

面向航空发动机叶片型面检测的双光梳三维成像技术研究



李思萱¹, 刘婷婷^{1,2}, 陈彩欣¹, 闫明¹

1. 华东师范大学 精密光谱科学与技术国家重点实验室, 上海 200062

2. 华东师范大学重庆研究院 精密光学重庆市重点实验室, 重庆 401121

摘要:航空发动机叶片的高精度、高效率、低成本、实时在线型面检测,为延长发动机寿命、维护乘机人员生命财产安全提供了保障。本文将双光梳测距技术与高速二维振镜扫描法相结合,开展了面向航空发动机叶片型面检测的双光梳三维(3D)成像技术研究。利用集成化单腔双波长激光器替代传统的独立双光梳系统,并采用高速负反馈锁相环首次实现双脉冲重复频率差信号的精确锁定,在10 min测量时间内,将重复频率差(Δf_r)信号的频率抖动量由0.8 Hz降至720 μ Hz,脉冲间相对频率稳定性提高三个数量级。配合使用高速二维振镜,能在秒量级时间下实现40 mm×40 mm范围内待测件的三维型面图像扫描,系统静态测量误差约2 μ m(1 s测量时间)。本文发展的单腔双梳三维型面检测系统具有模糊距离大、测量精度高、数据更新快及成本低的优势,为航空发动机叶片或其他关键零件的高精度实时在线型面检测提供新的技术手段。

关键词:航空发动机叶片;型面检测;光学频率梳;双光梳测距;单腔双梳

中图分类号:TN247/V232.4

文献标识码:A

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2025.07.004

航空发动机是飞机的“心脏”,是飞机整体性能的最主要决定因素。叶片是航空发动机的关键零件,其加工精度、制造水平是影响发动机性能、安全与寿命的重要因素。同时,在高温、高压、高转速的恶劣工作环境中长时间高负荷工作后,叶片不可避免地出现腐蚀、蠕变、涂层剥落、机械损伤(如撞击凹痕、划伤、疲劳裂纹)等多种形式的损伤。在维修中对叶片型面快速高效检测并及时解决问题,不仅能够延长发动机寿命,降低经济成本,更为乘机人员的生命财产安全提供了保障^[1-3]。

航空发动机叶片因其复杂的自由曲面结构及叶尖与叶根区域的急剧曲率变化,导致不同区域检测精度需求在0.1~0.01 mm范围内动态变化。此外,评价体系的复杂性提出了高效率与多重性的检测需求。传统接触式测量技术(如三坐标测量法和电感量仪法)虽技术成熟度高、可靠性强,但测量效率受制于人工操作、测量结果受扫描参数影响大,在实际应用中存在测头半径补偿误差和损伤叶片表面涂层的风险;非接触式光学型面检测技术测量精度高,易于集成,但是常规热障涂层(如YSZ)仅5%的反射率造成检测信号衰减^[4],增加了光学型面检测难度。采用

YSZ微叠层结构替代传统涂层工艺,可提升表面反射率至约20%,克服了光学检测中低反射率的核心障碍,为高精度型面检测奠定技术基础。常用非接触式光学测量方法主要包括激光三角测量法、结构光测量法和双目视觉测量法。激光三角法设备成本低,但测量效率较低;结构光测量法系统标定复杂度高;双目立体视觉法依赖表面特征匹配,在均一材质的航空发动机叶片上因特征点不足难以实现有效测量。综合来看,目前的型面测量方法各有优缺点,还未有真正意义上的高精度、高效率、低成本、实时在线叶片型面检测方案。

光学频率梳^[5-6](简称“光梳”)的出现为解决该问题带来了新的契机。光梳在频域上表现为一系列等间隔分布梳齿,单根梳齿频率稳定度在 10^{-12} ~ 10^{-15} $\sqrt{\text{Hz}}$ 量级。在时域上,所有频率梳齿则相干叠加形成超短脉冲,脉冲间的时间抖动在阿秒(10^{-18} s)量级。因此,光学频率梳技术兼具高频率精度与高时间分辨能力,为阿秒科学^[7]、光钟^[8]、分子指纹谱测量^[9-10]、高精度测距^[11]等光学精密测量提供了新型可靠光源。

基于光梳的测距技术,特别是衍生的双光梳测距技术,

收稿日期: 2025-01-07; 退修日期: 2025-04-03; 录用日期: 2025-05-09

基金项目: 航空科学基金(202200220X8001)

引用格式: Li Sixuan, Liu Tingting, Chen Caixin, et al. Research on dual-comb-based three-dimensional imaging system aiming for aero-engine blades surface measurement[J]. Aeronautical Science & Technology, 2025, 36(7): 26-33. 李思萱, 刘婷婷, 陈彩欣, 等. 面向航空发动机叶片型面检测的双光梳三维成像技术研究[J]. 航空科学技术, 2025, 36(7): 26-33.

