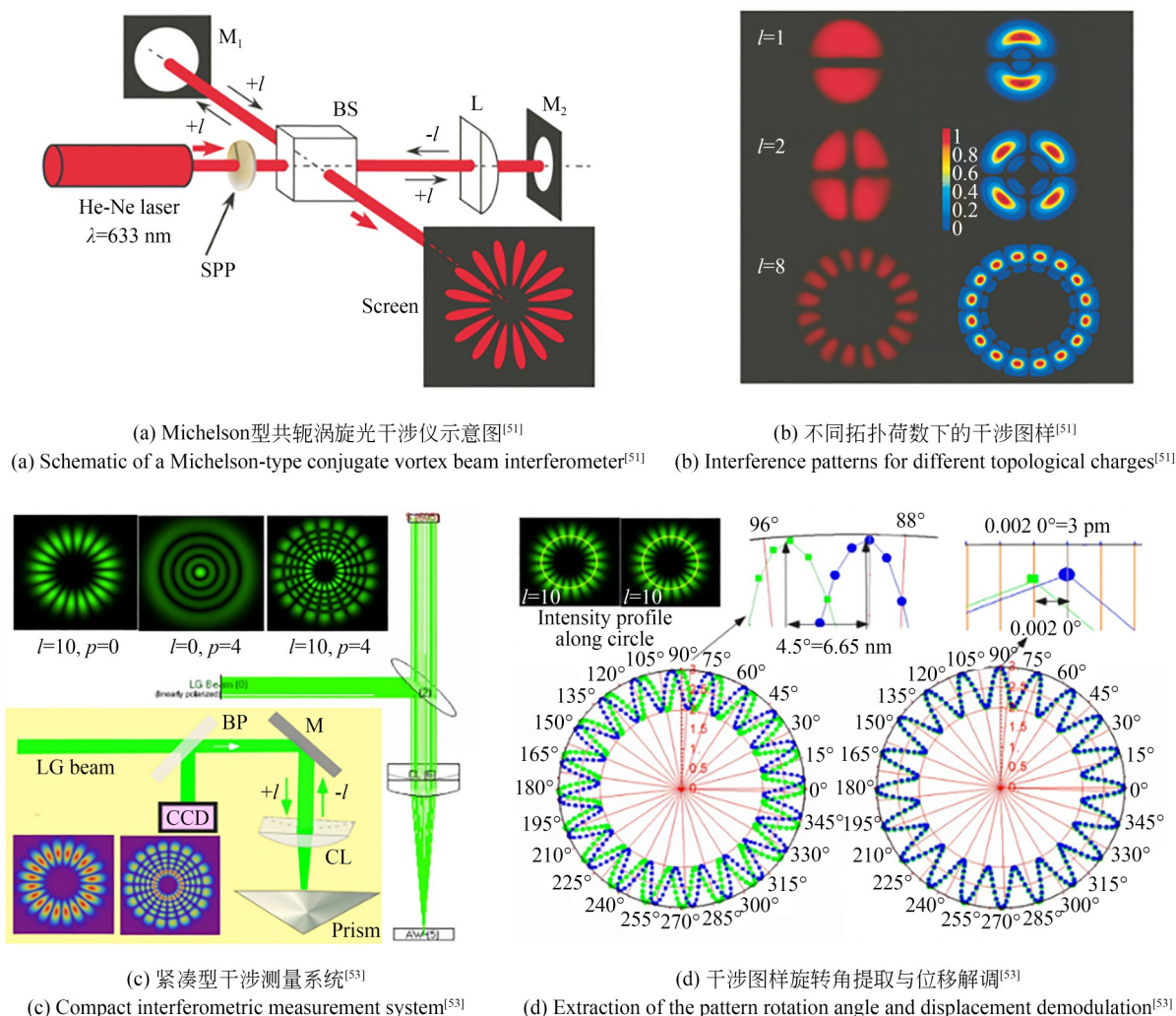


图 4 共轭 OAM 光束干涉位移测量示意图

Fig. 4 Schematic diagram of displacement measurement based on conjugate OAM beam interference

而向全局化、智能化方向演进,如表 1 所示。

表 1 涡旋光干涉位移测量典型解调方法
Tab. 1 Typical demodulation methods for vortex interferometric displacement measurement

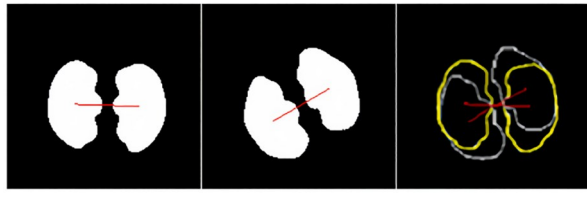
Demodulation method	Main advantages	Performance results	Limitations	Year
Centroid demodulation	Simple and intuitive; supports multi-petal averaging	Average error of 0.04% within an 80 μm displacement range	Sensitive to image quality	2025 ^[63]
Circular cross-correlation demodulation	Less dependent on individual petal features	Error of about 60 pm for a 50 nm displacement	Depends on circle center and radius selection	2022 ^[102]
Single-ring azimuthal complex spectrum analysis	No phase shifter required; avoids spectral leakage	Error of about 750 pm for a 100 nm displacement	Affected by sampling ring and pattern quality	2022 ^[103]
Multi-ring azimuthal complex spectrum analysis	Introduces radial information; better stability	Error of 84 pm for a 10 nm displacement	Affected by center mismatch and surface misalignment	2023 ^[104]
Adaptive polar transform	Global sampling; good robustness	Minimum average deviation of 0.07 nm within -120 to 120 nm	Affected by measurement range, alignment, and image processing	2024 ^[105]
Global phase demodulation	Global phase extraction; strong anti-interference ability	Maximum absolute error of 0.39 nm for a 100 nm displacement	Affected by alignment, center localization, and measurement range	2025 ^[106]
CNN-based intelligent demodulation	Reduces manual feature extraction; robust to noise and distortion	Accuracy better than 0.84 nm within $0\sim 500$ nm	Depends on training data and generalization ability	2025 ^[107]

基于图像特征的解调方法将干涉图样作为具有角向周期性的二维光强分布,研究重点为从花瓣质心、边缘或圆周光强中提取旋转角,其中质心解调与圆互相关算法应用较为广泛。2020 年,中国科学院上海光学精密机械研究所 Zhang 等^[108]在液晶空间光调制器相位标定中,采用共轭涡旋光构建径向剪切干涉图样并引入质心解调算法(图 5(a))。该方法对干涉图预处理后计算各花瓣质心坐标,以质心连线为特征线段;图样旋转时对应连线的夹角即为旋转角,多组连线取平均可降低单次测量误差,提升解调精度。2025 年,本研究团队^[63]将该算法应用于共轭涡旋光干涉纳米位移测量,在 80 μm 量程内实现了 0.04% 的平均测量误差(图 5(b))。但质心解调性能受图样质量制约,背景光不均、散斑噪声、光斑畸变及花瓣粘连等因素易引发质心偏移,仅依靠质心连线解调易引入系统偏差。为减少对离散特征点的依赖,圆互相关算法通过圆周上的整体灰度

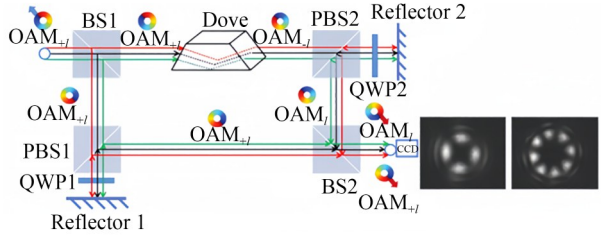
信息实现旋转角估计。

2022 年,南京师范大学 Zhao 等^[102]优化了传统 Mach-Zehnder 型 OAM 干涉结构,采用偏振分束器、四分之一波片与反射镜构成的反射模块替代分立反射镜,补偿道威棱镜引入的横向相位影响(图 5(c)),并引入圆互相关算法解调花瓣状干涉图样旋转角。该算法选取干涉图样高光强环形区域,沿固定半径圆周扫描像素,获取位移前后呈余弦周期分布的角向光强曲线(图 5(d));位移引起曲线相位偏移,通过圆互相关运算的峰值位置即可确定旋转角。为抑制图样局部畸变引入的随机误差,研究选取 5 组相邻半径圆周分别解调后取平均,在 50 nm 位移下实现约 60 pm 的绝对测量误差。但该算法仍依赖图样中心与扫描半径的精准选取,圆心偏差或半径失配易造成角向光强曲线畸变,导致相关峰展宽或偏移。

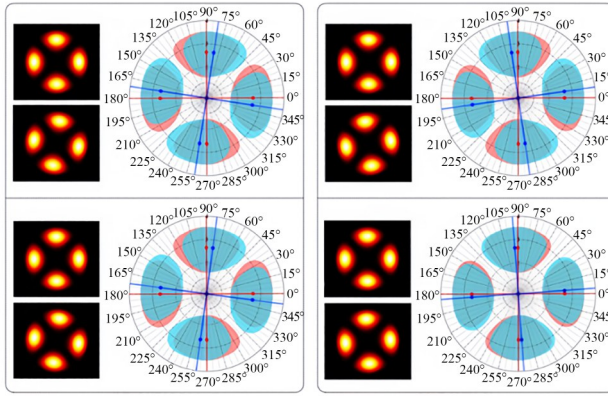
方位复谱分析将解调维度从图像强度拓展至角向频域相位,可有效提升涡旋光位移解调精



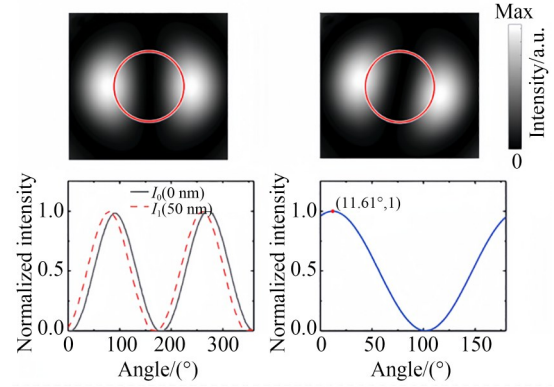
(a) 花瓣状干涉图样预处理与质心线段构建^[108]
(a) Preprocessing of petal-like interference patterns and construction of centroid line segments^[108]



(c) 引入反射模块的共轭涡旋光干涉测量系统^[102]
(c) Conjugate vortex beam interferometric measurement system incorporating a reflection module^[102]



(b) 质心解调算法位移前后干涉图样解调示意图^[63]
(b) Schematic diagram of interference-pattern demodulation before and after displacement using the centroid demodulation algorithm^[63]



(d) 基于圆周强度分布的旋转角解调方法^[102]
(d) Rotation-angle demodulation method based on the circumferential intensity distribution^[102]

图 5 基于质心和圆周强度的角度解调算法

Fig. 5 Angle demodulation algorithms based on centroid and circumferential intensity

度。2022 年,南京师范大学 Zhao 等^[103]提出结合方位复谱分析的 OAM 光束 Fizeau 干涉位移测量系统(图 6(a))。针对传统双臂干涉结构体积大、易受环境扰动的问题,该方案采用共光路 Fizeau 结构提升干涉图样稳定性;解调时将花瓣图样映射至 OAM 复谱域,沿高光强圆环角向采样并经一维傅里叶变换,在角向频率 $\pm 2l$ 处提取复谱相位,由位移前后相位差反演被测位移,100 nm 位移下绝对误差为 750 pm(图 6(b))。2023 年,合肥工业大学 Dong 等^[104]采用共轭高径向阶 LG 光束生成多环花瓣干涉图样(图 6(c)),通过多组环形采样区提取各角向信号主频的复谱相位,在 10 nm 均匀位移下测量误差达 84 pm,100 nm 轴对称非均匀形变下误差为 359 pm。与单环采样相比,多环方案引入径向维度信息,可削弱局部图样畸变与单区域采样误差的影响,将测量场景从单一轴向位移拓展至复杂形变检测。

与此同时,极坐标变换是提升花瓣干涉图样

旋转角解调稳定性的另一重要途径。2024 年,合肥工业大学 Xia 等^[105]提出自适应极坐标变换(Adaptive Polar Transform, APT)算法,将直角坐标系下的花瓣干涉图样转换至极坐标空间,把二维图样旋转转化为角向灰度投影曲线的平移,通过一维相关运算求解旋转角;测量系统与解调流程分别如图 7(a), 7(b)所示。该算法在 $-120 \sim 120$ nm 位移内,不同拓扑荷下的平均最小偏差低至 0.07 nm;与常规极坐标变换相比,可改善中心过采样与边缘欠采样的信息损失,更充分利用图样全局信息。2025 年,该团队^[106]进一步结合 APT 展开与方位复谱分析,提出全局相位解调方法。该方法突破了仅依赖投影曲线平移量或相关峰定位的解调思路,在极坐标变换后对投影曲线做傅里叶变换,从角向主频分量提取全局复谱相位,通过位移前后相位差反演被测位移;在 100 nm 位移下,系统最大绝对误差为 0.39 nm,测量重复性为 0.23 nm。APT 系列方法为旋

