

超精密嵌入式微探头激光干涉测量技术研究

董祎嗣, 骆文瑞, 张晨, 张金然, 李雯雯, 胡鹏程

(哈尔滨工业大学仪器科学与工程学院, 哈尔滨 150000)

摘要: 微探头传感器式激光干涉仪是新一代超精密激光干涉测量仪器的代表, 与传统激光干涉仪相比, 具有探头尺寸极小、装调方便、可隔离热污染和易实现嵌入式测量等显著优势, 在掩模板滑移检测、高端测量装备内部元件位移检测、材料形变测量和科学研究等嵌入式位移测量场合具备极大潜力。这项研究分别从微探头干涉测量原理、测量基准和测量误差三方面展开, 突破微探头式高分辨力大量程干涉测量、大范围高带宽调频下高精度稳频、信号解调周期非线性误差消除的关键理论和核心技术, 解决了“测不了”、“测不准”、“测不精”的三大技术难题, 实现并搭建了完整的高精度微探头式激光干涉仪, 以支撑装备制造中的传感式超精密测量需求, 为我国高端装备集成研发提供嵌入式在线测量手段, 为纳米计量测试提供核心仪器。

关键词: 光纤微探头干涉; 大量程高分辨力; 调谐光源稳频; 周期非线性消除

中图分类号: TP212

文献标识码: A

Research on Ultra-Precision Embedded Microprobe Laser Interferometry Technology

Dong Yisi, Luo Wenrui, Zhang Chen, Zhang Jinran, Li Wenwen, Hu Pengcheng

(School of Instrumentation Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150000, China)

Abstract: Microprobe sensor laser interferometer is a representative of a new generation of ultra-precision laser interferometry instruments, compared with the traditional laser interferometer, with the probe size is very small, easy to install and adjust, can be isolated from thermal contamination and easy to realize the embedded measurement and other significant advantages, in the mask template slippage detection, high-end measuring equipment, internal component displacement detection, material deformation measurements and scientific research and other embedded displacement measurement occasions have great potential. This research was carried out from the microprobe interferometry principle, measurement benchmarks and measurement errors in three aspects, breakthrough microprobe type high-resolution large range interferometry,

high-precision frequency stabilization under a wide range of high-bandwidth frequency modulation, signal demodulation cycle of nonlinear error elimination of the key theories and core technologies, to solve the problem of "can't measure", "inaccurate", "imprecise" three major technical problems, to realize and build a complete high-precision microprobe laser interferometer, in order to support the demand for ultra-precision measurement of sensing in equipment manufacturing, to provide embedded on-line measurement for the integrated research and development of China's high-end equipment, to provide core measurement means for nano-metrology testing. We have realized and built a complete high-precision microprobe laser interferometer to support the demand of sensor-based ultra-precision measurement in equipment manufacturing, provide embedded on-line measurement for the integrated research and development of high-end equipment in China, and provide core instruments for nano-metric testing.

Keywords: Fiber-Optic Microprobe Interferometry; Large-Range High-Resolution; Tuned Light Source Frequency Stabilization; Periodic Nonlinearity Cancellation

1 研究背景和应用价值

1.1 研究背景

激光干涉测量技术具有量程大、分辨力高、溯源性好等优点，被广泛应用于高端设备制造、基础物理研究等领域，成为最重要的精密位移测量技术之一。然而，传统激光干涉仪存在体积大、易受热污染、机械漂移因素多等不足，难以在高端装备等狭小空间下完成测量工作。因此，具备微型“传感头”嵌入式测量特征的新一代干涉测量方法成为热点，但随之而来的是新的技术挑战。



图1 微探头激光干涉仪与传统干涉仪对比

1.2 应用价值

1) 在光刻领域, 双工件台工作时, 掩模板吸附在微动台上并随其在宏动台上进行高加速度、高加速度的往复运动, 其过程中掩模板的惯性滑移会严重影响曝光精度, 需要进行实时监测, 然而仪器可用空间狭小仅为 $10 \times 20 \times 40 \text{mm}^3$ 。纳米压印作为未来极具前景的光刻技术, 要求在极狭小空间下对轴跳动位移进行测量^[1]。在上述应用中, 要求传感器能在极小空间下实现亚纳米分辨力测量和纳米级测量精度。

2) 在高端设备制造领域, 也对小空间下的微探头位移测量提出需求, 狭小空间下的运动台位置测量和光学材料形变监测, 需要纳米级精度传感器嵌入式测量^[2]。在小卫星的研发中, 德国 OHB 公司采用了微探头干涉仪作为监测内部设备进行光-热-力耦合模型实验的光学元件位置监测, 该应用提出传感器需具备亚纳米测量分辨力, 纳米级测量精度, 数十厘米量程。

3) 在基础物理研究领域, 例如牛顿反平方定律实验检验、洛伦兹对称性检验、casimir效应的实验检验中。需要对扫描探针显微镜微悬臂振动位移进行监测^[3,4], 进而实时保证扫描显微镜扫描探针与样品的距离, 同时由于上述基础物理验证实验中需要长时间稳定的测量, 这就需要一种具备亚纳米测量分辨力, 纳米测量精度小型化微探头式的位移传感方法来保证整个测量过程的机械稳定性。

针对上述亚纳米分辨力、纳米精度、大量程的小体积微探头式传感需求, 本研究开发了新一代光纤微探头式超精密激光干涉仪样机, 实现微探头嵌入式的在线位移测量^[5]。经自主搭建的测试平台对所提出的方法和关键理论可行性进行验证, 测试和评价光纤微探头激光