摆脱了机械物理与调制器带宽的限制,具有测量精度高、模糊距离大、数据刷新快、动态范围广等优势,逐渐发展成一种多功能精密测量手段^[12-15]。2009年,Coddington等^[16]提出并试验验证了双光梳测距技术方案,在60 ms的采样时间内实现5 nm测距误差,模糊距离达30 km。系统兼具干涉法高精度与飞行时间法测量速度快、模糊距离大的优势,为实时在线高精度距离测量奠定了基础。经过数十年的技术优化迭代,双光梳测距技术在光源、装置、探测方式及实用性方面都有了长足进步^[17-18],并逐渐推广应用至光学成像领域^[19-20]。2021年,Vicentini等^[21]提出了双光梳全息成像技术,利用双电光光梳在相机的感光面上相干探测实现三维全息成像,系统成像速度受限于相机帧速,成像时间相对较长。2024年,Han Senmiao等^[22]利用两台飞秒激光器结合非线性光学异步采样技术,实现了无盲区的绝对距离测量仪。但系统中两套飞秒激光器虽结构简单,集成度高,但造价可观,不适用于大规模生产中低成本的要求。近年来,发展迅猛的单腔双波长激光器,或称“单腔双梳”技术为低成本、高集成的双光梳测距及成像系统注入了新的活力^[23-24]。在单个锁模激光谐振腔内加入调制元件,通过方向复用、偏振复用等复用条件,使得谐振腔内两个波长同时起振,从而输出重复频率略有差异的脉冲序列,用以替换两台锁模光梳。共腔产生的异步脉冲,其共模噪声被抑制,无须复杂的外部锁相系统,两脉冲之间即具有良好的相对频率稳定性。2021年,Nürnberg等^[25]利用偏振复用的固体单腔双波长激光器,实现了低于1 μm的测距精度。

本文将双光梳单点测距技术与高速二维振镜扫描法相结合,开展了面向航空发动机叶片型面检测的双光梳三维成像技术研究。在光源产生方面,本文采用更为集成化的单腔双波长激光器替换传统的两台相干光梳,并通过伺服锁相系统将双光梳之间的频率漂移由赫兹降至微赫兹量级,形成了小巧紧凑、成本低廉、长期稳定的双光梳光源系统。在测量成像方面,配合使用高速二维振镜,将双光梳的单点测距功能扩展至三维成像,能在秒量级时间内实现待测件的三维型面图像扫描,静态测量误差为2 μm,10组重复性测试误差分布在±3 μm(1 s测量时间),二维拟合平面度约30 μm。本文提供的单腔双梳三维型面检测系统通过调整测量时间即可动态适配不同精度需求区域,无须机械扫描或测头切换,在确保非接触无损检测的同时,实现全自动高效测量。不仅满足航空标准对多尺度精度的差异化要求,更通过数字化控制显著降低人工经验依赖性,在测量时间、测量精度、动态范围、集成度与价格成本等方面均有显著优势,为航空发动机

叶片的高精度实时在线型面检测提供新的途径。

1 基本原理

本文中型面测量的实现是基于双光梳测距原理,利用两台重复频率(即梳齿间距)具有微小差别的光梳在高速探测器上进行光外差探测,将光频域拍频信号下转换至射频域,结合成熟的射频仪器完成信号采集,反演出光场强度、频率及相位的精确变化。系统中所用信号光梳(脉冲重复频率为 f_{r1} ,周期为 $T_1=1/f_{r1}$)和参考光梳(脉冲重复频率为 f_{r2} ,周期为 $T_2=1/f_{r2}$)之间存在微小重频差

$$\Delta f_r = 1/\Delta T = f_{r1} - f_{r2} \quad (1)$$

式中, ΔT 为采样步长或重复周期,可表示为

$$\Delta T = |T_1 - T_2| = \frac{\Delta f_r}{f_{r1} f_{r2}} = \frac{\Delta f_r}{f_{r1}} \cdot T_2 \quad (2)$$

从式(2)中可以看出,在时间域上,参考光梳以 $m \cdot \Delta T$ 的时间间隔对信号光梳进行异步光学采样扫描, m 为脉冲序数。定义参数 $k = \frac{\Delta f_r}{f_{r1}}$ 为转换因子,代表光学域与射频域时间轴之间的转换系数。在待测件存在表面形貌起伏 Δd 时,会对脉冲飞行时间引入延时差 $\Delta \tau$,从而引起射频域双光梳干涉条纹信号移动 Δt ,三者间基本关系为

$$\Delta d = v_c \cdot \Delta \tau / 2 = v_c \cdot k \cdot \Delta t / 2 \quad (3)$$

式中, $v_c = c/n$ 为光在介质中的传播速度, n_c 为介质折射率。测距技术的模糊距离定义为一个重复周期内可测到的最大距离,直接限定了其在形貌成像应用中的纵向量程。对于本文中的双光梳干涉测距系统而言,当 $\Delta \tau = \Delta T$ 时,为一个重复周期,相应的数据更新频率为 Δf_r ,系统的模糊距离为

$$\Delta d_{\max} = \frac{v_g}{2\Delta f_r} \quad (4)$$

更改双光梳之间的重复频率差 Δf_r 可实现扩展模糊距离的目的,其原理与游标卡尺类似。与单光梳测距系统不同,其测距量程不再受限于光梳的固有频率(T_1 或 T_2),而限制于双光梳干涉条纹的重复周期(ΔT),系统模糊距离可有效扩大3~6个数量级。