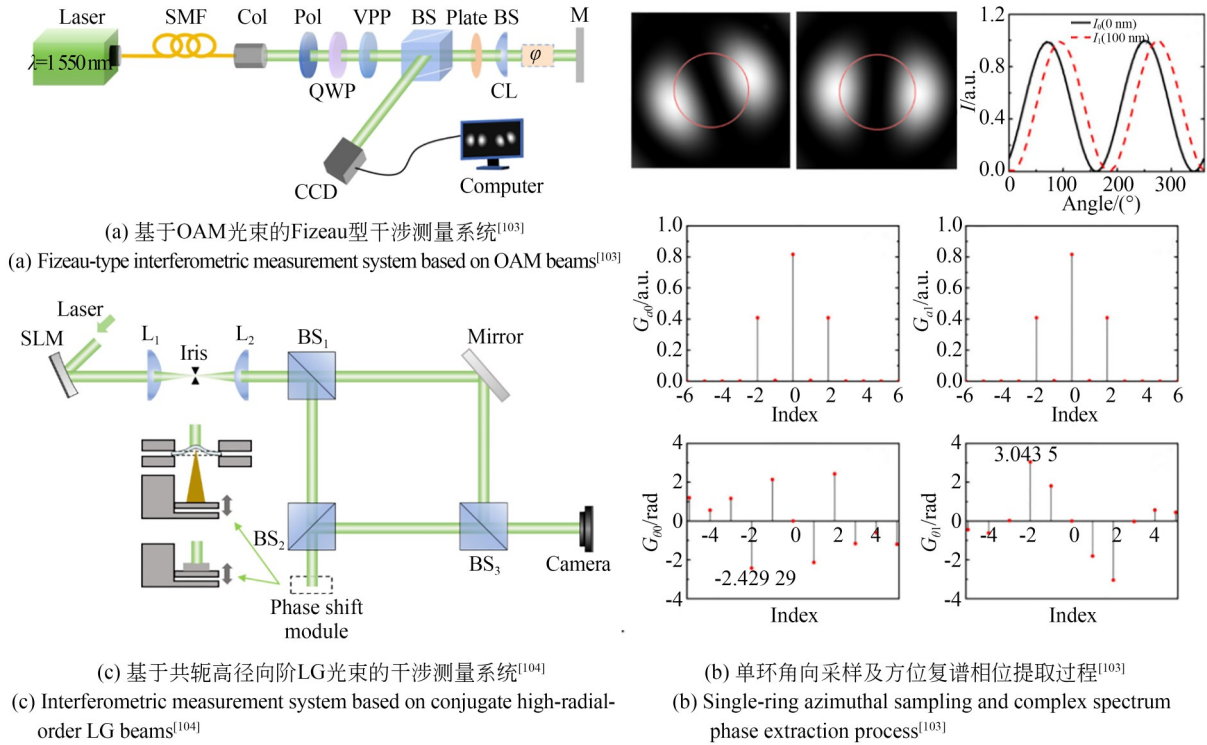


图6 基于方位复谱分析的涡旋光干涉解调方法

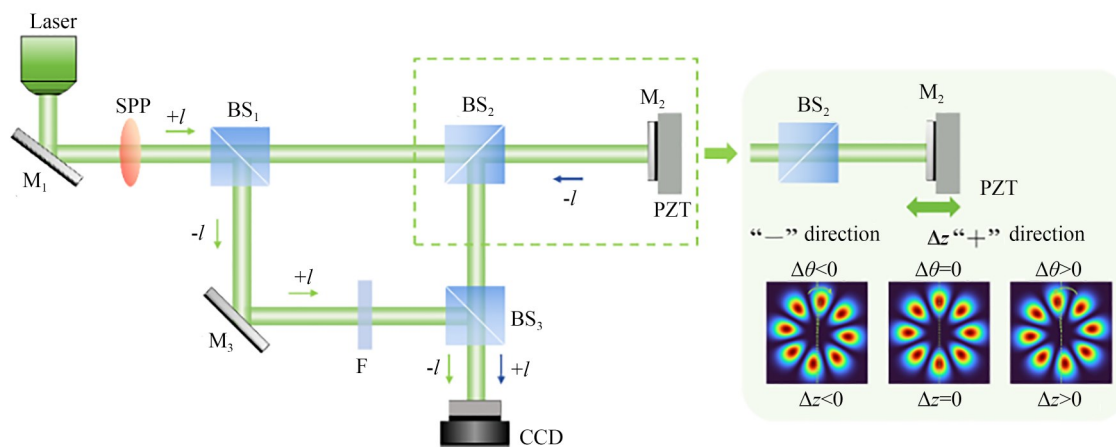
Fig. 6 Vortex beam interferometric demodulation methods based on azimuthal complex spectrum analysis

转角提取提供了更稳定的技术路径,相较于图像匹配或相关峰定位方案,全局信息利用率更高、抗局部噪声能力更强,但仍受图样中心对准、光强均匀性、极坐标采样及相位包裹等因素制约。

近年来,人工智能为共轭涡旋光干涉解调提供了新路径,卷积神经网络(Convolutional Neural Network, CNN)可直接建立干涉图样与微位移的映射关系。2025年,中北大学Liu等^[107]提出CNN增强型微位移检测方案,以位移前后双通道干涉图像为输入,通过9层CNN自动提取花瓣旋转、光强分布及局部畸变特征,经回归预测转角以反演位移,系统结构与解调流程分别如图8(a)和8(b)所示。0~500 nm量程内,该方案测量精度优于0.84 nm,平均绝对误差约为0.5 nm。该团队后续进一步提出多阶段协同解调框架^[109]:采用改进YOLOv8s-Seg网络精准分割花瓣区域,抑制背景噪声、光束畸变与光强不均的干扰;再通过14层CNN对分割区域做多尺度特征提取,建立形貌变化与转角的映射关系。方案花瓣分割平均精度达96.5%,同量程下测量精度优于0.94 nm,平均绝对误差为0.63 nm。与传

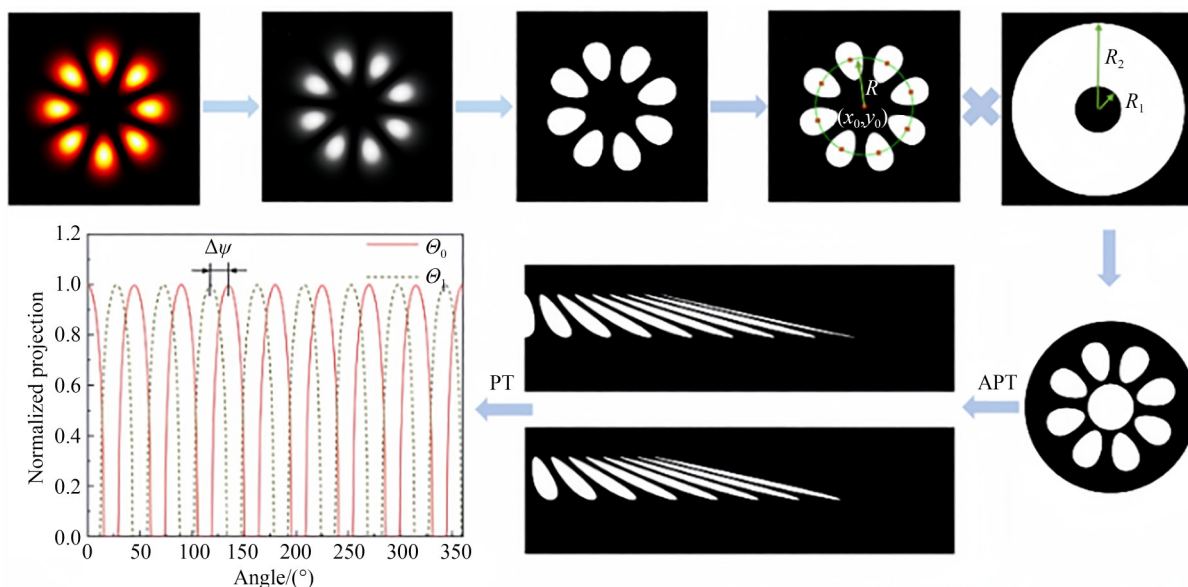
统解调算法相比,CNN方法无需人工设计特征与设定阈值,在图样畸变、噪声干扰、光强不均场景下更具优势。但面向高精度计量场景,其可靠性仍依赖训练样本覆盖度、数据一致性与模型泛化能力。因此,未来发展方向并非以神经网络完全替代物理模型,而是结合涡旋光干涉的相位机制与角向结构特性,构建物理约束下的智能解调方案。

随着测量精度向皮米量级推进,图样中心失配、光轴偏移等系统误差已成为不可忽视的制约因素,解调算法需在提取转角的同时实现误差源的同步识别与修正。理想条件下,固定半径圆周采样信号呈余弦分布,可通过主频相位差反演位移;实际系统中采样圆心与光斑中心难以完全重合,中心失配会引发采样信号畸变与频谱泄漏,劣化傅里叶相位解调精度(图9(a),9(b))。针对该问题,2026年中国科学院光电技术研究所Liu等^[73]提出基于Mach-Zehnder结构的非线性优化自校准方法(图9(c)),不再将图样中心视为已知量,而是将中心位置、旋转角及系统参数纳入统一优化框架,在解调过程中同步完成参数估计



(a) 基于改进Mach-Zehnder结构的OAM位移干涉测量系统

(a) OAM displacement interferometric measurement system based on an improved Mach-Zehnder configuration



(b) 自适应极坐标变换解调流程, 通过极坐标展开和角向灰度投影将花瓣图样旋转转化为投影曲线平移

(b) Adaptive polar transform demodulation process, in which polar-coordinate unfolding and azimuthal grayscale projection convert the rotation of the petal-like pattern into a translation of the projection curve

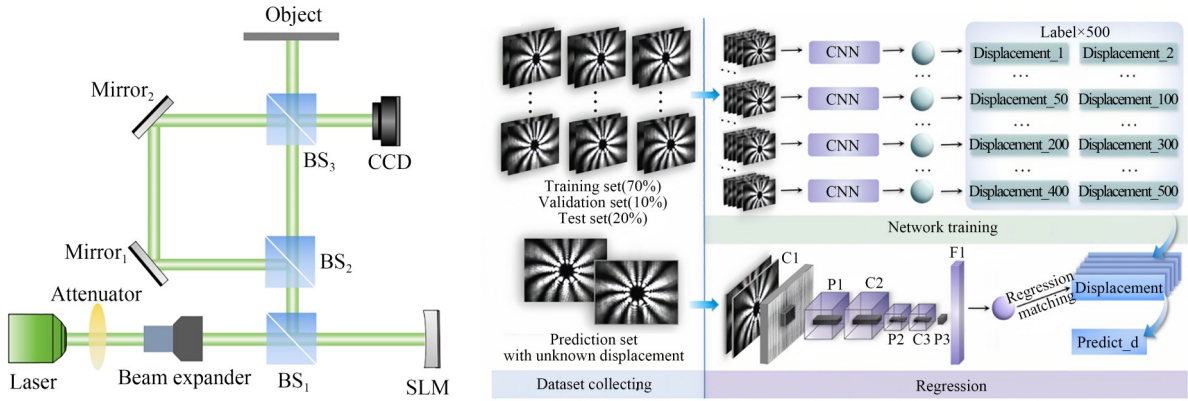
图 7 基于 APT 的涡旋光干涉解调方法^[105]Fig. 7 Vortex beam interferometric demodulation methods based on APT^[105]

与误差修正。对照实验表明,该方法的测量偏差为 0.897 nm, 中心定位精度较质心法提升 93.5%, 更适配预对准不足或中心微偏移场景, 为工程化皮米级位移测量提供了可行的误差抑制思路。

共轭涡旋光位移测量精度既取决于旋转角解调算法, 也受拓扑荷数选取的显著影响, 后者直接决定干涉图样的花瓣数量、角向周期与细节分布。2023 年, 中北大学 Zhao 等^[110]针对拓扑荷

优化开展实验研究, 采用 $l=1\sim6$ 的共轭涡旋光进行纳米位移测量, 结果表明: 在 100, 200, 250 nm 位移下, $l=3$ 时相对误差均为最小, 分别达 2.19%, 1.28% 和 1.27%。拓扑荷数较小时, 花瓣数量少、统计信息不足, 测量易受局部噪声干扰; 拓扑荷数过大时, 花瓣宽度收窄, 对光束质量、图样对比度与探测器分辨率要求提升, 反而增大转角提取误差。因此需结合光斑尺寸、探测器分辨率、信噪比及解调算法综合选取, 实现角

向响应灵敏度与图样可分辨性的平衡。

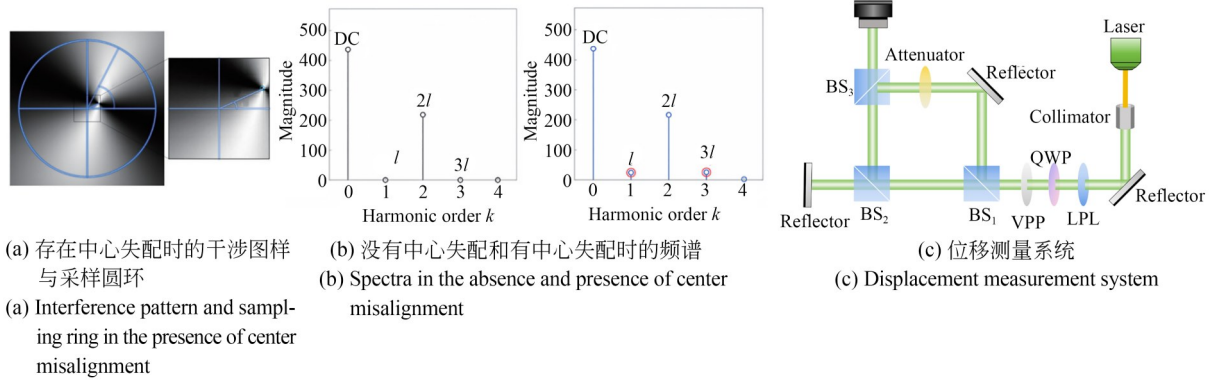


(a) Schematic diagram of the system structure

(b) Workflow of the CNN-based micro-displacement measurement framework, including data acquisition, network training, generalization evaluation, and displacement regression