干涉仪整机的线性测量功能，并结合中国计量院校准测试结果得到：仪器传感探头尺寸为 $\Phi 4.7\text{mm} \times 17\text{mm}$ ，工作距为 24mm-400mm，测量量程 376mm，有效测量分辨力 0.4nm。未来将会完成微探头传感器式激光干涉测量仪器的集成，实现产品化的设计，来支撑装备制造中的传感式超精密测量需求，为我国高端装备研发提供嵌入式在线测量手段，为纳米计量测试提供核心仪器。

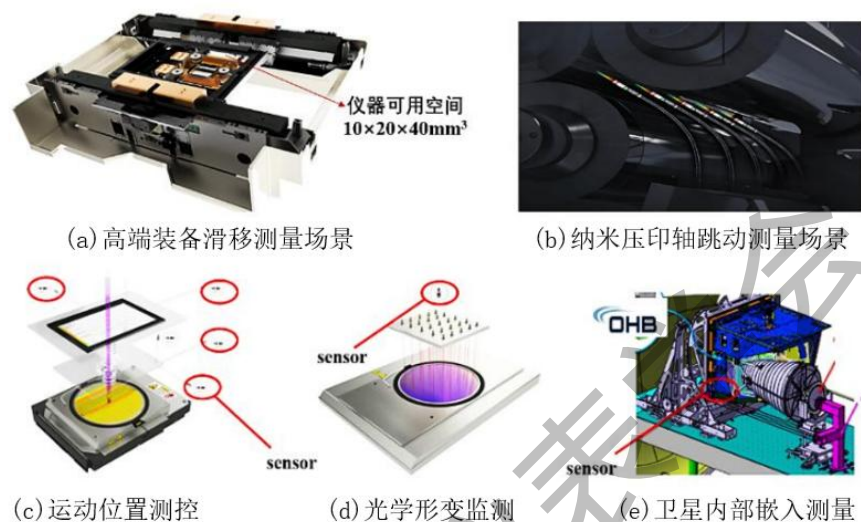


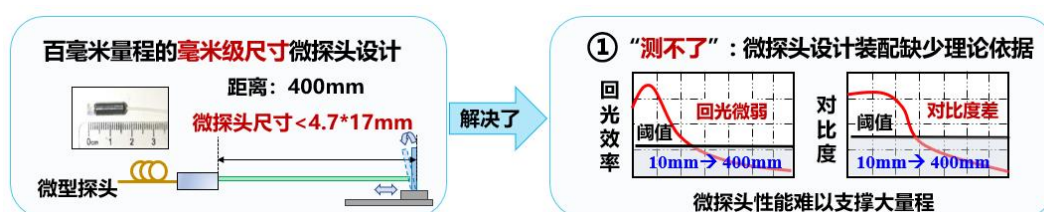
图 2 微探头激光干涉仪的典型应用需求

2 创新点与优势

创新点 1：提出微探头多介质全局光场传输与装配模型——解决“测不了”难题

针对毫米级微光学测头的优化设计与精准装配缺乏理论支撑，其光学性能难以支撑大量程、目标姿态变化等实际测量场景的问题。

提出微光学测头的多介质全局光场传输模型：基于高斯光束模型与光场耦合原理，通过研究微探头各元件结构和几何参数与微探头整体性能的对应关系，建立测头光学、机械等参数与传感性能的映射模型，为微光学传感探头的设计与优化提供理论基础；基于光场衍射理论和光线追迹方法，建立微传感探头装配误差模型，通过分析微光学元件错位，倾斜等失调误差对传输光场和功率耦合效率的影响，研究实现精准装配的失调容差，为微光学传感探头精准装配提供理论指导，进而解决微探头传感器式激光干涉仪“测不了”的重要难题。

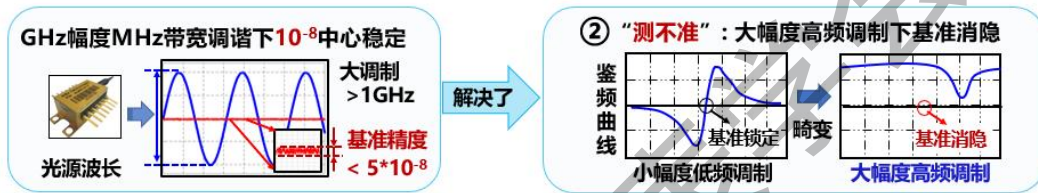


创新点 2：提出大幅度、高带宽调频下的微探头大调谐光源高精度稳频方法——解决“测不

准”难题

针对大量程、高测速下微探头干涉仪光源必须大幅度、高带宽调频，使激光稳频参考点偏移/消隐,导致系统测量精度急剧下降的问题。

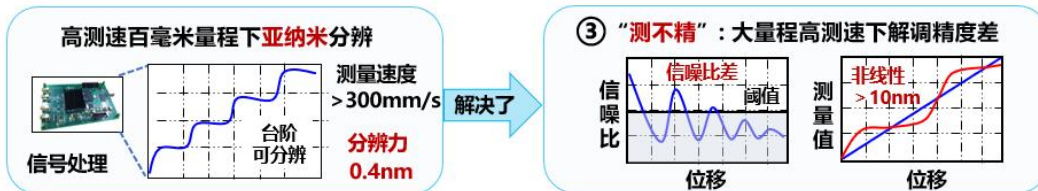
建立大幅度、高带宽调频下饱和吸收模型，分析大范围高带宽激光波长调谐下稳频参考点偏移和消隐的机理和特征，梳理载波相位和伴随光强调制与稳频参考点畸变的定量关系，据此提出基于载波相位补偿和参考频点动态追踪的激光稳频方法，利用鉴频曲线峰峰值反馈调节相位补偿，提取部分参考频点特征，随后重新建立鉴频曲线峰值和谷值与吸收峰锁定点的映射关系，稳定复现鉴频特征曲线，并精准锁定稳频参考点，为微探头传感器式激光干涉仪提供高精度的测量基准，进而解决微探头传感器式激光干涉仪“测不准”的重要难题。