2 试验装置

试验装置采用方向复用的单腔双波长掺铒激光器替代两台光学频率梳构建双光梳三维成像系统,激光器输出的两个波长脉冲分别作为信号光梳与参考光梳,如图1(a)所示。

单腔双波长激光器内部包含两路基于半导体可饱和吸收镜(SESAM1和SESAM2)锁模的谐振链路,且两条链路通过环形器实现方向复用,共享公共端。参考光谐振链路

包含中心波长 976 nm 的连续泵浦源 (LD1)、波分复用器 (WDM1)、掺铒增益光纤 (EDF1, Liekki, Er80-4/125-HD-PM)、空间耦合延时线 (Delay line)、半导体可饱和吸收镜 (SESAM1) 及公共端 (包括光分束器 OC1、单模传输光纤以及压电陶瓷致动器 PZT)。976 nm 泵浦经 WDM1 注入 EDF1 中, 产生 1560 nm 激光。光脉冲顺时针传输, 经过空间耦合延时线后, 由环形器的 1 端入射至 2 端。由于环形器的单向传输非可逆特性, 2 端光束进入公共端后, 由分束比为 5:95 的 OC1 分束, 5% 端作为输出光出射 (即参考光梳, 蓝线), 剩余 95% 光束从第二个环形器的 2' 端入射, 3' 端出射, 继续在谐振链路中循环。腔内光束经过 SESAM1 饱和和吸收, 实现脉冲窄化, 在多次循环后最终实现脉冲锁模。与参考光谐振链路相似, 信号光谐振链路中的 1560 nm 激光脉冲逆时针传输, 先经由环形器的 1' 端传输至 2' 端进入公共端, 5% 部分作为输出 (即信号光梳, 红线), 95% 的信号光沿环形器的 2 端传输至 3 端, 继续在信号光谐振链路中循环, 由此实现两个波长的同时起振。激光器中两条谐振链路总长度均约 6.9 m, 公共端长度 3.32 m, EDF1 长 1.07 m, EDF2 长 0.7 m, EDF1 与 EDF2 为同种型号增益光纤。谐振腔内增益光纤在 1560 nm 的群速度色散量为 $20.0 \text{ ps}^2/\text{km}$, 而单模传输光纤色散量则为 $-22 \text{ ps}^2/\text{km}$, 因此, 信号光与参考光谐振链路腔内净色散分别为 -0.12 ps^2 和 -0.11 ps^2 , 当 LD1 与 LD2 的泵浦光功率分别加到 190 mW 与 153 mW 时, 激光器可输出两路稳定孤子脉冲, 其重复频率约 9.79 MHz。信

号光与参考光分别经过分束比为 10:90 的光分束器 OC2 与 OC3, 10% 的输出光作为重频差锁相电路的输入信号。剩余的信号光经过 20:80 的分束器 (OC4) 后, 80% 端经环形器 (CIR) 由光纤耦合镜 (Co1) 输出。在空间光路中, 信号光经过高速扫描振镜组件 (GM) 后, 由焦距为 20 cm 的聚焦透镜 (Lens) 直射到待测件表面。待测件放置于三维移动平台上, 方便灵活调节纵向位移及拓展成像范围。经待测件表面反射回来的信号光经过耦合镜收束至光纤中。同时, 剩余参考光经过 50:50 的光分束器 OC5 后, 其中一臂与 OC4 输出的 20% 信号光在 OC6 上合束, 另一臂与返回的信号光在 OC7 上合束, OC6 与 OC7 的分束比均为 50:50。OC6 与 OC7 的输出光分别接入两个带宽为 1.6 GHz 的平衡探测器 BPD1 与 BPD2 的正负输入端, 以此抑制两路信号的共模强度噪声。信号光与参考光在平衡探测器上进行光外差拍频, 产生两路干涉信号输入高速数据采集卡 (DAC) 的两个通道中。通过采集并处理两路干涉信号之间的时间差, 即可反演出信号光的飞行距离。在系统中, 参考臂与测量臂中所用光纤长度相近且处于相同环境中, 由此减少光纤长度引入的测量误差。

对于双光梳应用来说, 保持两台光梳之间良好的相对频率稳定性是实现双光梳精密测量的必要条件。对于单腔双波长激光器而言, 由于两个波长共腔产生, 虽然单个波长依旧存在频率漂移, 但其双梳齿之间天然具有较好的频率稳定性, 长期频率漂移峰值在赫兹 (Hz) 量级。为追求更