图 8 基于CNN增强的涡旋光干涉微位移测量^[107]

Fig. 8 CNN-enhanced vortex-beam interferometric micro-displacement measurement^[107]



(a) Interference pattern and sampling ring in the presence of center misalignment

(b) Spectra in the absence and presence of center misalignment

(c) Displacement measurement system

图 9 中心失配对圆周采样及频谱分布的影响^[73]

Fig. 9 Influence of center misalignment on circular sampling and spectral distribution^[73]

以上方法为高精度纳米位移测量提供了多元技术路径,通过角向旋转放大轴向微位移响应,结合图像解调与相位提取提升测量稳定性。但在确保高精度解调的前提下,进一步强化微位移的角向响应、提升系统分辨能力,仍是共轭涡旋光干涉位移测量性能优化的核心问题。

3.2 角向响应放大与分辨能力的提升

共轭涡旋光干涉的位移分辨能力提升,主要从光场结构设计与干涉光路响应放大两方面展开。2024年,四川大学Wang等^[60]提出双环共轭

涡旋光微位移测量方法(图10(a)),通过空间光调制器生成拓扑荷异号的内外双环涡旋光场,合束后形成双环花瓣状干涉图样;位移作用下两环反向旋转,以内外环相对转角为解调量叠加双向角向响应,增大同一位移对应的等效旋转角(图10(b))。理论表明,当外环拓扑荷为内环 n 倍时,位移-转角转换系数可降至单环结构的 $n/(1+n)$,有效提升微位移分辨能力。实验测得系统转角分辨率达 $0.38(^{\circ})/\text{nm}$,较单环方案提升12.55%,最小可测位移由 0.080 nm 降至约

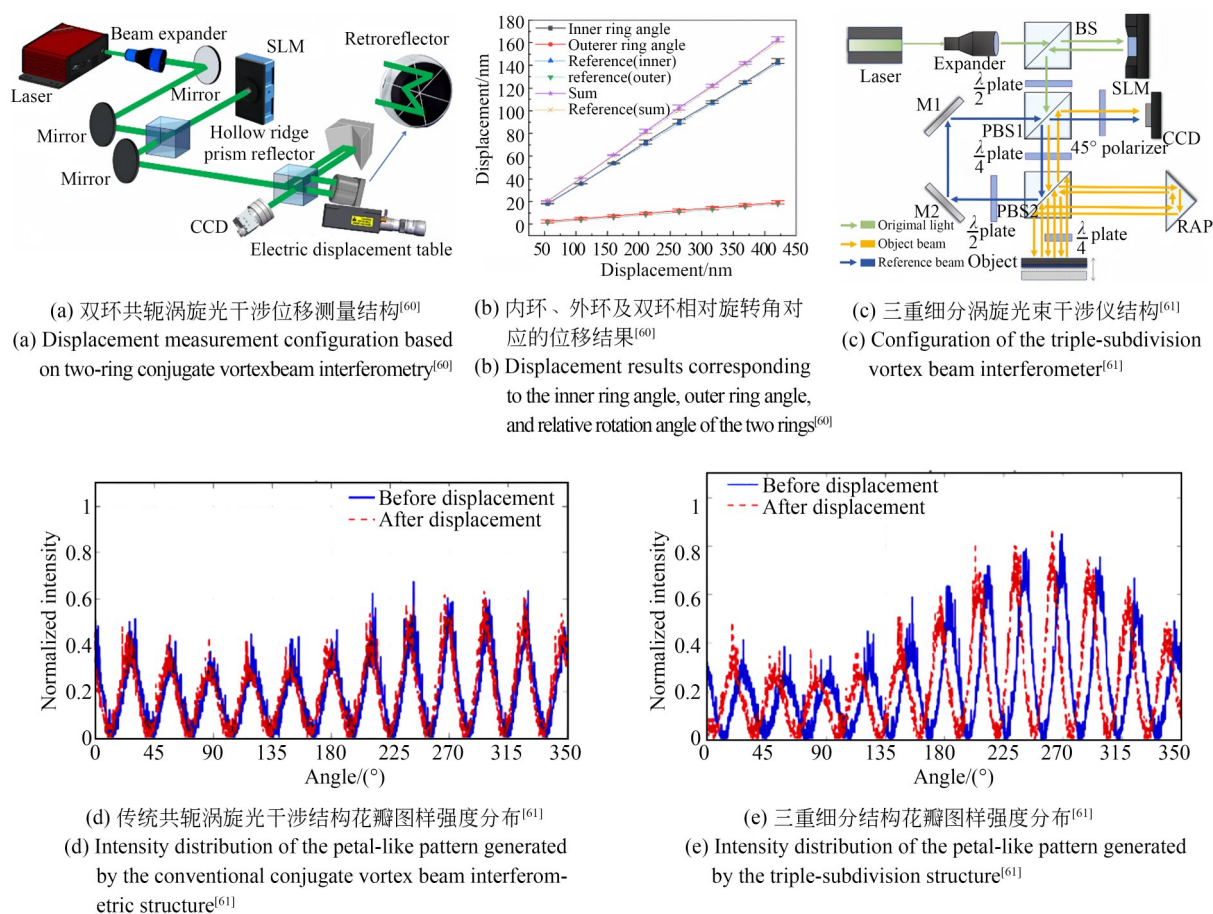


图 10 共轭涡旋光干涉位移分辨能力提升方法示意图

Fig. 10 Schematic diagram of methods for improving displacement resolution of conjugate vortex beam interferometry

0.060 nm, 证明径向双环反向结构可在不依赖高像素探测器的前提下增强角向响应, 降低等效位移分辨极限。

2025 年, 中北大学 Liu 等^[61]提出三重细分涡旋光束干涉仪, 从光路构型层面放大位移引发的转角响应(图 10(c))。该结构结合偏振控制与多次反射光路, 使测量光与被测目标发生三次有效相互作用, 将位移引入的相位变化转化为更强的角向旋转信号; 其干涉图样基本形态与传统方案一致, 但位移-转角转换灵敏度提升至传统方法的 3 倍(图 10(d), 10(e))。实验结果显示, 25 nm 位移下传统结构解调转角约 2.9°, 三重细分结构约 8.4°, 与理论值一致, 相对误差由 2.84% 降至 0.72%。该方法通过光学预放大突破了相机像素密度对角度分辨的限制, 为提升纳米位移测量分辨能力提供了有效途径。

位移分辨能力的提升使共轭涡旋光干涉可

识别更微小的位移, 但在动态位移与微振动测量场景下, 图样采集速率、信号读取方式及解调效率同样制约系统实用性能。随着应用从静态位移向动态测量拓展, 测量速度与实时响应能力已成为系统性能优化的核心方向。

3.3 动态位移传感与高速解调技术

针对涡旋光干涉测量速度受相机采集与图像处理制约的问题, 相关研究通过光电探测、周期计数与快速相位解调等技术提升动态测量的信号读取效率。2020 年, 合肥工业大学 Xia 等^[64]提出高速光电检测与低速图像处理相结合的信号处理方法(图 11(a))。利用花瓣干涉图样的周期性旋转特性, 由光电探测器完成整周期高速计数, 再通过相机图像处理实现周期内转角细分, 构建“粗计数-细分”的联合解调模式。拓扑荷数为 4 时, 1°转角理论对应 0.88 nm 位移, 实验测得系统测量分辨力优于 0.5 nm。该方案依据不

同信息的时间特性分工处理,既保留了空间图像解调的精度优势,又缓解了高速连续图像采集与运算的算力问题。

2024 年,南京师范大学 Zhao 等^[65]进一步提出面向 OAM 干涉仪的方位相移解调方法(图 11(b),11(c)),在 $0, \pi/4, \pi/2, 3\pi/4$ 四个特征方位提取光强,将传统四步相移算法等效引入角向域,直接解调相位变化。与基于 CCD 的转角提取方法相比,少点光强采样大幅压缩了数据量,可通过光电探测器阵列替代 CCD,突破二维图像

采集与复杂处理对测量速度的限制。基于 Michelson 结构的实验表明,0~3 100 nm 的位移内相对误差小于 1%,0~200 nm 区间测量不确定度约为 1.6 nm。该方法将角向结构信息压缩为少通道强度信号,更适配高速硬件采样与实时信号处理,为高速在线位移测量提供了可行技术路径。但少点采样对探测器方位布置精度、采样区域尺寸、光斑稳定性及通道一致性要求更高,工程化应用仍需解决 PD 阵列采样、通道一致性校正与高速电路实现等问题。

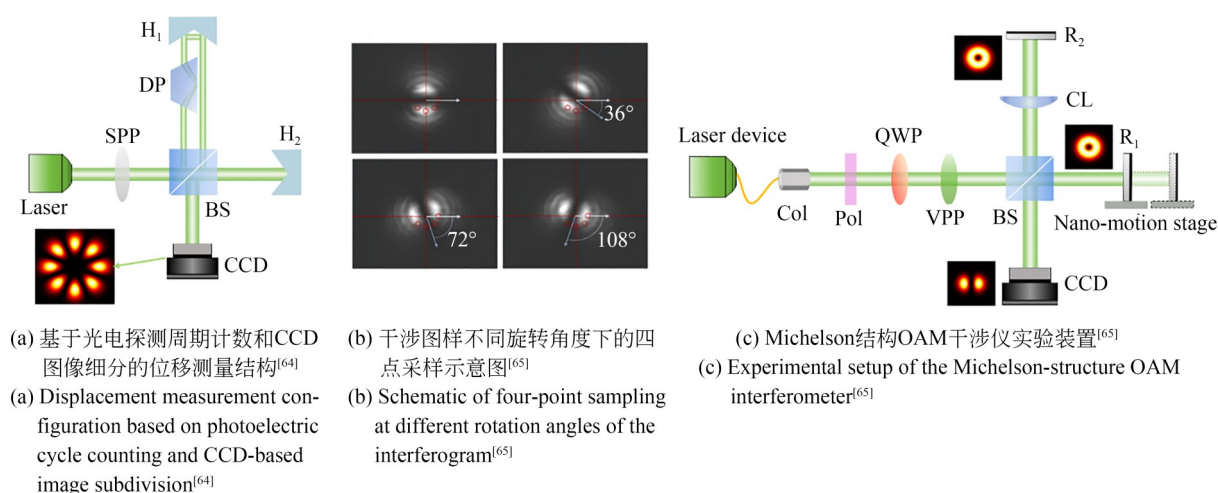


图 11 面向动态位移测量的涡旋光干涉信号快速读取与解调方法

Fig. 11 Fast signal readout and demodulation methods for vortex beam interferometry in dynamic displacement measurement

3.4 大量程位移测量与步长扩展

共轭涡旋光干涉位移测量受图样旋转周期性制约,位移超过单周期值 $\lambda/2$ 时会产生周期模糊,限制无歧义测量范围。目前扩程技术主要分为连续跟踪周期累计、图像重构引入周期基准、双波长等效扩程及算法优化四类路径。

2022 年,南京邮电大学 Zhao 等^[111]将静态角度读取拓展为动态逐帧跟踪,通过逐帧提取花瓣转角、结合相邻帧旋转方向判别位移方向,经位移累计实现 0~1 100 cm 的大量程测量,精度达 $\pm 16.599\ 5\ \text{nm}$ (图 12(a),12(b))。该方案结构直观、可实时重建位移轨迹,但性能受采样帧率、运动速度与特征提取稳定性制约,在高拓扑荷与高速场景下跟踪可靠性下降。2022 年,安徽大学 Zhang 等^[62]提出虚拟莫尔指针方法(图 12(c)),将干涉图样重构为莫尔指针图像,以分数拓扑荷下

的固定指针为周期计数基准,实现纳米级至百毫米级的跨尺度测量。该方法角度提取鲁棒性强,但大位移动态测量受时间采样约束:500 万像素、160 frame/s 偏振相机下,亚纳米步进分辨率约为 0.4 nm,对应最大位移速度 64 nm/s;百毫米级量程下不确定度约 0.158 μm ,速度上限提升至 25.15 $\mu\text{m/s}$ 。2024 年,该团队进一步提出虚拟轨道角动量(Virtual Orbital Angular Momentum, VOAM)相位时钟方法^[112](图 12(d)),将涡旋相位转移至数字处理环节,以拓扑荷 0.5 的旋转指针表征相位、固定指针消除周期模糊;方案无需真实 OAM 光束传输,规避了光束发散、分数拓扑荷传输不稳定等问题,可兼容传统干涉仪。实验在 35 frame/s 相机下实现 0.15 nm 位移分辨率, $\lambda/16$ 位移测量相对误差约 0.10%,并验证了 400 nm 跨周期、6 m 远距离及曲面目标测量能力,工程适用性