创新点 3：提出微探头干涉仪亚纳米分辨力信号解调与误差实时修正技术——解决“测不精”难题

针对在大量程、高测速下现有微探头干涉信号解调方法将偏离信号解调的最佳工作点，使测量分辨力难以突破纳米级，并产生十纳米级位移解调周期非线性误差的问题。

提出基于工作点自适应追踪的亚纳米分辨力干涉信号动态解调方法，利用锁相正交解算手段进行载波相位延迟计算、补偿及误差的抑制，随后采用温度驱动式激光波长扫描连续改变干涉光程差主动引入干涉相位变化，根据实时光程变化反馈调控光源的调制深度，使系统锁定于信号解调的最佳工作点，以实现在深亚纳米位移分辨力下突破了大量程位移解算的限制，结合基于载波相位延迟预补偿和精细零位校正的异常周期非线性误差消除方法，实现残余周期非线性零位校正，将位移解调误差抑制到纳米级。



3 实验方案简介

3.1 测量原理

相较于传统激光干涉仪，新一代微探头激光干涉仪是在测量方法和关键技术的跨越式发

展，传感头尺寸缩小超百倍，故关键单元包括信号解算、波长基准和误差修正，实现难度更大，技术更为复杂。在光纤微探头激光干涉测量系统中，如图 3 所示，主要核心单元包括光纤微传感探头、相位生成载波信号处理、调谐中心稳频光源和误差校正单元。

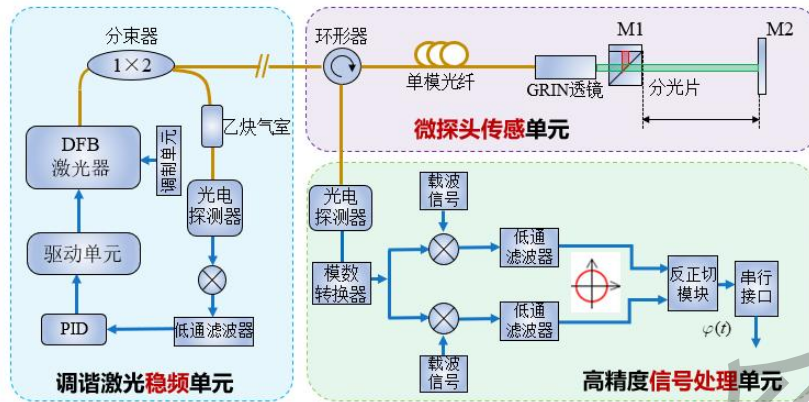


图 3 微探头传感器式光纤干涉仪整体原理框图

1) 微探头传感单元

相较于传统激光干涉仪中百毫米级干涉镜组，毫米级微探头干涉仪在干涉测量原理上技术难度更大。传感头方面，现今光纤微传感探头集中在法珀腔干涉结构，将多光束干涉近似为双光束干涉进行传感，未考虑多光束反射带来的原理误差。本文研究一种微棱镜式微探头结构的传感方法和模型，分析该结构的干涉位移测量原理。

微型传感探头是干涉传感的核心结构，光纤仅作为传光组件，不参与干涉测量。微探头结构是支撑微探头干涉仪能够测量的根本单元。微探头存在两种结构：F-P 腔式和微棱镜式。F-P 腔式微传感头具有多光束干涉原理误差，相较而言，微棱镜式微探头为理想双光束干涉原理，具备高精度传感潜力。为了更好的分析微探头传感特性，利用等效模型分析手段，将出射光打到目标物反射耦合的过程等效为出射光经过二倍距离和倾角入射进虚拟光纤探头中，建立了光场传输耦合模型和装配误差模型。将调制电流信号加载到激光器时，对激光器输出的激光频率进行调制，光纤微探头干涉仪中测量光、参考光之间互相发生干涉后，干涉信号经由光电探测单元探测，可以得到此时在光电探测单元中转换得到的光电流大小为：

$$S(t) = kI_0[1 + v \cos(C \cos \omega_0 t + \varphi_c + \varphi(t))] \quad (1)$$