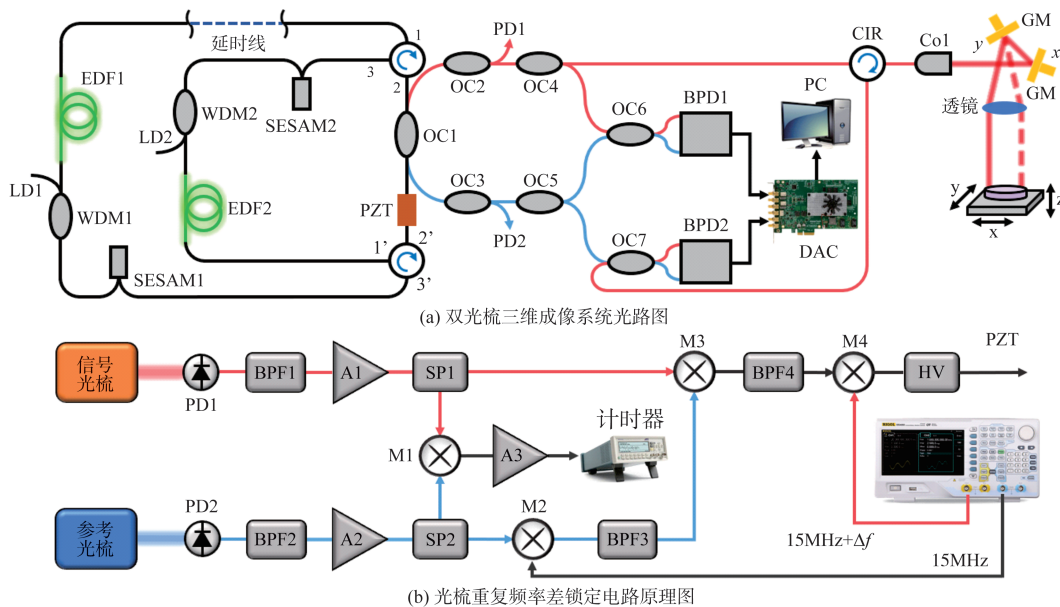


图1 试验装置图

Fig.1 Experimental setup

稳定的单腔双梳光源,本文对双波长的重复频率差进行锁定,图1(b)为本系统所用重频差锁相环电路原理图。OC2与OC3输出的10%信号光与参考光分别入射至光电探测器PD1与PD2上,将光信号转化为电信号。两路基频信号均经过带通滤波(BPF1和BPF2,中心频率30 MHz,通带带宽5 MHz)与信号放大(A1和A2)过程,由电学分频器(SP1和SP2)分为两路。其中一臂直接在混频器(M1)上混频,即可滤出两路信号的重频差,接入频率计数器(Counter)中用于锁定监测。在本系统中,双光梳之间的重频差在赫兹到千赫兹范围,由于所用电学混频器的最低工作频率为70 kHz,故而不能直接将重频差与外部标准信号进行混频。为解决此问题,本电路锁相系统巧妙地将参考光梳的基频进行了频率桥接。借助外部信号发生器先将参考光梳基频(f_{r2})与外部标准15 MHz信号进行混频(M2混频器),带通滤出和频信号($f_{r2}+15$ MHz),之后和频信号与信号光梳基频(f_{r1})进行混频(M3混频器),滤出两者误差信号(Δf_r+15 MHz)。利用15 MHz信号作为桥接频率,可以规避重频差信号频率过低,混频器无法正常工作,难以实现重频差锁定的难题。最后,由信号发生器产生标准正弦信号,在M4混频器中与 Δf_r+15 MHz进行混频,得到最终的重频差与标准信号的偏差信号,经高压(HV)放大后反馈给谐振腔内的压电陶瓷致动器PZT。PZT的伸缩量会根据外加电压大小进行改变,由此实现重频差信号的锁定。

3 结果与讨论

当LD1与LD2的泵浦功率分别增加至190 mW与153 mW时,激光器输出信号光功率为112.1 μ W,参考光功率为60.8 μ W。由于参考光谐振链路中存在空间耦合延时线,因此,参考光输出功率相对较小。图2记录了信号与参考光梳输出光谱及频谱特性。

在图2(a)中,红线与蓝线分别表示信号光梳与参考光梳的输出光谱。信号光梳与参考光梳的中心波长分别为1561.42 nm与1560.37 nm,其3 dB谱宽分别是5.4 nm与6.33 nm,两者光谱重叠范围大,重叠部分带宽在5 nm左右。由于激光器内两脉冲均工作在孤子锁模区域,因此,其输出光谱均具有明显的凯利边带。图2(b)为射频分析仪记录的双波长脉冲射频域信号,其扫描范围为3 kHz,分辨率带宽为10 Hz。由于腔内色散影响,双波长脉冲的群速度不同,因而其重复频率会存在微小差异。射频频率分别为29.7914 MHz和29.7926 MHz的主峰信号验证了双波长脉冲的异步特性,两信号的频率差值约为1.19 kHz。通过调节空间耦合延时线