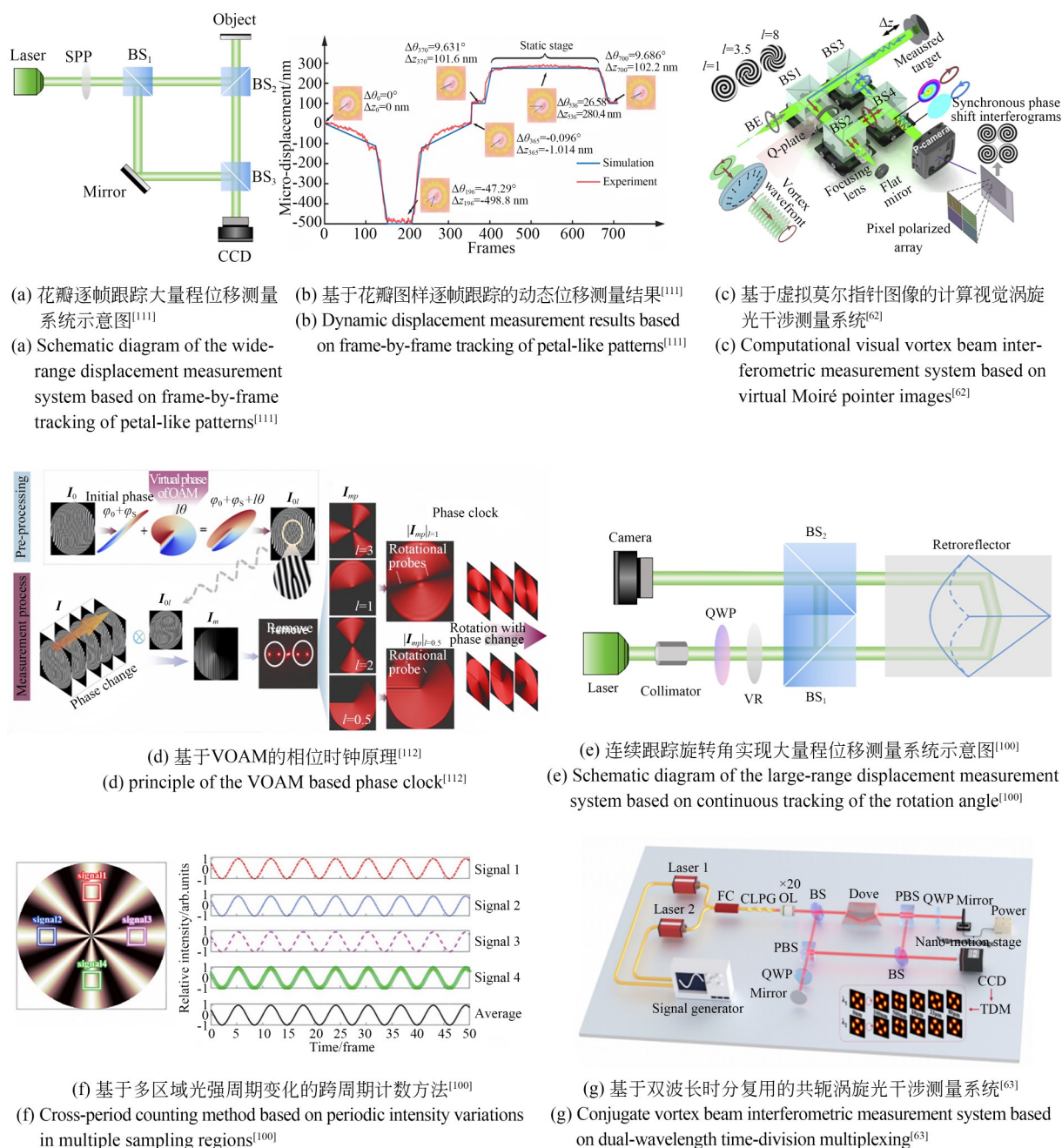


图 12 涡旋光干涉大量程与跨周期位移测量方法

Fig. 12 Schematic diagram of large-range and cross-period displacement measurement methods based on vortex beam interferometry

更强。2023年,山东大学Yang等^[100]结合单周期角度细分与多周期计数实现跨周期测量(图12(e),12(f)):小位移通过圆环相对光强分布解调,大量程利用多组中心对称区域的光强周期变化计量旋转周期数。方案在20 nm的标准位移下误差为25 pm、相对误差为0.13%,可实现30 μm 的精密测量,更适用于连续位移场景。

2025年,本研究团队^[63]提出双波长时分复用扩程方案(图12(g)),利用1.82 μm 与1.84 μm 双波长构建等效合成周期,将拓扑荷为2时的最大位移步长从约920 nm提升至83 μm ,扩程约90倍。该方法无需连续跟踪,适配非连续、大步进位移场景,目前以仿真验证为主,仍需开展双波长稳定性、光路误差补偿与系统集成的实验验

证。2026年,郑州大学Gong等^[113]提出线状逐帧差分采样与周期分区计数解调算法,将空间图样旋转转化为时域信号周期计数,建立累计转角与位移的全局线性映射。系统10~100 nm的小位移测量精度优于3 nm,20 μm 大量程下相对误差0.75%,通过算法优化进一步提升了跨周期解调的稳定性。

综上所述,连续跟踪法可完整复现动态位移过程,适用于连续运动与振动测量场景;双波长及等效长周期方法侧重提升单次测量步长,在非连续、大间隔位移测量中更具潜力。未来大量程共轭涡旋光干涉测量将不再局限于单一技术路径,需在保障测量精度的前提下协同优化量程、测速与鲁棒性,推动技术向跨尺度、实时化与工程应用方向发展。

3.5 集成化与探针化位移测量系统

系统小型化与结构紧凑化是共轭涡旋光干涉位移测量应用研究的重点,通过在稳固测量性能的前提下进一步压缩光路体积、降低装调难度、提升环境适应性。

2023年,山东大学Yang等^[70]提出改进型反剪切干涉结构(图13(a)),通过两分束镜与一回射器构建紧凑光路,回射器同时引入待测位移并实现拓扑荷反转,无需额外道威棱镜即可生成花瓣状干涉图样;该结构器件数量少,且回射器对光路微扰具有自补偿效应,稳定性更优。解调采用虚拟相位偏移提取螺旋相位波前,结合Radon变换反演位移,拓扑荷为6时测量误差小于0.067 nm。同年,该团队进一步提出波前分裂干涉方案^[114](图13(b)),采用胶合直角棱镜对单束OAM光束实现波前分裂,经不同反射次数形成半共轭光束干涉;结构光路短、体积小、易对准,位移分辨率约为0.1 nm,测量精度优于99.87%,线性度接近99%,后续可结合片上器件进一步提升集成度。2023年,南京师范大学Zhao等^[71]提出探针式全光纤OAM微位移传感方案(图13(c)),基于螺旋长周期光纤光栅生成共轭OAM光束,结合少模光纤环形器与准直器构建探针式测量头,适配狭小空间探测场景。方案利用相反旋向光栅生成共轭光束,位移引发干涉图样转角变化,0~750 nm的量程内分辨率约8.81 nm,将OAM干涉测量从自由空间平台拓展

至光纤探针式远端检测。2025年,本研究团队^[101]从涡旋光产生器件集成化入手,采用手性长周期光纤光栅生成OAM光束并构建共轭干涉系统(图13(d));相较于传统空间光调制器、螺旋相位板等器件,光纤光栅结构简单、成本低、易与光纤系统集成,结合改进型Mach-Zehnder结构与优化质心解调算法,位移-转角线性度达0.999 97。2026年,本研究团队与中国科学院西安光学精密机械研究所Wang等^[72]进一步设计光学超表面器件生成高质量涡旋光束(图13(e)),通过二维亚波长纳米阵列调控光场相位,规避了传统空间光调制器体积大、稳定性不足的问题,200 nm测量步长下最小测量不确定度为0.01%。结果表明,超表面具备片上微纳调控潜力,若进一步实现涡旋光产生、共轭干涉、成像探测的单片集成,将推动该技术向芯片化、高稳定方向发展。

3.6 面向多自由度测量的涡旋光干涉方法

多维位移与多参数同步测量是涡旋光干涉测量的重要发展方向。复杂运动状态无法通过单一轴向位移完全表征,而涡旋光干涉图样的角向周期结构可承载位移、转角、速度及运动方向等多维度信息,为突破单自由度测量限制、实现多维精密测量提供了新的自由度。

2024年,南京邮电大学Zhao等^[66]提出基于分数阶OAM光束的动态微位移传感方法,可同步检测位移、瞬时速度与运动方向(图14(a))。该方案采用拓扑荷绝对值不超过0.5的分数阶OAM光束与参考光同轴干涉,形成单瓣散斑图样;轴向运动驱动单瓣图样绕暗核旋转(图14(b)),通过转角反演位移、角速度反演瞬时速度、旋转方向判别运动方向。实验中实现 ± 11.78 nm的位移测量精度,量程为0~250 μm ,瞬时速度测量范围为0~5 $\mu\text{m}/\text{s}$,精度为 ± 0.25 $\mu\text{m}/\text{s}$,完成了动态运动状态的多参数同步表征。同年,南京师范大学Zhao等^[115]将OAM干涉与光栅干涉相结合,拓展了面内位移测量场景。OAM光束垂直入射反射式光栅,其 ± 1 级衍射光形成共轭OAM干涉光束,通过解调花瓣图样旋转角获取光栅面内位移(图14(c)),测量误差不超过3.35%。与传统以激光波长为基准的轴向测量不同,该方法以光栅栅距为测量基准,在保持高分辨力的同时提升了环境扰动鲁棒性。2025年,该团队^[116]进

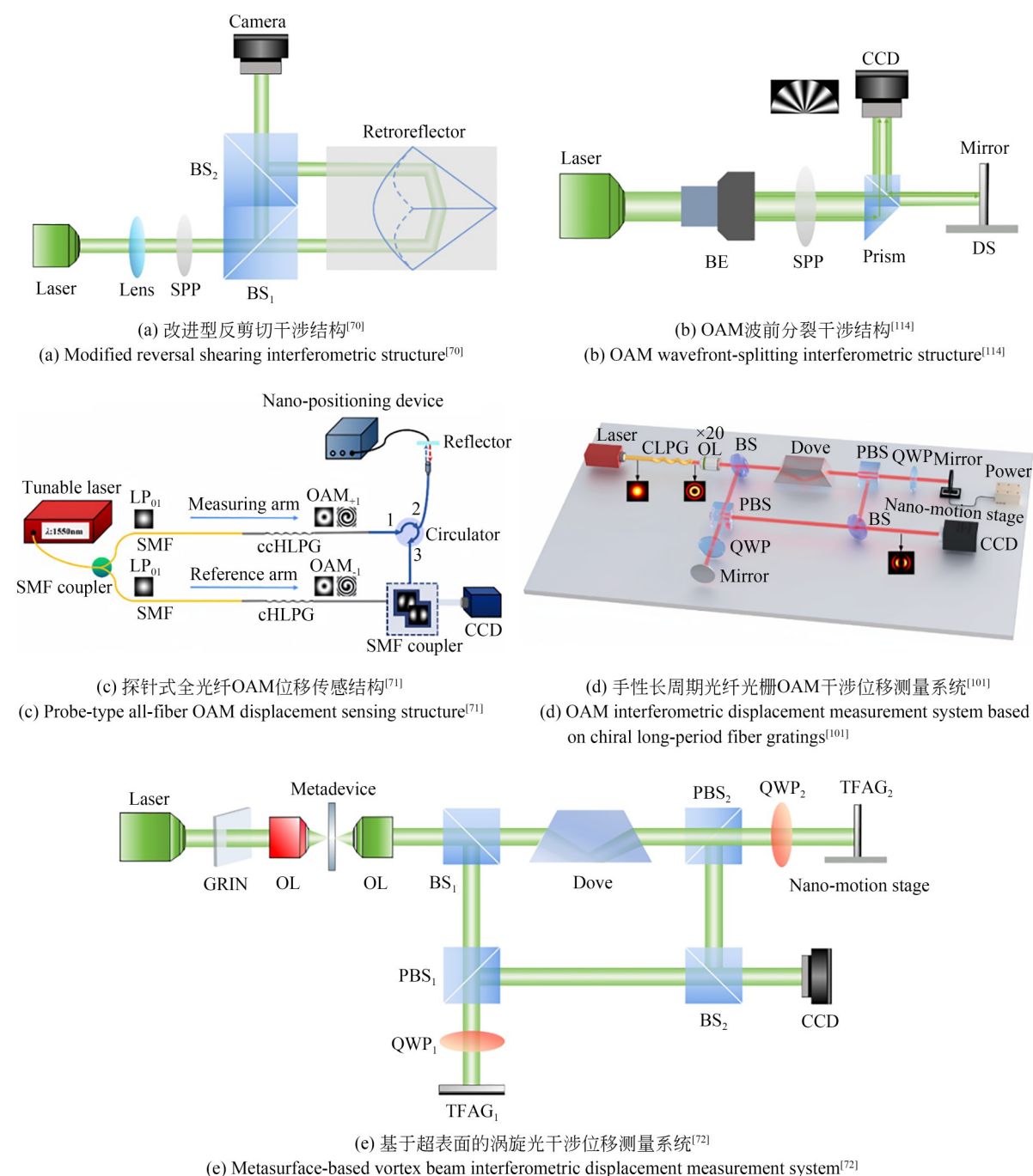


图 13 共轭涡旋光干涉位移测量系统紧凑化与集成化方法

Fig. 13 Miniaturization and integration approaches for conjugate vortex beam interferometry-based displacement measurement systems

一步提出角动量叠加光束干涉测量方法,实现旋转位移与轴向位移的同步测量(图 14(d))。通过构造包含自旋与轨道角动量分量的叠加光束,使两类位移引发的相位变化由不同角动量模式独立承载,经 OAM 复谱域相位解调实现信息解耦(图 14(e));测得旋转位移最大绝对误差为

2.89° ,轴向位移最大绝对误差为 16.04 nm。该研究利用角动量模式的正交性实现多参数并行承载与解耦,将 OAM 干涉从单参量测量推进至多参数复用层面。同年,该团队 Guo 等^[117]提出基于 Littman 结构的 OAM 干涉测量方案,结合标尺光栅实现面内与离面一维位移的模式切换测量。