式中 k ——电流和光强转换系数(A/mW)；

v ——干涉信号对比度；

I_0 ——测量和参考光光强和(mW)；

ω_0 ——载波信号对应的角频率(rad/s)；

φ_c ——载波信号与参考信号的相位延迟(rad)。

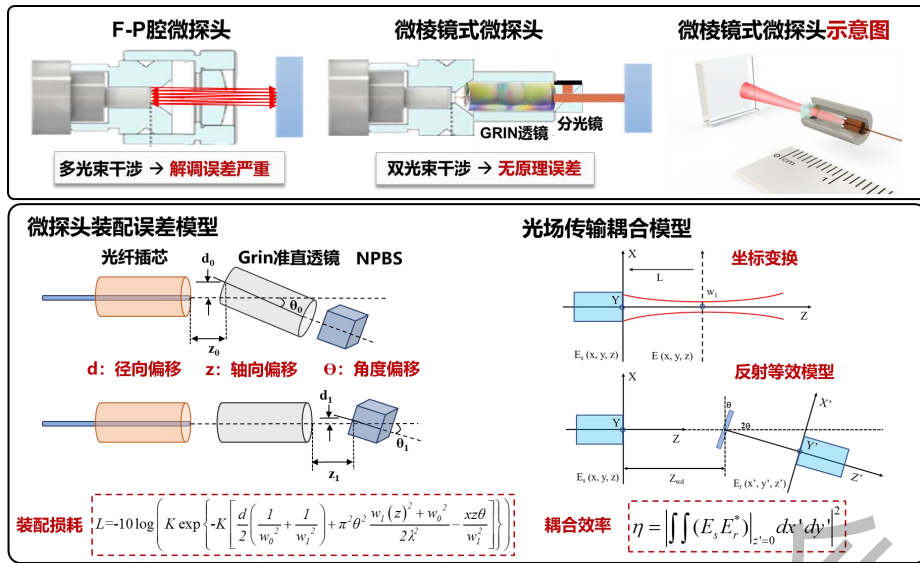


图4 光纤微传感探头模型分析

2) 调谐激光稳频单元

针对微探头激光干涉仪高速、大范围的需求，分别从光源调谐频率、调制幅度进行研究。对于测量速度与调谐频率之间的关系，采用软件仿真的方法，模拟待测物体处于不同运动状态下，光纤微探头激光干涉仪对干涉信号解调得到的频谱。当物体开始运动时出现频谱搬移现象，运动速度越快越容易频谱混叠，从而不能正确解调出相位信息。对于测量范围与调制幅度的关系，当测量范围的达到百毫米级时，应当对应地调节调制幅度至 GHz 量级，保证其始终处于系统工作点上，从而正常地解调出相位信息。综上，对光源提出了 GHz 幅度 MHz 带宽频率调制的需求。

针对干涉仪对位移准确测量的需求，对光源中心频率的稳定性、准确度进行研究，光纤微探头激光干涉仪进行位移测量时，待测相位可以表示为公式 2 的形式，通过公式可以获知，相位解算受到激光波长(频率)的影响，激光中心波长越不稳定，带来的误差越大。

$$\phi = \frac{4\pi nL}{\lambda} = \frac{4\pi n(L_0 + L_x)}{\lambda} = \frac{4\pi n(L_0 + L_x)\nu}{c} \quad (2)$$

$$\delta\phi = \frac{4\pi n(L_0 + L)\delta\nu}{c} \quad (3)$$

其中 L 为光纤微探头干涉仪的工作距离， ν 为激光器所输出激光的频率， c 为光速， n 为介质的折射率，待测相位 ϕ 。

在要求较快的调频条件下，使用乙炔气体的吸收峰作为参照，采用分子吸收稳频的方法进行分析和设计。调制吸收光谱稳频技术的关键是采用调制解调技术来获得幅值和频率之间相关的误差曲线(也被称作鉴频曲线)，调制信号的中心频率以及吸收信号中心频率的位置关系会影响解调结果。针对频率调制的大范围、高带宽需求，引入的相位延迟和伴随光强调制

因素，使得鉴频曲线发生畸变，导致了锁频点发生偏移。重新建立大范围高带宽调制下的稳频模型，并对相位延迟进行补偿，获得新的鉴频曲线，找出锁频点与鉴频曲线峰谷值之间的对应关系，从而跟踪到新的锁频点。相较于传统的锁定零点的稳频方法，该方法有效地解决了相位延迟和伴随光强调制引入的误差。

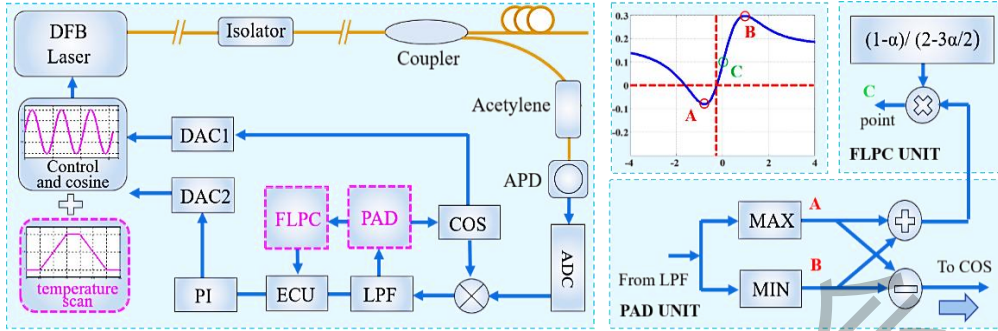


图5 基于特征曲线重构的分子吸收稳频方法框图

3) 高精度信号处理单元

高精度信号处理单元中的主要流程即为 PGC 算法，利用干涉信号与参考信号混频滤波得到两路正交信号，最后通过反正切算法解调出目标相位。但在实际应用下，会产生数十 nm 的周期非线性误差，严重影响激光干涉测量精度。在激光光源大范围频率调谐的过程中，额外的光强伴随调制会随之产生。同时由于光纤微探头测量系统中的各项延迟，包括光纤延时，电路延时等，使得干涉信号与载波信号存在相位延迟，进而产生周期非线性误差。获取的干涉信号与参考的一倍和二倍频率信号相乘，然后经过低通滤波处理，得到两路信号对相位差进行解算时，将会产生一定数值的额外误差，并且光纤微探头干涉仪误差大小随相位差 φ 呈非线性规律变化，且变化周期为 2π ，故此类特征误差被称为周期非线性误差。