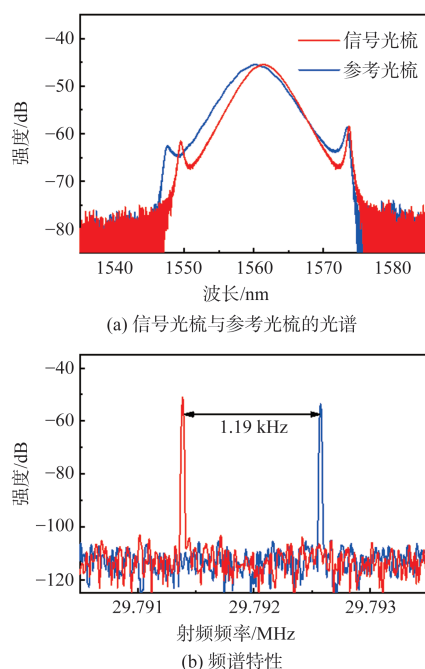


图2 双光梳输出特征

Fig.2 The output characteristics of dual combs

间自由光程,能实现双脉冲重复频率差值0~5 kHz的大范围连续调节。从图2(b)中可以看出,两个基频主峰信号的信噪比均接近60 dB,且绝大部分射频能量集中在主峰包络内,底部无明显基底,证明了双波长激光器锁模稳定性。

由于外界温度、噪声、机械振动等对双波长激光器的渗透影响,两个波长的重复频率及重复频率差值均会随时间漂移。为衡量激光器的慢漂,图3(a)记录了频率计数器采集的两个脉冲重复频率值随时间的变化,频率计数器门时间设置为1 s。

从图3(a)中可以看出,在10 min的采样时间内,信号光梳的重复频率 f_{r1} 从29.791 382 MHz漂移至29.791 398 MHz;同时间内,参考光梳的重复频率 f_{r2} 从29.792 574 MHz漂移至29.792 589 MHz。 f_{r1} 与 f_{r2} 的漂移范围均在20 Hz左右。将对应时间点的两个重频值相减,得到相应的重频差值 Δf_r ,其频率在1.19 kHz附近。对比于两个重频信号20Hz的漂移范围来说,在10 min内, Δf_r 的漂移量仅为<1 Hz,证明了双波长之间天然的相对频率稳定性。

为追求长期稳定的双波长脉冲运行状态,本文采用图1(b)中所示的锁相环路对重频差 Δf_r 进行频率锁定,结果如图3(b)所示。图中黑线为图3(a)中重频差数据的放大细节图。在10 min采样时间内, Δf_r 信号频率慢漂量为0.8 Hz,经过频率锁定之后,再用频率计数器对锁定后的重频差 Δf_r 信号进行采样记录,采样时间依旧为1 s。在同样

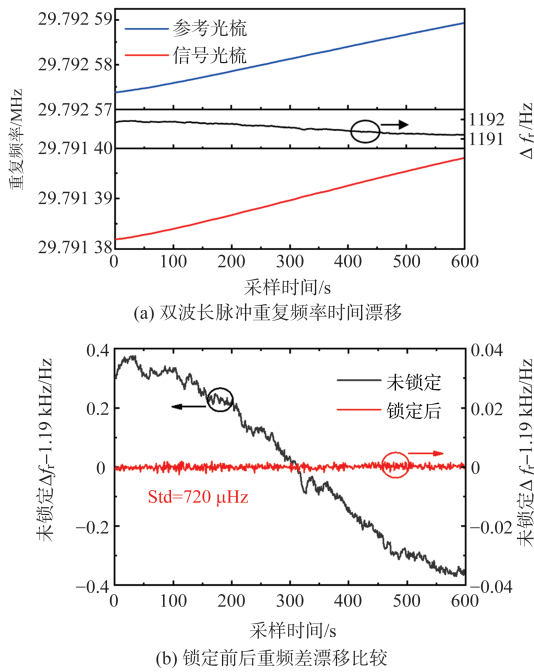


图3 锁相前后双光梳脉冲重频漂移对比

Fig.3 Frequency drifts of dual-wavelength pulses before and after phase-locking

10 min 的采样时间内,重频差 Δf_r 信号频率慢漂值降至 4 mHz 以内,标准差为 720 μ Hz。相较于未锁定前 0.8 Hz 的频率漂移量来说,锁定后的重频差 Δf_r 信号频率稳定性提高了三个数量级,更利于双光梳的精密测量应用。同时,在加载锁相反馈后,锁相环可实时补偿修正落在反馈带宽内的频率偏移,减少外界环境对脉冲间相对稳定性的影响,助力实现长期稳定的集成化双光梳光源。

双波长脉冲间高相干性的另一个表征是两者的拍频信号。本文,利用光纤合束器、平衡探测器、高速示波器、频谱分析仪搭建拍频信号测量链路,测量并记录了双波长脉冲的时域干涉条纹与频域拍频包络及梳齿信号,测量结果如图 4 所示。

将信号光梳与参考光梳的输出光通过光纤合束器合束,两束光在合束器上干涉。用平衡光电探测器接收合束器的输出光,光信号转换为电信号。电信号经低通滤波器滤波后送入示波器,此示波器兼具时域与频域分析功能。设置示波器采样时间为 10 ms,采样频率为 1 GHz,可在时域上探测到双脉冲干涉信号序列,如图 4(a)所示。干涉信号的重复周期约为 840 μ s,与 1.19 kHz 的重频差相对应。图 4(a)的插图显示了在 0 时刻附近展开的单次采集时域干涉信号,其峰值近 400 mV。将时域干涉信号傅里叶变换后,即可在频域上得到干涉包络信号,如图 4(b)所示。由于低通滤波器的通带限