测量臂 OAM 光束经反射光栅两次衍射后,与参考臂共轭 OAM 光束干涉形成花瓣图样(图 14(f)),采用圆互相关算法解调位移。实验结果表明,300 nm 测量步长下面内位移最大误差为 1.299 nm,200 nm 步长下离面位移最大误差为

1.898 nm,两种模式下位移分辨率均优于 2 nm。该方案目前仅支持单方向切换测量,未来结合多维光栅与多路同步解调算法,有望实现面内-离面位移的同步检测。

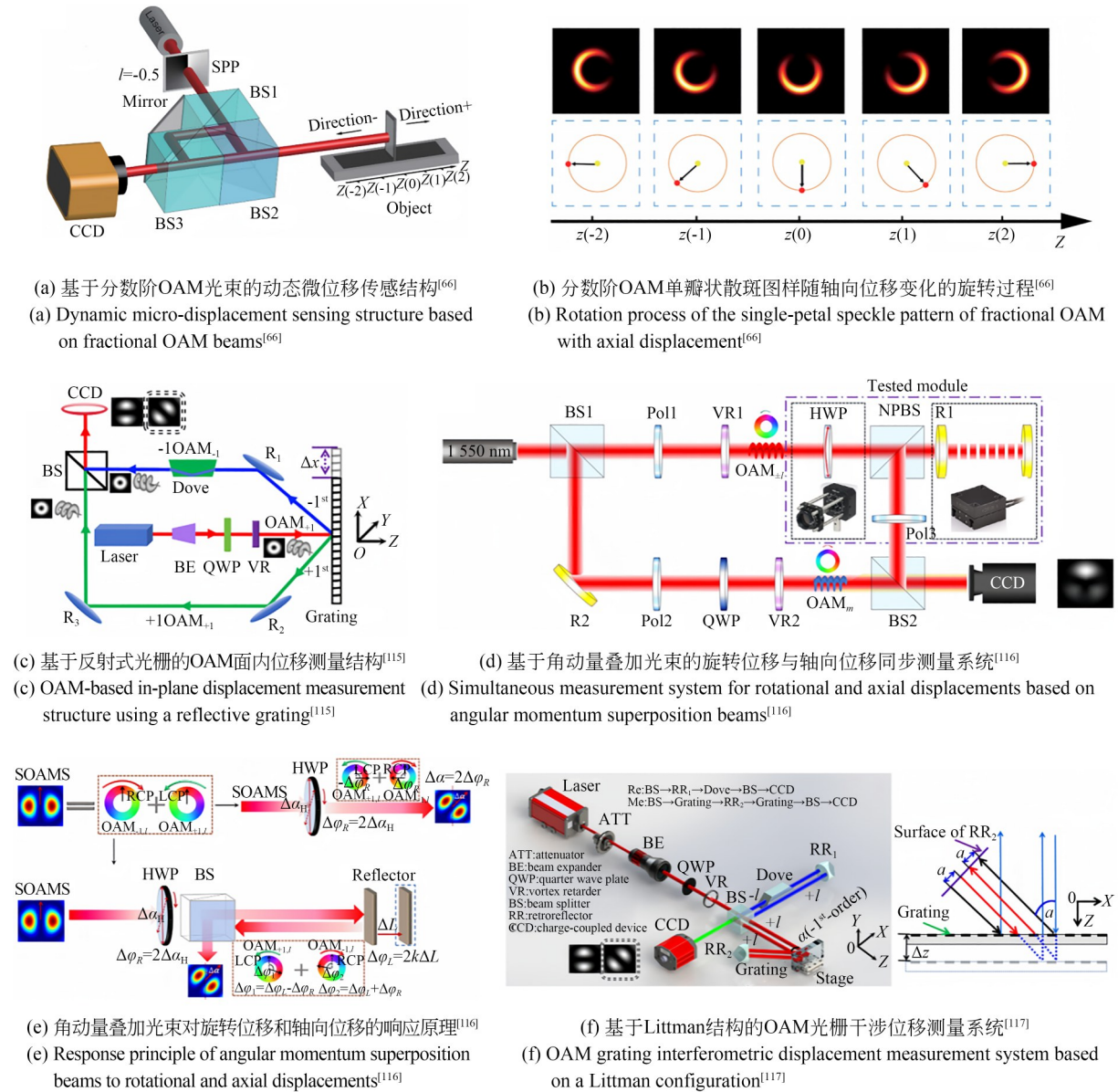


图 14 基于涡旋光面向多自由度测量的方法

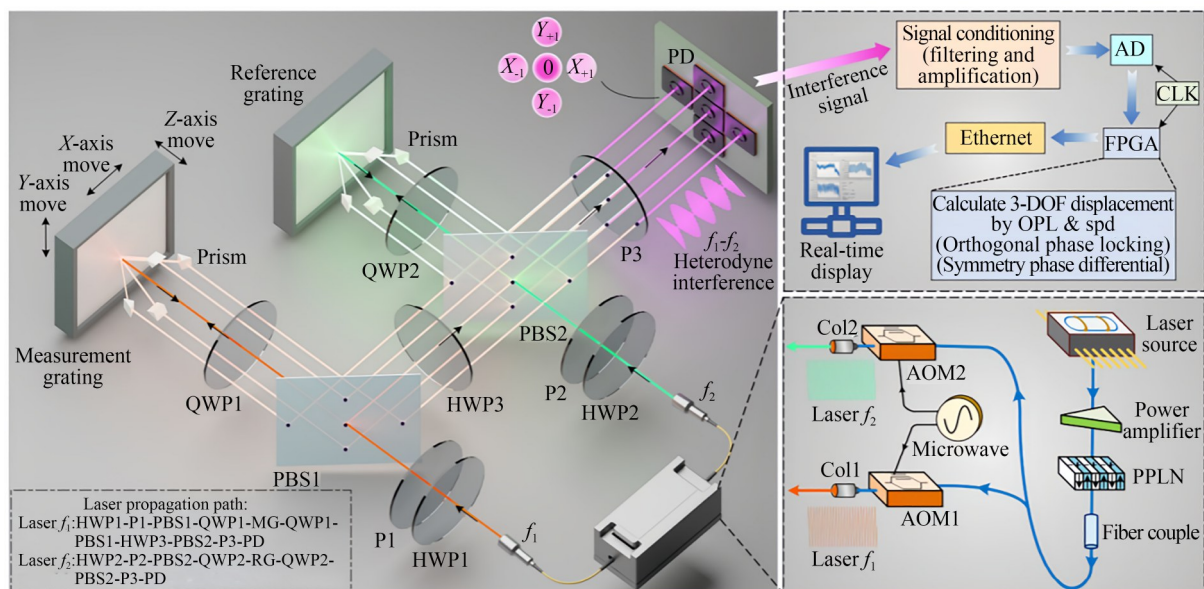
Fig. 14 Methods for multi-degree-of-freedom measurement based on vortex beams

2025 年,清华大学 Li 等^[118]提出零死区集成式外差光栅干涉仪,实现三自由度位移测量(图 15(a))。该系统采用双频激光与二维反射光栅,同步获取 X、Y、Z 三向位移信息;通过零死区光路结构抑制激光频率波动与空气折射率变化引

入的误差,结合串扰误差分析模型(图 15(b))与补偿算法将串扰误差降至 5% 以下。系统 X/Y 向分辨率 0.25 nm, Z 向分辨率 0.3 nm;1 000 nm 位移下三轴重复性均为 0.8 nm,面内测量范围超 10 mm,轴向量程超 2 mm。该工作虽

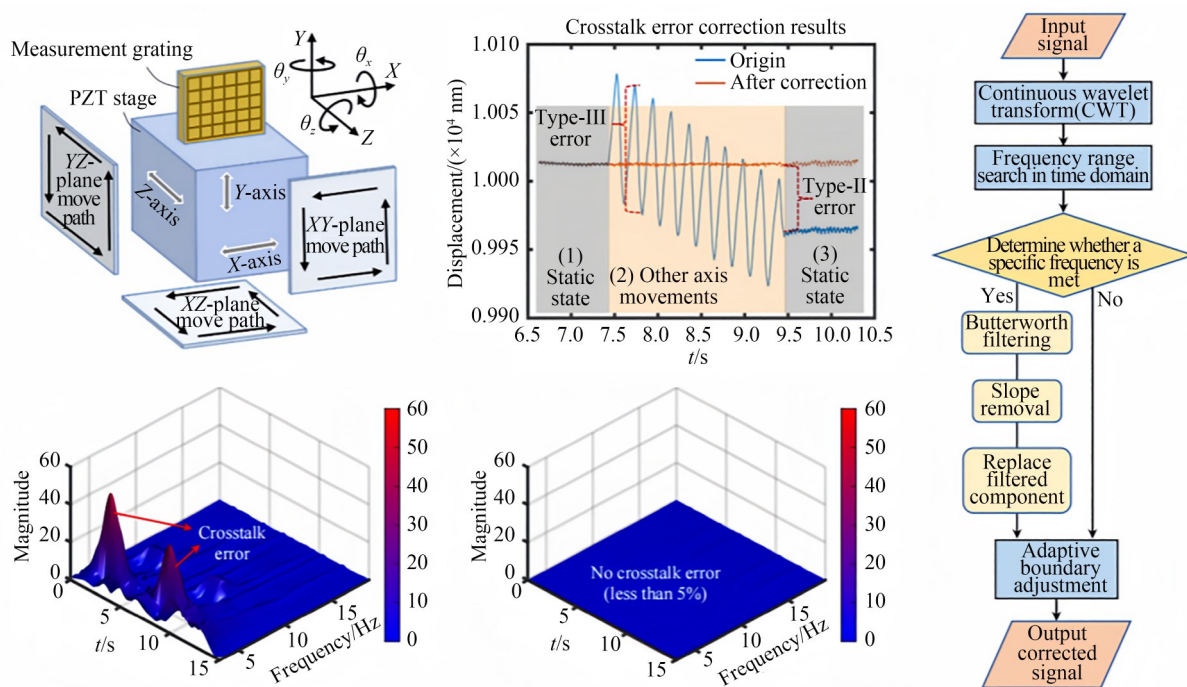
不属于涡旋光干涉体系,但其多自由度同步测量、串扰误差补偿与集成化光路设计的思路,对

OAM 多维测量系统的发展具有重要参考价值。



(a) 三自由度外差光栅干涉测量系统框架

(a) System framework of the three-degree-of-freedom heterodyne grating interferometric measurement system



(b) 多轴位移测量中的串扰误差分析、校正结果及补偿流程

(b) Crosstalk error analysis, correction results, and compensation workflow in multi-axis displacement measurement

图 15 零死区集成式外差光栅干涉仪及其串扰误差补偿方法^[118]

Fig. 15 Zero-dead-zone integrated heterodyne grating interferometer and its crosstalk error compensation method^[118]

总体而言,涡旋光干涉的螺旋相位特性与模式正交性为多维信息编码提供了新维度,但当前多维测量仍面临自由度串扰、解耦误差、多参数测量对探测器性能要求高、仅能实现有限参数同步测量等问题。未来进一步融合 OAM 模式复用、光栅多自由度编码、共光路干涉结构与实时解调算法,将推动共轭涡旋光干涉从单轴位移测量向多自由度、高稳定、高集成的测量系统发展。

4 涡旋光曲面位移测量系统

现有共轭涡旋光位移测量多针对平面刚体运动,位移信息可由整体旋转角或单点相位表征;但外力加载、热效应等引发的非均匀表面位移,难以通过传统整体解调方法反映区域差异。因此,深入研究涡旋光干涉的相位、径向结构与花瓣调制特征,实现非平面表面的分布式位移测量,成为该领域应用研究的重要方向。

2023 年,合肥工业大学 Dong 等^[119]提出载波涡旋光干涉方法,针对轴对称表面动态位移开展系统数值研究(图 16(a))。该方案在干涉输出端引入旋转斩波器与点探测器,使静态图样生成载波频率;表面动态位移引发图样转速变化,产生相对于载波的多普勒频移:均匀位移对应单一频谱峰,轴对称非均匀位移下高阶 LG 光束的多环结构使频移分裂为多峰,分别对应不同径向位置的形变速度,经时间积分可恢复位移场。研究同时分析了表面倾斜、横向偏移等因素的影响,为实验验证奠定了理论基础。在此基础上,该团队进一步开展实验验证^[120](图 16(b)),在 1, 0.5, 0.2 $\mu\text{m/s}$ 的形变速度下,相移测量相对误差均在 2.2% 以内,证实了径向位置、频谱峰与形变速度的对应关系。同年,该团队^[67]将点探测器替换为相机,通过环形分割区域实现多环独立探测(图 16(c)),直接区分不同径向位置的形变信号;在 20~86 nm/s 的形变速度内,速度测量误差为 -2.1~1.1 nm/s,500 nm 形变幅度下轮廓测量误差小于 2.5 nm。此外, Dong 等^[68]将该思路拓展至激光诱导热镜的动态三维形貌测量(图 16(d)),采用高阶共轭 LG 光束生成多环花瓣图样,通过方位相位谱分析提取各半径处的角向相移,重建随时间演化的三