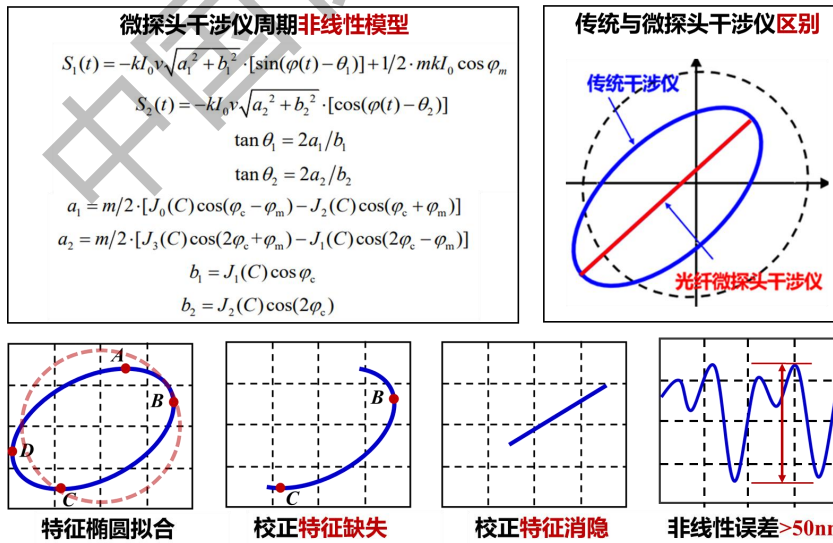


图6 微探头干涉仪周期非线性误差模型

采用一种基于光频自适应调控的大量程相位生成载波位移解算方法，该方法的本质核心

是实时计算出光纤微棱镜式微探头的绝对光程差，并以此作为依据调整光纤微探头干涉仪激光光源波长调制范围，控制相位调制深度的位置，进而摆脱系统信噪比变低甚至无法工作的问题。基于光频自适应调控的相位生成载波解算方案分为两个部分，一部分是面向待测目标初始静止时，相位生成载波解调中相位调制深度静态控制，另一部分是面向待测目标运动时，相位生成载波解调中相位调制深度的动态跟踪。此外采用动态正交测相方法，与传统方法相比，动态正交测相法将速度与分辨力模型分离，兼顾了高测速和高分辨力的优点。针对周期非线性误差的问题，拟采用基于校正特征复现的周期非线性误差消除方法。该方法主要分为两步，分为是载波相位延迟粗补偿以及非线性误差精细校正。

参数预补偿的主要目的是防止载波相位延迟接近特殊值进而导致滤波器的输出信号严重衰减，在这些场景会导致包括解调和椭圆拟合周期非线性校正失败。因此，采用载波相位延迟的粗补偿为非线性校正提供条件。采用温度扫描来代替物体运动获取完整的椭圆非线性误差校正参数，主动提供足够的位移，以预先确定非线性误差校正的参数。在精细周期非线性误差校正单元，主要校正残余非线性误差。

3.2 实验装置及过程

完整的光纤微探头激光干涉样机如下图 7 所示，实现微传感头嵌入的在线位移测量，微传感探头和主机之间通过光纤进行连接，将微传感探头置于被测物体处进行测量。目前已应用到掩模板滑移传感，无需在掩模板处粘贴额外反射物，即可实现测量需求。

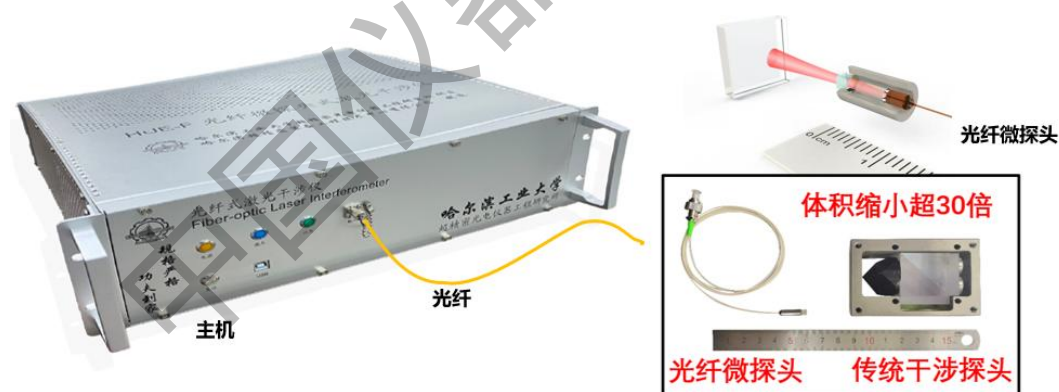


图 7 光纤微探头激光干涉样机

1) 微探头光纤干涉仪测量分辨力测试

在该实验中，用到了纳米精度的微位移台，固定于具有高稳定特性的殷刚 L 型槽上，L 型槽一端固定测量所需的微传感探头，通过光纤连接到干涉仪主机采集和处理数据。将纳米位移台参数设置为 0.4nm 的往返步长和 1s 的步进时间。具体实验装置如图 8 右侧所示，采集得到的位移量如图 8 左侧所示，图中显示了可以明显用于区分的往返台阶，虽然，从图中

可以看出数据存在一种整体偏移现象，我们分析这是由环境漂移或机械应力释放引起的。因此，根据实验可知，本研究中提出的光纤微探头激光干涉仪的实际测量分辨力优于 0.4nm。