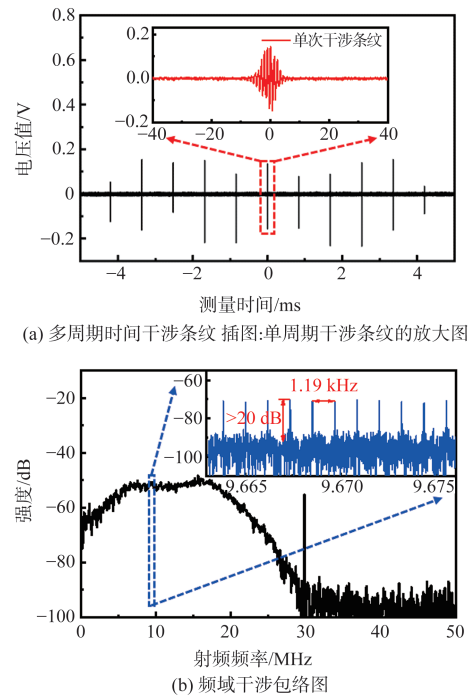


图4 双波长脉冲时频域干涉信号

Fig.4 Interferometric signals of dual-wavelength pulses in time and frequency domains

制,射频域包络在 20 MHz 以后强度迅速衰减。插图为包络信号在约 9.67 MHz 附近蓝框内展开后获得的拍频梳齿信号。梳齿迹线清晰,单根梳齿信噪比超过 20 dB,梳齿间频率间隔约为 1.19 kHz,与双脉冲重频差对应。受限于示波器的分辨率,读取到每根梳齿半高宽在 12 Hz 左右。高信噪比的拍频梳齿信号证明了双波长脉冲间的高相干性,而梳齿窄线宽则证明了激光器高稳定、低噪声特性。

在获得了高相干性的双光梳系统后,试验结合双光梳测距与高速二维扫描振镜,构建双光梳三维成像系统并对装置的系统误差进行评估。在单点静止测量情况下,记录时长为 100 s 的双路干涉条纹数据(BPD1 与 BPD2 的输出信号),将同周期内的两路干涉信号时间差转换为位移差,并计算阿伦(Allan)方差,其结果如图 5(a)所示。

系统在测量时间为 5 ms 的单周期条件下,测量误差为 32.7 μ m。随着测量时间加长,误差逐渐减小。在测量时间为 10 s 时,测量误差降至最小值,即 60 nm。当测量时间继续增加至 25 s 时,由于受环境扰动和噪声的影响,Allan 方差曲线呈短暂上升趋势。除此之外,试验还对系统测量误差进行了重复性测试,图 5(b)给出了间断测量的 10 组重复性试验结果,每组测量用时 10 s。10 组测量数据的均值偏差量在 1 μ m 以内,测量误差分布在 $\pm 3 \mu$ m 以内。从图 5 数

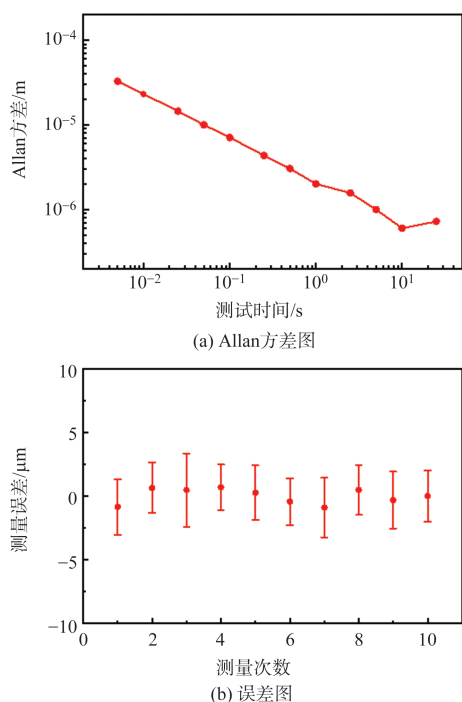


图5 系统稳定性测试

Fig.5 Test of system stability

据中可以看出,双光梳系统的纵向(z 轴)测量精度可达微米量级,并且具有良好的稳定性与可重复性。

利用双光梳三维成像系统对两款机械件样品面形进行三维测量。通过高速振镜组对样品表面进行点扫描成像,振镜组的最高扫描频次达 10 kHz,单次成像面积达 $40\text{ mm} \times 40\text{ mm}$ 。在测量系统中,光梳在焦点处的光斑约 $78\text{ }\mu\text{m}$,因此将系统测量的横向分辨率,即点间距设置为 $80\text{ }\mu\text{m}$,总点阵数