维热镜形貌。

上述方法均面向轴对称形变场景,依赖光束与形变中心的精准对准及径向信号分离;当被测表面为非轴对称自由曲面时,反射波前像差会使干涉图样严重畸变,传统转角解调方法失效。针对该问题,安徽大学 Zhang 等^[69]提出涡旋相位自适应莫尔方法,用于任意连续自由曲面的微位移测量。该方法预先记录加载涡旋相位与载波相位的曲面波前干涉图,实测时仅保留载波相位采集位移前后干涉图,经与预记录图像点乘、频域滤波后生成规则莫尔探针图样(图 17(a)),将复杂曲面的非规则条纹变化转化为探针旋转角提取(图 17(b))。实验测得方案灵敏度达 0.6 nm,测量误差 0.06 nm,不确定度 0.22 nm,有效规避了自由曲面干涉条纹计数与相位展开的难题。但该方法精度受曲面偏离平面的程度制约,形貌或位移范围过大时,预记录波前与实测波前的差异会引发莫尔探针畸变。

因此,非平面位移测量的关键在于如何在波前畸变和图样不规则的条件下,获得稳定且可解调的位移表征信息。轴对称形变测量侧重于利用径向分布特征区分不同区域的位移响应,自由曲面测量则通过构造规则化的莫尔探针降低复杂条纹解调难度。未来,该方向仍需进一步解决复杂曲面适应性、动态测量稳定性和实时解调能力等问题,提高涡旋光干涉在非理想表面位移测量中的实用性。

5 总结与展望

本文系统综述了共轭涡旋光干涉技术在超精密位移测量领域的研究进展。基于 OAM 涡旋光束独特的螺旋相位与共轭拓扑荷可控调控特性,可构建具备角向相位梯度与旋转响应特性的结构化干涉光场,将微位移引发的微弱相位变化转化为可精准解调的图样旋转、光强分布演变等特征信号。相较于传统光学干涉技术,共轭涡旋光干涉有效拓宽了位移信息编码维度,在测量灵敏度提升、无歧义量程拓展、多物理量解耦检测等方面具备显著物理优势,推动涡旋光场调控技术从基础光学研究逐步落地于超精密光学计量场景,为高性能位移传感技术发展提供了参考。

目前,共轭涡旋光干涉位移测量技术已在高

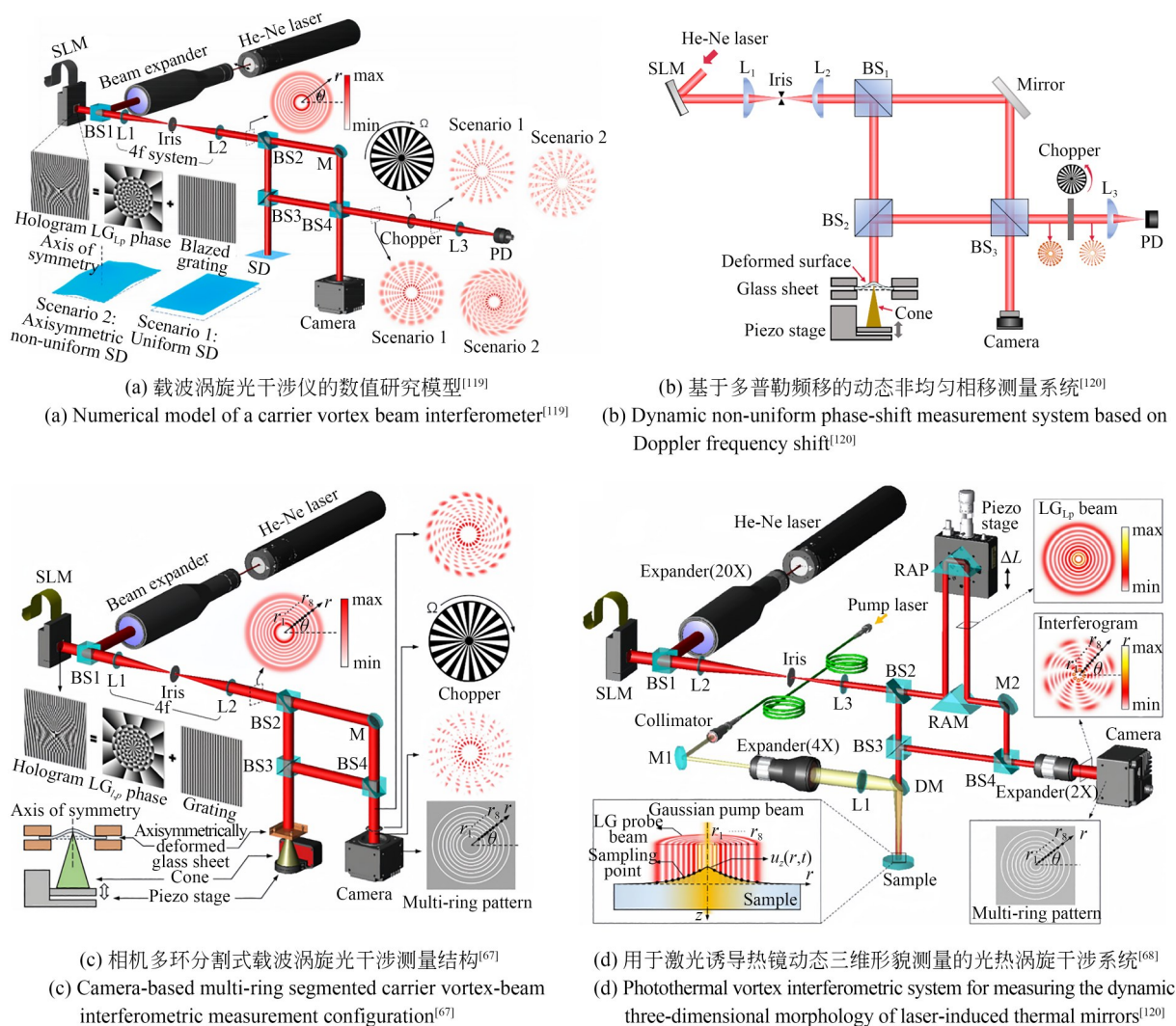


图 16 涡旋光干涉技术用于动态轴对称位移测量的方法

Fig. 16 Methods of vortex beam interferometry for dynamic axisymmetric displacement measurement

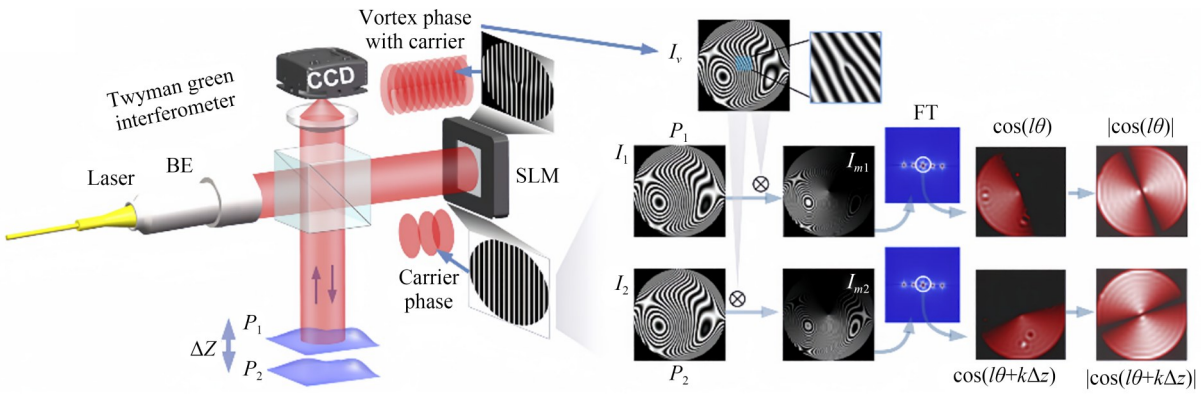
精度、多维度、动态化测量领域取得阶段性突破,但在测量性能协同优化、系统稳定性、工程场景适配性等方面仍存在诸多瓶颈,制约了技术的规模化实用化。结合现有研究进展,未来该领域可重点从性能优化、算法赋能、系统集成三个维度开展突破研究:

(1) 多性能协同优化,突破精密测量性能制衡瓶颈。当前技术普遍存在测量精度、量程与动态响应难以兼顾的问题,高拓扑荷光束虽可提升位移-转角响应灵敏度,但易造成光斑畸变、有效探测区域缩减;周期计数、多波长扩程等技术虽能拓展测量量程,却对成像采集速率、信号连续性提出严苛要求。

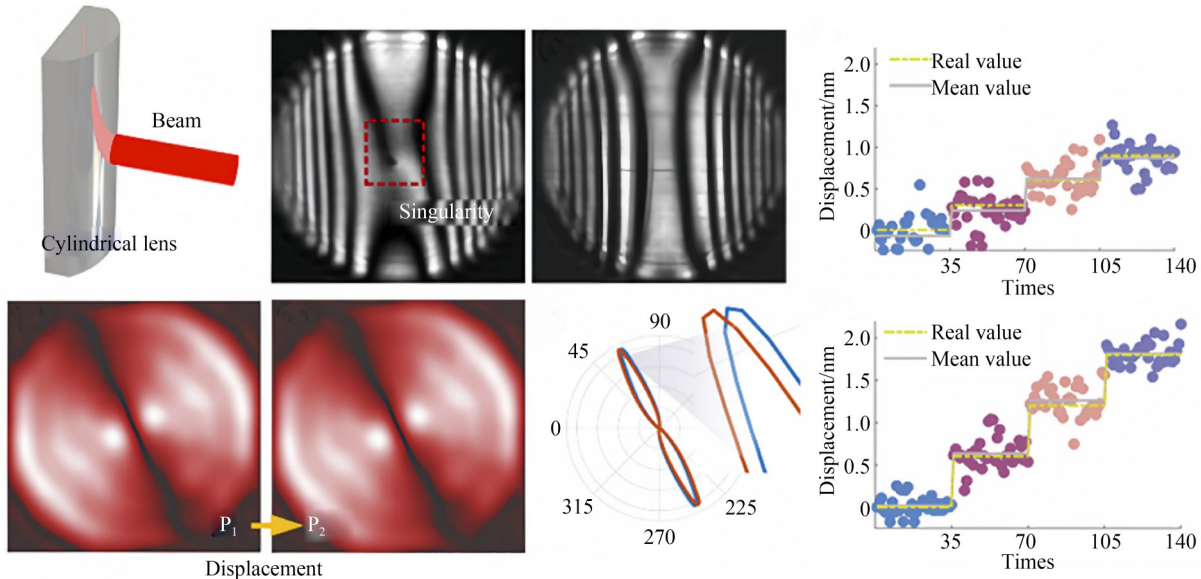
未来需依托涡旋光场结构优化、多环光场复

用、光学放大光路设计等手段,破解精度、量程、测速三者的制衡关系,同时完善多源误差传递理论模型,针对性补偿光轴失准、环境扰动、探测噪声引入的解调误差,实现高精度、大量程、高动态响应的协同提升。

(2) 智能算法赋能,拓展多维复杂场景测量能力。现有解调技术多适配单轴、静态、规则表面位移测量,面对多自由度运动、动态微振动、非均匀曲面形变等复杂场景,易出现多物理量耦合串扰、图样畸变解调失效等问题。未来可推进光学物理模型与机器视觉、数据融合、深度学习算法的深度结合,构建兼具物理可解释性与抗干扰能力的智能解调体系,实现多自由度位移、形变、振动等多参量同步解耦测量,大幅提升算法的实



(a) 自适应莫尔方法的原理示意图
(a) Schematic diagram of the adaptive Moiré method



(b) 曲面位移测量实验结果
(b) Experimental results of curved-surface displacement measurement

图 17 基于涡旋相位的自适应莫尔自由曲面微位移测量方法^[69]

Fig. 17 Vortex phase-based adaptive Moiré method for micro-displacement measurement of freeform surfaces^[69]

时性、稳定性与跨场景适配能力。

(3) 结构集成化升级,推动技术工程化与产业化应用。传统涡旋光干涉系统存在光路繁琐、装调难度大、环境适应性弱等问题,难以满足工业精密制造、装备状态监测等实际场景需求。未来需聚焦光路紧凑化、器件集成化发展,依托超表面、光纤光栅等微纳器件替代传统体光学组件,结合自校准、抗扰动优化设计,构建小型化、高稳定、易集成的涡旋光干涉测量系统,逐步实现从实验室原理验证到工业在线检测、微纳精密传感的工程化落地。

共轭涡旋光干涉测量是结构化光场赋能超

精密计量的核心技术之一,正处于性能迭代升级、场景持续拓展、系统集成优化的关键发展阶段。通过创新光场调控新机理、发展智能解调新算法、搭建集成化测量新系统,该技术有望彻底突破传统干涉测量的性能局限,在微纳定位、精密制造、复杂表面检测、高端装备状态感知等领域形成核心技术优势,为新一代高精度、多维度、集成化光学测量体系的构建提供重要支撑。

作者贡献声明:

任凯利:论文构思与撰写,文献和数据整理,项目管理,提供资源;

杜 艺:文献和数据整理,实验设计及分析;
段玉婷、徐咏:数据管理;
李思奇:论文修改,提供资源;

刘继红:论文审核,项目管理,提供资源;
王国玺:论文指导,项目管理。

参考文献:

- [1] BARBOZA R, BABAZADEH A, MARRUCCI L, *et al.* Ultra-sensitive measurement of transverse displacements with linear photonic gears[J]. *Nature Communications*, 2022, 13: 1080.
- [2] SHANG Y J, QIAO S Y, GUO Y H, *et al.* Ultra-sensitive vector displacement measurement based on pancharatnam-berry phase optical element[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2025, 19(23): e00741.
- [3] KIM J, LEE S, CHUN H, *et al.* Compact curved-edge displacement sensor-embedded spindle system for machining process monitoring [J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2021, 64: 1255-1260.
- [4] YU K N, ZHU J H, YUAN W H, *et al.* Two-channel six degrees of freedom grating-encoder for precision-positioning of sub-components in synthetic-aperture optics[J]. *Optics Express*, 2021, 29(14): 21113.
- [5] BÄUERLEIN J, CARTER J J, HEINZEL G, *et al.* Remote displacement sensing by decoupling a compact sensing head from a heterodyne Michelson interferometer[J]. *Optics Letters*, 2025, 50(23): 7340-7343.
- [6] JIA W X, on behalf of LIGO O Detector Author List. Broadband quantum enhancement of the LIGO detectors with frequency-dependent squeezing [C]. *Frontiers in Optics + Laser Science 2023 (FiO, LS)*. Tacoma, Washington. Optica Publishing Group, 2023: JT7B. 5.
- [7] ABBOTT B P, ABBOTT R, ABBOTT T D, *et al.* Observation of gravitational waves from a binary black hole merger [J]. *Physical Review Letters*, 2016, 116(6): 061102.
- [8] SHIMIZU Y, CHEN L C, KIM D W, *et al.* An insight into optical metrology in manufacturing [J]. *Measurement Science and Technology*, 2021, 32(4): 042003.
- [9] HASEGAWA S, FUJIMOTO M, ATSUMI T, *et al.* In-process monitoring in laser grooving with line-shaped femtosecond pulses using optical coherence tomography[J]. *Light: Advanced Manufacturing*, 2022, 3(3): 427-436.
- [10] LIAO C Y, LIN H H, CHEIN W H, *et al.* Miniaturized laser interferometer using dynamic current-wavelength modulation for high precision displacement measurement [J]. *Measurement Science and Technology*, 2025, 36(1): 015040.
- [11] HELL S W. Far-field optical nanoscopy [J]. *Science*, 2007, 316(5828): 1153-1158.
- [12] ZHOU L J, WANG X Z, LI Z L, *et al.* Wafer alignment measurement in lithography systems based on vortex beam interference [J]. *Optics Express*, 2025, 33(22): 47218.
- [13] STAUFFENBERG J, ORTLEPP I, BELKNER J, *et al.* Measurement precision of a planar nanopositioning machine with a range of motion of Ø100 mm[J]. *Applied Sciences*, 2022, 12(15): 7843.
- [14] ARMANO M, AUDLEY H, BAIRD J, *et al.* Sensor noise in LISA pathfinder: in-flight performance of the optical test mass readout [J]. *Physical Review Letters*, 2021, 126(13): 131103.
- [15] YANG Y C, YAMAMOTO K, DOVALE ÁLVAREZ M, *et al.* On-axis optical bench for laser ranging instruments in future gravity missions [J]. *Sensors*, 2022, 22(5): 2070.
- [16] SHAO L, GOKHALE V J, PENG B, *et al.* Femtometer-amplitude imaging of coherent super high frequency vibrations in micromechanical resonators [J]. *Nature Communications*, 2022, 13: 694.
- [17] FOGLIANO F, BESGA B, REIGUE A, *et al.* Ultrasensitive nano-optomechanical force sensor operated at dilution temperatures[J]. *Nature Communications*, 2021, 12: 4124.
- [18] SUDHAKAR S, ABDOSAMADI M K, JACHOWSKI T J, *et al.* Germanium nanospheres for ultraresolution picotensiometry of kinesin motors[J]. *Science*, 2021, 371(6530): eabd9944.
- [19] SHRESTHA P, YANG D, TOMOV T E, *et al.* Single-molecule mechanical fingerprinting with DNA nanoswitch calipers[J]. *Nature Nanotechnology*

- ogy, 2021, 16(12): 1362-1370.
- [20] ZANG H F, XI Z, ZHANG Z Y, *et al.* Ultrasensitive and long-range transverse displacement metrology with polarization-encoded metasurface [J]. *Science Advances*, 2022, 8(41): eadd1973.
- [21] ZANG H F, ZHANG Z Y, HUANG Z T, *et al.* High-precision two-dimensional displacement metrology based on matrix metasurface [J]. *Science Advances*, 2024, 10(2): eadk2265.
- [22] 国务院. 计量发展规划(2021-2035年) [EB/OL]. (2022-01-28) [2026-07-10]. https://www.gov.cn/zhengce/content/2022-01/28/content_5670947.htm.
The State Council of the People's Republic of China. Metrology development plan (2021-2035) [EB/OL]. (2022-01-28) [2026-07-10]. https://www.gov.cn/zhengce/content/2022-01/28/content_5670947.htm. (in Chinese)
- [23] WOO S, JEONG H, CHOI J, *et al.* Machine-learning-based compact modeling for sub-3-nm-node emerging transistors [J]. *Electronics*, 2022, 11(17): 2761.
- [24] BOUKORTT NEL I, STROOBANDT D. Modeling and optimization of CFET structures for sub-3 nm CMOS scaling [J]. *Micro and Nanostructures*, 2026, 210: 208506.
- [25] ZHOU L J, WANG X Z, LI Z L, *et al.* Design method for wafer alignment marks with low alignment position deviation under process-induced asymmetry [J]. *Applied Optics*, 2025, 64(30): 8921-8929.
- [26] JIANG M, YAO M Y, SONG G L, *et al.* Investigation and application of key alignment parameters for overlay accuracy in 3D structures [J]. *Micro machines*, 2025, 16(8): 876.
- [27] SHARMA DDAS, PASDAST G, TIAGARAJ S, *et al.* High-performance, power-efficient three-dimensional system-in-package designs with universal chiplet interconnect express [J]. *Nature Electronics*, 2024, 7(3): 244-254.
- [28] OH J, SON J, YOON C, *et al.* Ultra-wide-field imaging Mueller matrix spectroscopic ellipsometry for semiconductor metrology [J]. *Nature Communications*, 2025, 16: 8512.
- [29] YE R F, ZENG J R, ZHANG H Y, *et al.* Rapid full-field surface topography measurement of large-scale wafers using interferometric imaging [J]. *Photonics*, 2025, 12(9): 835.
- [30] HASHIMOTO T, YAN J W. Feedforward compensation of dynamics-induced form errors in high-speed diamond turning of freeform surfaces using a long-stroke fast tool servo [J]. *Nanomanufacturing and Metrology*, 2025, 8(1): 31.
- [31] SMETANA J, WALTERS R, BAUCHINGER S, *et al.* Compact Michelson interferometers with subpicometer sensitivity [J]. *Physical Review Applied*, 2022, 18(3): 034040.
- [32] HUANG X Q, WANG G F, YANG M L, *et al.* Study on picometer-level laser interferometer readout system in TianQin project [J]. *Optics & Laser Technology*, 2023, 161: 109185.
- [33] XU X, LIU H S, TAN Y D. Verification of laser heterodyne interferometric bench for Chinese spaceborne gravitational wave detection missions [J]. *Research*, 2024, 7: 0302.
- [34] YUAN S, SUN G K, YU K, *et al.* In-orbit thermal deformation monitoring for composite laminated structures of remote sensing satellites using temperature self-decoupling fiber optical system and inverse finite element method [J]. *Applied Physics B*, 2024, 130(3): 45.
- [35] KANG H, LEE J, KIM Y J, *et al.* Phase-locked synthetic wavelength interferometer using a femtosecond laser for absolute distance measurement without cyclic error [J]. *Sensors*, 2023, 23(14): 6253.
- [36] LI R M, TIAN H C, LIU Y, *et al.* High-precision absolute distance measurement by cascaded synthetic wavelength interferometry using a single electro-optic frequency comb [J]. *Optics Express*, 2025, 33(5): 10528.
- [37] YAN L P, XIE J D, CHEN B Y, *et al.* Absolute distance measurement using laser interferometric wavelength leverage with a dynamic-sideband-locked synthetic wavelength generation [J]. *Optics Express*, 2021, 29(6): 8344.
- [38] ZHANG S H, LOU Y T, ZHOU Y J, *et al.* Self-correction of air refractive index in distance measurement using two-color sinusoidal phase modulating interferometry [J]. *Optics Communications*,

- 2022, 505: 127521.
- [39] WANG Y F, XU X, DAI Z R, *et al.* Frequency-swept feedback interferometry for noncooperative-target ranging with a stand-off distance of several hundred meters[J]. *Photonix*, 2022, 3(1): 21.
- [40] LUO L B, CAO F F, WANG S T, *et al.* Design and demonstration of a large range precision grating sensor for simultaneous measurement of out-of-plane motions [J]. *Measurement*, 2025, 249: 116799.
- [41] ZHU J W, JIA Y S, LI M M, *et al.* A paper-based self-inductive folding displacement sensor for human respiration and motion signals measurement [J]. *npj Flexible Electronics*, 2022, 6: 67.
- [42] LIU X K, HUANG R, YU Z C, *et al.* A high-accuracy capacitive absolute time-grating linear displacement sensor based on a multi-stage composite method[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2021, 21(7): 8969-8978.
- [43] DOU C, WANG W B, LI H, *et al.* Design of a full-range capacitive sensor extensometer using a high-precision ultrasonic motor [J]. *Sensors*, 2025, 25(4): 1012.
- [44] HE Q, FAN S X, CHEN N, *et al.* Analysis of inductive displacement sensors with large range and nanoscale resolution[J]. *Applied Sciences*, 2021, 11(21): 10134.
- [45] AKSOY B, HAO Y F, GRASSO G, *et al.* Shielded soft force sensors [J]. *Nature Communications*, 2022, 13: 4649.
- [46] KURNYTA-MAZUREK P, KURNYTA A. The influence of magnetic field of AMB on eddy-current sensor operation [J]. *Sensors*, 2023, 23(4): 2332.
- [47] 赵冬城,王思育,马亚云,等. 基于涡旋光与球面波干涉的微位移测量研究[J]. 红外与激光工程, 2020, 49(4): 0413005.
- ZHAO D E, WANG S Y, MA Y Y, *et al.* Measurement of micro-displacement based on the interference of vortex beams and spherical wave[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(4): 0413005. (in Chinese)
- [48] 袁涛,刘吉,武锦辉,等. 基于涡旋光相移干涉的高精度微测量技术研究[J]. 半导体光电, 2025, 46(4): 722-726.
- YUAN T, LIU J, WU J H, *et al.* High-precision non-contact micro-measurement technique based on vortex light [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2025, 46(4): 722-726. (in Chinese)
- [49] 韩世泽,杨栋,胡晓宁,等. 基于涡旋光与平面波干涉的微位移测量[J]. 光学精密工程, 2022, 30(17): 2058-2066.
- HAN SH Z, YANG D, HU X N, *et al.* Micro-displacement measurement based on interference of vortex beams and plane wave[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2022, 30(17): 2058-2066. (in Chinese)
- [50] HE X L, DOU J T, HU Y Y, *et al.* Large displacement measurement with cycle-free counting and high precision based on vortex beam interference [J]. *Optics Communications*, 2025, 582: 131599.
- [51] EMILE O, EMILE J. Naked eye picometer resolution in a Michelson interferometer using conjugated twisted beams [J]. *Optics Letters*, 2017, 42(2): 354-357.
- [52] JIA Q K, QIU X D, WU Z W, *et al.* Transferring linear motion of an optical wedge to rotational frequency shift in an orbital angular momentum interferometer [J]. *Applied Physics Letters*, 2017, 111(9): 091102.
- [53] VERMA G, YADAV G. Compact picometer-scale interferometer using twisted light [J]. *Optics Letters*, 2019, 44(14): 3594-3597.
- [54] PAN J, SHEN Y J, WAN Z S, *et al.* Index-tunable structured-light beams from a laser with an intracavity astigmatic mode converter [J]. *Physical Review Applied*, 2020, 14(4): 044048.
- [55] PINNELL J, RODRÍGUEZ-FAJARDO V, FORBES A. Probing the limits of orbital angular momentum generation and detection with spatial light modulators [J]. *Journal of Optics*, 2021, 23(1): 015602.
- [56] 杨启航,李盼,杨焱,等. 空间光调制器模拟光栅产生高阶和分数阶涡旋光束[J]. 光学精密工程, 2023, 31(19): 2809-2817.
- YANG Q H, LI P, YANG H, *et al.* Generation of high-order and fractional vortex beams using gratings simulated by spatial light modulators [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2023, 31(19): 2809-2817. (in Chinese)