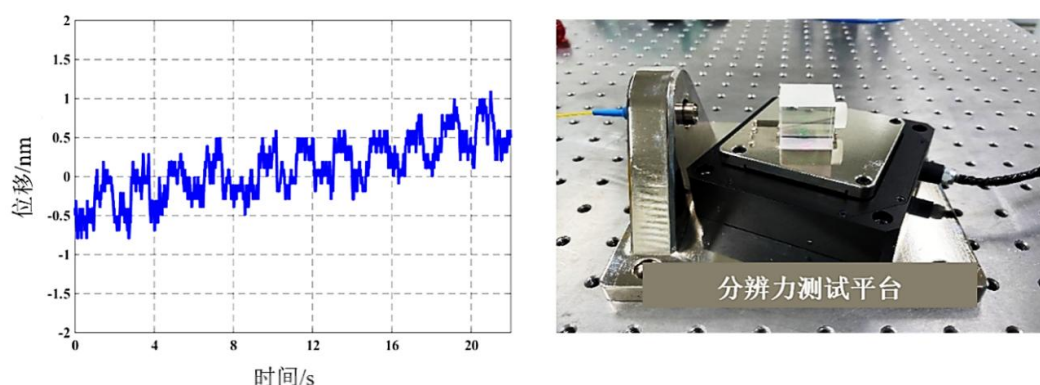


图8 光纤干涉仪测量分辨力测试结果

2) 微探头光纤干涉仪稳定度测试

稳定度测试平台如图 9 右侧所示，金属结构采用殷钢材料，具备高稳定特性，测试对象用 UV 胶固化。利用光纤微探头干涉仪进行稳定性测量，时长为一小时。结果如图 9 左侧所示。1 小时内的漂移小于 2.5nm，1 分钟内的短期稳定性小于 0.4nm。因此，根据实验结果可知，本文实现了亚纳米分辨率和纳米精度的干涉仪。

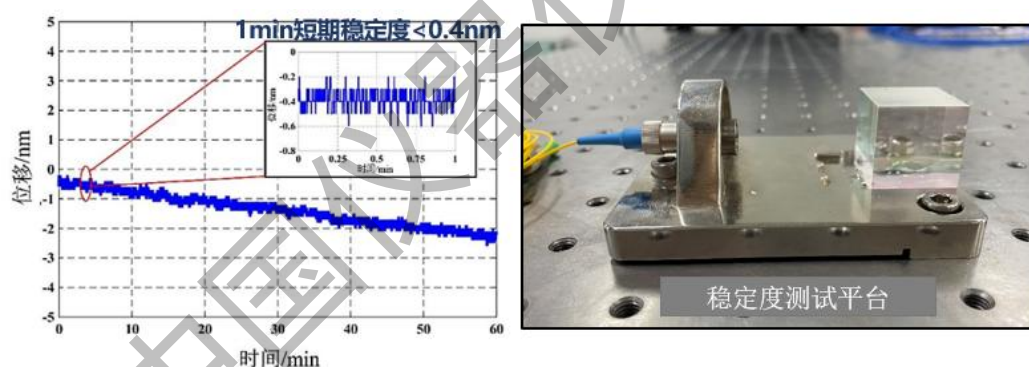


图9 光纤干涉仪稳定度测试结果

3) 微探头光纤干涉仪位移测量比对实验

进行光纤微探头干涉仪与商用超精密干涉比对测试实验，在该实验中比对于干涉仪采用背对背式对比测量方式，测试实验图如图 10 所示，其中红色框框出的为本文搭建的光纤微探头超精密激光干涉仪实验样机，蓝色框框出的为用于比对的 SIOS 公司商用超精密干涉仪，黄色框框出的为位移测量比对平台。

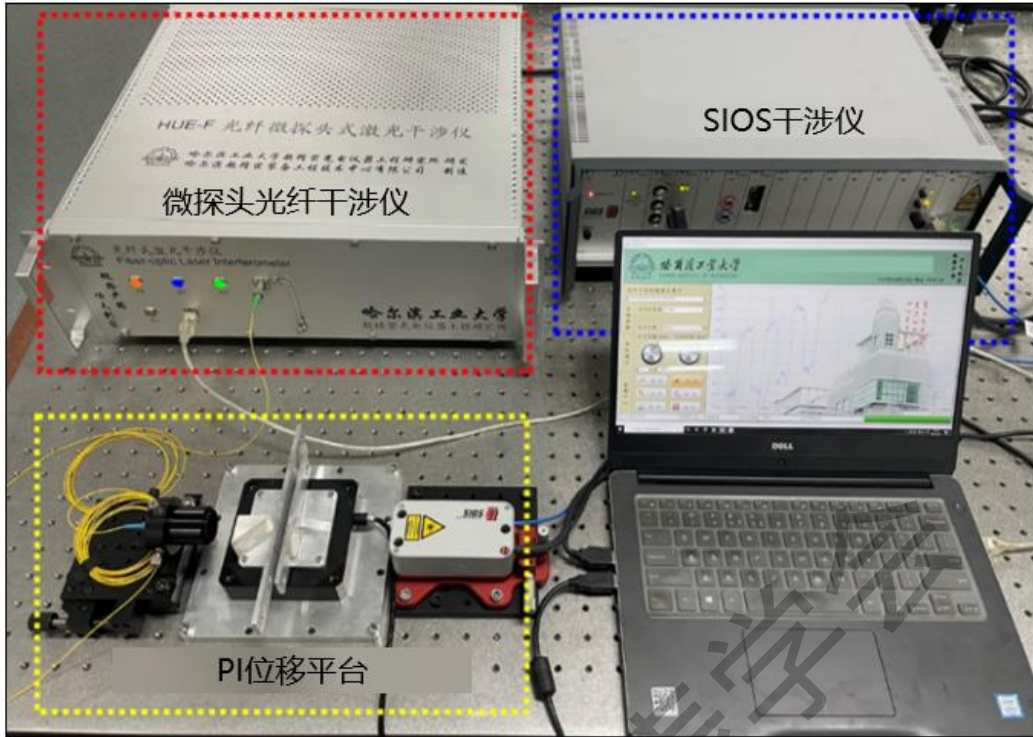
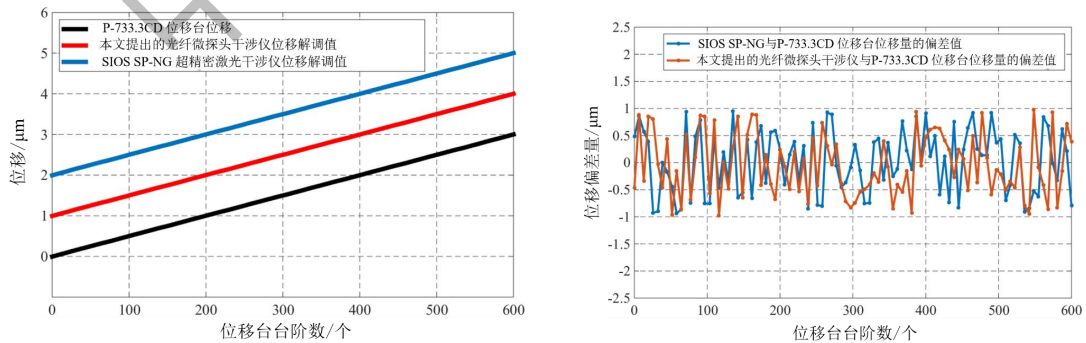