为 500×500 。图 6 为测量的样品件三维图像及曲面拟合结果。

样品 1 为一个多孔不规则外形铁块,图 6(a)为其成像测量结果。样品 1 实际尺寸为 $35\text{ mm} \times 25\text{ mm}$,厚度为 3 mm ,从成像结果可以看出,样品表面孔位及边缘清晰可辨。取样品上表面 $4\text{ mm} \times 4\text{ mm}$ 范围内区域 $[16\text{ mm} < x < 20\text{ mm}, 28\text{ mm} < y < 32\text{ mm}]$,利用最小二乘法对所选区域数据进行三维曲面拟合,拟合平面方程为 $Ax + By + Cz + 1 = 0$,其中 A 、 B 、 C 为常数。则各测量点到拟合平面的距离为

$$D_i = \frac{Ax_i + By_i + Cz_i - 1}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}} \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (5)$$

平面平整度计算公式为

$$m = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n D_i^2}{n-1}} \quad (6)$$

式中, m 为测量点到竖直平面的点位中误差,可以看作墙面的平整度。其数据拟合结果如图 6(b)所示,计算得曲面平整度为 $26.8\text{ }\mu\text{m}$ 。

用相同的方法对样品 2 进行三维成像和曲面拟合。样品 2 为直径 38 mm ,厚度 3 mm 的平整圆件,图 6(c)为其成像测量结果,图像上可以看出圆形边缘清晰。同样取样品上表面 $4\text{ mm} \times 4\text{ mm}$ 范围内区域为 $17\text{ mm} < x < 21\text{ mm}$ 和 $14\text{ mm} < y < 18\text{ mm}$,利用仿真程序对数据进行曲面拟合,计算得曲面平整度为 $27.1\text{ }\mu\text{m}$ 。

4 结论

本文采用双光梳飞行时间测距法与高速二维振镜扫描系统相结合,构建双光梳三维成像系统,在纵向测量精度、

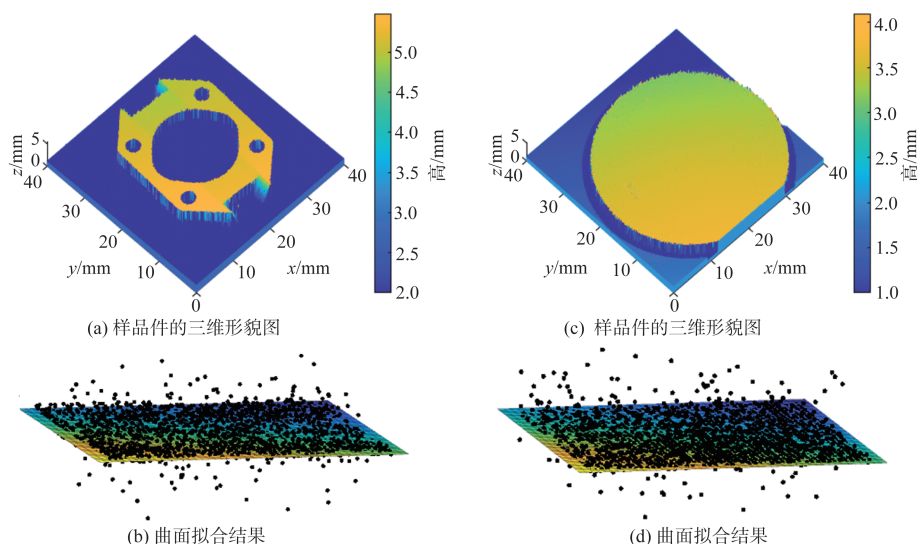


图6 样品件的表面形貌测量

Fig.6 Surface morphologies of the samples

模糊距离及测量速度等方面更具优势。通过研究,得出以下结论:

(1) 用集成化单腔双波长激光器替换掉两台独立光梳,使系统在成本和集成度上更具优势。

(2) 利用高速宽带负反馈锁相系统,首次将双波长脉冲间重复频率差信号的频率抖动量降至 μHz 量级,有效提高了双光梳间相对频率稳定度。双光梳测距系统单点静态测量误差为 $2\mu\text{m}$,10组重复性测试误差分布在 $\pm 3\mu\text{m}$ (1 s测量时间)。

(3) 结合振镜扫描后,能在秒量级时间内实现待测样品的三维成像,成像视野 $40\text{ mm}\times 40\text{ mm}$,样品表面二维拟合平面度约 $30\mu\text{m}$,后续通过多组数据拼接,可有效扩展系统成像视野,实现更大尺寸样品的三维测量。