- [57] COUDRAT L, BOULLIARD G, GÉRARD J M, *et al.* Unravelling the nonlinear generation of designer vortices with dielectric metasurfaces [J]. *Light: Science & Applications*, 2025, 14: 51.
- [58] MEI F, QU G Y, SHA X B, *et al.* Cascaded metasurfaces for high-purity vortex generation [J]. *Nature Communications*, 2023, 14: 6410.
- [59] DORRAH A H, CAPASSO F. Tunable structured light with flat optics [J]. *Science*, 2022, 376 (6591): eabi6860.
- [60] YU X, LI H R, ZHANG Z T, *et al.* Micro-displacement measurement of optical interference with two-ring conjugated vortices [J]. *Laser Physics*, 2024, 34(10): 105401.
- [61] ZHANG B Y, LIU J, WU J H. Triple-subdivision vortex beam interferometer for precision displacement measurement [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2025, 194: 109128.
- [62] ZHANG L, CAO J Q, WU S Y, *et al.* From concept to reality: computing visual vortex beam interferometer for displacement measurement [J]. *Optics Letters*, 2022, 47(21): 5449-5452.
- [63] REN K L, ZHANG H Y, JIA A C, *et al.* Wide-range nano-displacement measurement *via* dual-wavelength interferometry with an ultra-broadband OAM converter [J]. *Optics Express*, 2025, 33 (22): 46739.
- [64] 夏豪杰, 谷容睿, 潘成亮, 等. 涡旋光位移干涉测量方法与信号处理 [J]. *光学精密工程*, 2020, 28 (9): 1905-1912.
- XIA H J, GU R R, PAN C H L, *et al.* Signal processing method for displacement measurement in interferometry using vortex beams [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(9): 1905-1912. (in Chinese)
- [65] ZHAO H, XU J Y, HUANG X H, *et al.* Azimuthal phase-shifting demodulation method for orbital-angular-momentum interferometer [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2024, 36 (5): 321-324.
- [66] ZHU J L, HAN F F, WANG L, *et al.* Fractional orbital angular momentum sensor for dynamic micro-displacement [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2024, 42(5): 1689-1695.
- [67] DONG J T, XIE L Y, WANG S, *et al.* Carrier optical vortex interferometer using segmentation demodulation method for dynamic measurement of axisymmetric surface deformation [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2023, 94(8): 083002.
- [68] DONG J T, LI Y Y, ZHAO E X, *et al.* Three-dimensional measurement of laser-induced thermal mirror dynamics using photothermal vortex interferometer with azimuthal phase spectra analysis [J]. *Measurement*, 2023, 222: 113653.
- [69] ZHANG L, WANG A X. Vortex phase-based adaptive moiré technique accommodating micro displacement measurement of freeform surfaces [J]. *Optics Letters*, 2024, 49(10): 2829-2832.
- [70] GAO H W, YANG D, HU X N, *et al.* High-precision micro-displacement measurement in a modified reversal shearing interferometer using vortex beams [J]. *Optics Communications*, 2023, 537: 129454.
- [71] ZHAO H, GUO C J, XU J Y, *et al.* Probe-type all-fiber tiny-displacement sensor based on orbital-angular-momentum interferometry [J]. *Optics Letters*, 2023, 48(20): 5209-5212.
- [72] REN K L, LI M H, ZHENG Y P, *et al.* Phase-matched metadvice for optical vortex interferometry: stable nano-displacement sensing [J]. *Optics Letters*, 2026, 51(1): 13-16.
- [73] 窦蒙豫, 刘锋伟, 吴永前, 等. 基于非线性优化自校准的皮米级涡旋光干涉测量 [J]. *光学学报*, 2026, 46(1): 0122012.
- DOU M Y, LIU F W, WU Y Q, *et al.* Picometer-level vortex beam interferometry *via* nonlinear optimization self-calibration [J]. *Acta Optica Sinica*, 2026, 46(1): 0122012. (in Chinese)
- [74] BEIJERSBERGEN M W, ALLEN L, VAN DER VEEN H E L O, *et al.* Astigmatic laser mode converters and transfer of orbital angular momentum [J]. *Optics Communications*, 1993, 96(1/2/3): 123-132.
- [75] PADGETT M, COURTIAL J, ALLEN L. Light's orbital angular momentum [J]. *Physics Today*, 2004, 57(5): 35-40.
- [76] COURTIAL J, PADGETT M J. Performance of a cylindrical lens mode converter for producing Laguerre - Gaussian laser modes [J]. *Optics Communications*, 1999, 159(1/2/3): 13-18.

- [77] HECKENBERG N R, MCDUFF R, SMITH C P, *et al.* Generation of optical phase singularities by computer-generated holograms[J]. *Optics Letters*, 1992, 17(3): 221-223.
- [78] DUFRESNE E R, SPALDING G C, DEARING M T, *et al.* Computer-generated holographic optical tweezer arrays[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2001, 72(3): 1810-1816.
- [79] TERHALLE B, LANGNER A, PÄIVÄNRANTA B, *et al.* Generation of extreme ultraviolet vortex beams using computer generated holograms[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(21): 4143-4145.
- [80] LI S X, WANG Z W. Generation of optical vortex based on computer-generated holographic gratings by photolithography[J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 103(14): 141110.
- [81] MIRHOSSEINI M, MAGAÑA-LOAIZA O S, CHEN C C, *et al.* Rapid generation of light beams carrying orbital angular momentum[J]. *Optics Express*, 2013, 21(25): 30196.
- [82] CAÑO-GARCÍA M, QUINTANA X, OTÓN J M, *et al.* Dynamic multilevel spiral phase plate generator[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8: 15804.
- [83] BEIJERSBERGEN M W, COERWINKEL R P C, KRISTENSEN M, *et al.* Helical-wavefront laser beams produced with a spiral phaseplate[J]. *Optics Communications*, 1994, 112 (5/6) : 321-327.
- [84] ZHANG Y H, WEN S L, WANG S F, *et al.* Fully continuous spiral phase plate for ultraintense optical vortices[J]. *Optics Letters*, 2023, 48(10): 2760-2763.
- [85] KHONINA S N, PODLIPNOV V V, KARPEEV S V, *et al.* Spectral control of the orbital angular momentum of a laser beam based on 3D properties of spiral phase plates fabricated for an infrared wavelength[J]. *Optics Express*, 2020, 28 (12): 18407.
- [86] JANKOWSKI T, BENNIS N, MORAWIAK P, *et al.* Optical vortices by an adaptive spiral phase plate[J]. *Optics & Laser Technology*, 2024, 176: 111029.
- [87] BAI Y H, LV H R, FU X, *et al.* Vortex beam: generation and detection of orbital angular momentum[J]. *Chinese Optics Letters*, 2022, 20 (1) : 012601.
- [88] REICHERTER M, HAIST T, WAGEMANN E U, *et al.* Optical particle trapping with computer-generated holograms written on a liquid-crystal display[J]. *Optics Letters*, 1999, 24(9): 608-610.
- [89] ZHU L, WANG J. Arbitrary manipulation of spatial amplitude and phase using phase-only spatial light modulators[J]. *Scientific Reports*, 2014, 4: 7441.
- [90] XIA T, XIE Z W, ZHANG Q, *et al.* Ultrabroadband, achromatic, and non-diffracting perfect optical vortex generation *via* radial momentum control in dielectric metasurfaces[J]. *Nature Communications*, 2025, 16: 11610.
- [91] QIN J, JIANG S B, WANG Z S, *et al.* Metasurface micro/nano-optical sensors: principles and applications[J]. *ACS Nano*, 2022, 16(8): 11598-11618.
- [92] FELDMAN N, GOELOE K M M, DEN BOEF A J, *et al.* Nanometer interlaced displacement metrology using diffractive pancharatanam-berry and detour phase metasurfaces [J]. *ACS Photonics*, 2024, 11(12): 5229-5238.
- [93] DENG Z L, DENG J H, ZHUANG X, *et al.* Facile metagrating holograms with broadband and extreme angle tolerance[J]. *Light: Science & Applications*, 2018, 7: 78.
- [94] 禹忠, 赵泰琳, 石力. 一种产生轨道角动量涡旋电磁波的透射超表面[J]. 西安邮电大学学报, 2023, 28(3): 21-29.
- YU ZH, ZHAO T L, SHI L. Orbital angular momentum vortex electromagnetic waves generated by transmission metasurface[J]. *Journal of Xi'an University of Posts and Telecommunications*, 2023, 28(3): 21-29. (in Chinese)
- [95] SU V C, CHIANG C H, CHEN M H, *et al.* Metasurface-based perfect vortex beam for optical eraser[J]. *Communications Physics*, 2024, 7: 36.
- [96] ZHANG Y C, LIU W W, GAO J, *et al.* Generating focused 3D perfect vortex beams by plasmonic metasurfaces [J]. *Advanced Optical Materials*, 2018, 6(4): 1701228.
- [97] ZHAO A R, PHAM A, DREZET A. Plasmonic fork-shaped hologram for vortex-beam generation and separation[J]. *Optics Letters*, 2021, 46(3):

- 689-692.
- [98] SHI Z J, KHORASANINEJAD M, HUANG Y W, *et al.* Single-layer metasurface with controllable multiwavelength functions [J]. *Nano Letters*, 2018, 18(4): 2420-2427.
- [99] DEVLIN R C, AMBROSIO A, RUBIN N A, *et al.* Arbitrary spin-to-orbital angular momentum conversion of light [J]. *Science*, 2017, 358 (6365): 896-901.
- [100] 胡晓宁, 杨栋, 杨忠明, 等. 共轭涡旋光干涉精密位移测量方法与系统[J]. 光学学报, 2023, 43 (2): 0212001.
- HU X N, YANG D, YANG ZH M, *et al.* Method and system for precision displacement measurement with interference of conjugated vortex beams [J]. *Acta Optica Sinica*, 2023, 43 (2) : 0212001. (in Chinese)
- [101] REN K L, ZHANG H Y, JIA A C, *et al.* Chiral long-period fiber grating based conjugate vortex beam interference for nano-displacement measurement [J]. *Optics & Laser Technology*, 2025, 192: 113601.
- [102] LU H L, HAO Y Y, GUO C J, *et al.* Nano-displacement measurement system using a modified orbital angular momentum interferometer [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2022, 58 (2): 7500105.
- [103] LU H L, HUANG X H, GUO C J, *et al.* Orbital-angular-momentum beams-based Fizeau interferometer using the advanced azimuthal-phase-demodulation method [J]. *Applied Physics Letters*, 2022, 121(24): 241102.
- [104] DONG J T, ZHANG T D, ZHANG Y Z, *et al.* Picometer-scale optical vortex interferometer using azimuthal complex spectrum analysis [J]. *Optics Letters*, 2023, 48(11): 2885-2888.
- [105] NI L L, XIA H J, XU F F, *et al.* Picometer-scale OAM interferometry using an adaptive polar transform algorithm [J]. *Optics Express*, 2024, 32(23): 40227.
- [106] NI L L, YU X, LI W S, *et al.* Picometer-displacement measurements with global phase demodulation method using OAM interferometer [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2025, 74: 7510610.
- [107] YUAN T, LIU J, WU J H, *et al.* Advanced vortex beam interference system enhanced by CNN for micro-displacement detection [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2025, 191: 108987.
- [108] LI Y C, ZHANG J Y. Radial-shearing interferometry for phase LC-SLM calibration with a pair of conjugated vortex beams [J]. *Journal of Optics*, 2020, 22(2): 025604.
- [109] 杨雪娇, 刘吉, 武锦辉, 等. 深度学习融合模型共轭涡旋光干涉微位移测量[J]. 光学精密工程, 2025, 33(15): 2331-2341.
- YANG X J, LIU J, WU J H, *et al.* Conjugate vortex beam interferometry for micro-displacement measurement with deep learning fusion architecture [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2025, 33(15): 2331-2341. (in Chinese)
- [110] 赵秉义, 赵冬娥, 马亚云, 等. 共轭涡旋光干涉位移测量拓扑荷优化实验研究[J]. 光电子技术, 2023, 43(1): 11-16.
- ZHAO B Y, ZHAO D E, MA Y Y, *et al.* Experimental study on topological charge optimization for displacement measurement with conjugated vortex beams interferometry [J]. *Optoelectronic Technology*, 2023, 43(1): 11-16. (in Chinese)
- [111] ZHU J L, WANG L, JI J Y, *et al.* Real-time measurement of dynamic micro-displacement and direction using light's orbital angular momentum [J]. *Applied Physics Letters*, 2022, 120 (25) : 251104.
- [112] ZHANG L, YU B L. Virtual orbital angular momentum-based phase clock [J]. *Optica*, 2024, 11 (10): 1468-1477.
- [113] 吕佳浩, 王龙龙, 张嘉祚, 等. 基于涡旋光束自共轭干涉的高精度大量程位移测量系统[J]. 激光与光电子学进展, 2026, 63(13): 1312001.
- LÜ J H, WANG L L, ZHANG J Z, *et al.* High-precision and large-range displacement measurement system based on self-conjugate interference of vortex beams [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2026, 63(13): 1312001. (in Chinese)
- [114] YANG D, YANG Z M, ZHANG Y F. Wavefront-splitting interferometer based on orbital angular momentum beams [J]. *Optics Express*, 2023, 31(18): 28954.
- [115] XIE Z W, WANG Y H, SUN R Q, *et al.* Orbit-

- al angular momentum beam-based interferometry for an in-plane displacement measurement [J]. *Optics Letters*, 2024, 49(18): 5131-5134.
- [116] LU H L, WANG P, GAO M, *et al.* Angular momentum superposition beams-based interferometer [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2025, 19(8): 2401769.
- [117] XIE Z W, LI Q Y, SUN R Q, *et al.* Nano-displacement measurement using a Littman-configured interferometer based on orbital angular momentum beams [J]. *Optics Express*, 2025, 33(26): 54128.
- [118] CUI C, GAO L Y, ZHAO P B, *et al.* Towards multi-dimensional atomic-level measurement: integrated heterodyne grating interferometer with zero dead-zone [J]. *Light: Advanced Manufacturing*, 2025, 6(2): 319.
- [119] DONG J T, HOOSHMAND H, LIU M Y, *et al.* Dynamic surface displacement measurement using carrier optical vortex interferometer: a numerical study [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2023, 171: 107824.
- [120] DONG J T, TIAN Z P, WANG S, *et al.* Dynamic non-uniform phase shift measurement via Doppler frequency shift in vortex interferometer [J]. *Optics Letters*, 2023, 48(8): 2018-2021.

作者简介:



任凯利(1989—),男,陕西西安人,博士,副教授,2017年于西安交通大学获得博士学位,主要从事光场调控、光学测量方面的研究。E-mail: renkaili@xupt.edu.cn

通讯作者:



王国玺(1987—),男,陕西铜川人,研究员,博士生导师,主要从事光学超表面与超透镜、表面等离子激元的研究。E-mail: wangguoxi@opt.cn