图 10 光纤干涉仪稳定度测试结果

(1) 微位移比对实验

利用上述光纤干涉仪与商用超精密干涉仪比对平台，进行小范围位移的测试和比较。将纳米级位移台设置为移动 $3\mu\text{m}$ 。分别用本文搭建的光纤微探头干涉仪和 SIOS 商用干涉仪进行各自的测试。

纳米位移台和两台用于比对的干涉仪的测试结果绘制在图 11(a)中，干涉仪和位移台的测量结果之间的差异计算并绘制在图 11(b)中。通过实验结果可以观测出，光纤干涉仪的微位移测量过程中的位移偏差为 $\pm 1\text{nm}$ ，与商用超精密干涉仪的微位移测量性能一致。



(a) 两台用于比对的干涉仪的微位移测试结果

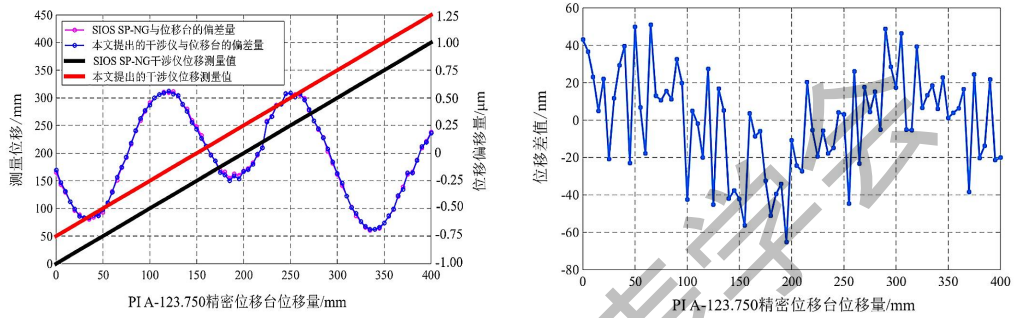
(b) 两台用于比对的干涉仪的微位移偏差测试结果

图 11 光纤干涉仪与商用干涉仪微位移测量比对实验结果

(2) 大量程比对实验

大量程下光纤微探头干涉仪与商用超精密激光干涉仪位移试验和比较。将 PI 位移台设置为移动 400mm，并使用本文提出的干涉仪和 SIOS 商用干涉仪分别进行测试。

两台干涉仪的测试结果以及位移台的偏移量如图 12(a)所示。发现二者测量结果的偏移量趋势相似，这可能是由位移台的精度引起的。两个干涉仪测量值之间的差异如图 12(b)所示，据图可得光纤微探头干涉仪与商用超精密干涉仪的位移差在-65 和 50 nm 之间。在本实验中初始工作距设置为 24mm，运动量程为 400mm，由于考虑到本系统设置的可工作初始工作距为 24-400mm，因此该仪器量程为 376mm。



(a) 两台比对的干涉仪的大量程位移测试结果

(b) 两台比对的干涉仪的大量程位移偏差测试结果

图 12 光纤干涉仪大量程位移测量比对结果

4 实验结果及结论

针对微探头激光干涉仪采用经典 PGC 测量方法时因内调制失配导致存在位移分辨力急剧下降直至测量失效的多个奇点、无法连续大量程工作问题，提出一种基于内调制自适应调控的亚纳米分辨力大量程微探头干涉测量方法。建立大量程工作中测量奇点与内调制幅度映射关系，自适应调控激光光源内调制幅度，动态跟踪系统调制深度最佳工作点，避免测量失效奇点，使仪器在大量程范围内始终保持亚纳米位移分辨力。实验结果表明，该方法可将位移量程从 mm 量级提升至 376mm，并在该量程内保持 0.4nm 的有效位移分辨力。

针对微探头激光干涉 PGC 测量基准难以兼顾大幅度高带宽调频和高精度稳频、导致大量程测量下难以获得高相对精度的问题，提出一种基于鉴频曲线重构的大幅度高带宽调频下高精度激光稳频方法。在大幅度高带宽调制条件下，建立鉴频特征曲线畸变模型和畸变矫正模型，利用矫正模型反馈调节相位补偿并重构鉴频曲线，明确锁定点与稳频基准点的对应关系，实现气体分子吸收基准点锁定跟踪，精准控制大范围高带宽调谐中心频率。根据中国计量院校准证书（证书编号：CDcd2022-20007），该方法可在 1MHz 调制带宽、2.61GHz 最大调制幅度下将中心激光频率相对精度从 5×10^{-7} 提升至 5×10^{-8} 。

针对微探头激光干涉 PGC 非线性误差校正时其特征参数易缺失或消隐、使测量结果存

在数十 nm 非线性误差的问题，提出一种基于校正特征参数复现的周期非线性误差零位消除方法。建立不同初始边界条件下微探头干涉仪周期非线性模型，据此计算载波相位延迟来局部复现周期非线性特征，利用温度调控激光移频以获得等效位移，来完整恢复周期非线性特征校准参数，将该误差抑制到亚纳米级。根据中国计量院测试报告（报告编号：CDJc2022-20130），该方法将微探头干涉仪周期非线性误差从数十 nm 抑制到 0.8nm。

微探头激光干涉仪，根据 JB/T 5610-2006 激光干涉仪第 4.5 条[6]，激光干涉仪的准确度可由以下公式计算得出：

$$\delta = \pm \left[k + \sqrt{(0.05)^2 + (\Delta\lambda/\lambda)^2 + (0.929\Delta t)^2 + (0.0027\Delta p)^2 + (0.00042\Delta f)^2} \right] L \quad (4)$$

式中 δ ——激光干涉仪准确度(μm)；

k ——激光干涉仪的分辨力(μm)；

$\Delta\lambda/\lambda$ ——激光波长的准确度(ppm)；

Δt ——测量环境的空气温度不确定度($^{\circ}\text{C}$)；

Δp ——测量环境的空气气压不确定度(Pa)；

Δf ——测量环境的空气湿度不确定度(Pa)；

L ——测量长度(m)。

与国际同类型顶尖仪器 Attocube 和 Smaract 公司的商业化样机进行核心参数对比，包括探头尺寸，测量距离，测量分辨力，激光光源稳定度，非线性误差。

表 1 整机核心参数对比

同类仪器	探头尺寸	测量距离	实测分辨力	激光稳频	非线性误差
Smaract PICOSCALE V2[7]	$\Phi 4\text{mm} \times 13\text{mm}$ (型号 C04)	250mm	稳定度 0.4nm (40mm 工作距)	5E-8	3nm
Attocube IDS3010[8]	$\Phi 14\text{mm} \times 17.4\text{mm}$ (型号 M12/C1.6)	1000mm	标准偏差 0.45nm (77mm 工作距)	5E-8	4.9nm
本文研制 仪器	$\Phi 4.7\text{mm} \times 17\text{mm}$	400mm	0.4nm (40mm 工作距)	5E-8	0.8nm

以 IDS3010 和 PICOSCALE V2 为代表，其中具体探头型号和数值如表 1 所示。由于上述产品缺少实际分辨力测试，都仅表明名义分辨力 1pm，而名义分辨力并无实际意义，因此此处采用稳定度进行等效替代，PICOSCALE V2 干涉仪的 1nm 的台阶分辨力测试结果，可

以观测短期稳定度波动为 0.4nm[7]，IDS3010 在工作距 77mm 下的稳定度标准偏差为 0.45nm[8]。

通过表 1 中参数的比对可得结论：微探头激光干涉仪测量量程与国际先进水平总体保持一致，激光光源稳定度与国际先进水平一致，非线性误差与国际最先进水平减小超过 3 倍。

5 结语

“嵌入式微探头激光干涉仪”是针对西方对中国科学仪器实施禁运的严峻形势而提出的，目的是突破微探头激光干涉仪的关键技术、研制和开发相关的核心部件，在此基础上完成仪器整机集成和测试，并进一步开展仪器的工程化、产品化和推广应用，最终取代国外同类进口仪器，从而实现在航空装备领域、高端测量装备领域、精密计量测试领域、光刻领域的应用，打破国外禁运，以满足国内高端装备集成内的嵌入式位移测量需求。

项目的开展不仅是践行“仪器强国”的使命，项目的成功还将打破西方在该仪器技术上的垄断和封锁，并有效促进高端制造技术和装备等产业的发展，具有突出的战略价值。

参考文献:

- [1]Min, Ming Y,Luo Y R, et al. Ultraprecision intersatellite laser interferometry[J].International Journal of Extreme Manufacturing, 2020, 2(2): 58-70.
- [2]Guo J, Yang C. Non-Contact Fiber Vibration Sensor Based on Intracavity Modulation of an Extrinsic Fabry-Perot Interferometer[J]. IEEE Sensors Journal, 2015, 15(12): 7229-7233.
- [3]Ni W, Ping L, Xin F, et al. Ultrathin graphene diaphragm-based extrinsic Fabry-Perot interferometer for ultra-wideband fiber optic acoustic sensing[J]. Optics Express, 2018, 26(16): 20758-20765.
- [4]Wu S, Liang W, Chen X, et al. Flexible Optical Fiber Fabry-Perot Interferometer Based Acoustic and Mechanical Vibration Sensor[J]. Journal of Lightwave Technology, 2018, 36(11): 2216-2221.
- [5]Dong Y, Hu P C, Fu H, et al. Long range dynamic displacement: Precision PGC with sub-nanometer resolution in an LWSM interferometer[J]. Photonics Research, 2022, 10(1): 59-67.
- [6]JB/T 5610-2006, 激光干涉仪[S]. 2006.
- [7]Smaract. High resolution optical displacement measurements of a piezo scanner[EB/OL]. 2018.<https://www.smaract.com/files/media/categories/Optical%20Metrology/AppNotes/AN0>

0023_PS_HighResolution-Measurement-Scanner.pdf

[8]Turner K, Braun P F, Karrai K. Fabry-Perot interferometry for long range displacement sensing[J]. Review of scientific instruments, 2013, 84(9): 2155-2165.

中国仪器仪表学会