AST

参考文献

- [1] 程亚茹,李湉,薛辉,等. 航空发动机叶片表面损伤与检测研究进展[J]. 航空发动机,2024, 50(2): 32-44.
Cheng Yaru, Li Tian, Xue Hui, et al. Research progress on aero-engine blade surface damage and inspection[J]. Aeroengine, 2024, 50(2): 32-44. (in Chinese)
- [2] 李学哲,石照耀,陈洪芳,等. 航空发动机叶片型面测量技术研究现状与趋势[J]. 北京工业大学学报,2017, 43(4): 557-565.
Li Xuezhe, Shi Zhaoyao, Chen Hongfang, et al. Current status and trends of aeroengine blade profile metrology[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2017, 43(4): 557-565. (in Chinese)
- [3] 师利中,刘鹏宇. 氧化损伤对航空发动机涡轮叶片裂纹扩展影响[J]. 航空科学技术, 2024, 35(7): 65-75.
Shi Lizhong, Liu Pengyu. Influence of oxidation damage on the crack growth of aero-engine turbine blades[J]. Aeronautical Science & Technology, 2024, 35(7): 65-75. (in Chinese)
- [4] 常振东,牟仁德,何利民,等. EB-PVD制备热障涂层的反射光谱特性研究[J]. 真空, 2018, 55(5): 46-50.
Chang Zhendong, Mu Rende, He Limin, et al. Reflectance spectroscopy study on TBCs prepared by EB-PVD[J]. Vacuum, 2018, 55(5): 46-50. (in Chinese)
- [5] 魏志义. 2005年诺贝尔物理学奖与光学频率梳[J]. 物理, 2006, 35(3): 213-217.
Wei Zhiyi. The 2005 Nobel prize in physics and optical frequency comb techniques[J]. Physics, 2006, 35(3): 213-217. (in Chinese)
- [6] Diddams S A. The evolving optical frequency comb [Invited][J]. Journal of the Optical Society of America. B, 2010, 27(11): 51-62.
- [7] Baltuška A, Udem T, Uiberacker M, et al. Attosecond control of electronic processes by intense light fields[J]. Nature, 2003, 421: 611-615.
- [8] Zhang C, Ooi T, Higgins J S, et al. Frequency ratio of the $^{229\text{m}}\text{Th}$ nuclear isomeric transition and the ^{87}Sr atomic clock[J]. Nature, 2024, 633: 63-70.
- [9] Han Jinjian, Zhong Wei, Zhao Ruocan, et al. Dual-comb spectroscopy over a 100km open-air path[J]. Nature Photonics, 2024, 18:1195-1202.
- [10] Ren Xinyi, Pan Jin, Yan Ming, et al. Dual-comb optomechanical spectroscopy[J]. Nature Communications, 2023, 14: 5037.
- [11] Shen Qi, Guan Jianyu, Ren Jigang, et al. Free-space dissemination of time and frequency with 10^{-19} instability over 113 km [J]. Nature, 2022, 610: 661-666.
- [12] 崔鹏飞,杨凌辉,林嘉睿,等. 飞秒光学频率梳在精密绝对测距中的应用[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(12): 120011.
Cui Pengfei, Yang Linghui, Lin Jiarui, et al. Application of femtosecond optical frequency comb in precise absolute distance measurement[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(12): 120011. (in Chinese)
- [13] 诸葛晶晶,邢书剑,高建树. 飞秒光频梳的任意长绝对测距理论分析[J]. 光学学报, 2016, 36(1): 0112004.
Zhuge Jingjing, Xing Shujian, Gao Jianshu. Theoretical analysis of arbitrary and absolute length measurement by using femtosecond optical frequency comb[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(1): 0112004. (in Chinese)
- [14] Ren Xinyi, Xu Bo, Fei Qilai, et al. Single-photon counting laser ranging with optical frequency combs[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2021, 33(1): 27-30.
- [15] Zhu Zebin, Wu Guanhao. Dual-comb ranging[J]. Engineering, 2018, 4(6): 772-778.
- [16] Coddington I, Swann W C, Nenadovic L, et al. Rapid and precise absolute distance measurements at long range[J]. Nature Photonics, 2009, 3(6): 351-356.
- [17] Li Ran, Ren Xinyi, Han Bing, et al. Ultra-rapid dual-comb ranging with an extended non-ambiguity range[J]. Optics Letters, 2022, 47(20): 5309-5312.
- [18] Lin Baike, Zhao Xin, He Mingzhao, et al. Dual-comb absolute distance measurement based on a dual-wavelength passively

- mode-locked laser[J]. IEEE Photonics Journal, 2017, 9(6): 7106508.
- [19] Kato T, Uchida M, Tanaka Y, et al. High-resolution 3D imaging method using chirped optical frequency combs based on convolution analysis of the spectral interference fringe[J]. OSA Continuum, 2020, 3(1): 20-30.
- [20] Wen Zhaoyang, Peng Bo, Yan Ming, et al. Broadband up-conversion mid-infrared time-stretch spectroscopy[J]. Laser & Photonics Reviews, 2024, 18(1): 2300630.
- [21] Vicentini E, Wang Z H, Gasse K V, et al. Dual-comb hyperspectral digital holography[J]. Nature Photonics, 2021, 15: 890-894.
- [22] Han Senmiao, Yang Linghui, Song Youjian, et al. Absolute distance meter without dead zone based on free-running dual femtosecond lasers[J]. Review of Scientific Instruments, 2024, 95: 043703.
- [23] 赵欣, 杨建军, 张力钎, 等. 单腔双光梳技术[J]. 中国激光, 2022, 49(19): 1901003.
- Zhao Xin, Yang Jianjun, Zhang Liqian, et al. Single-cavity dual-comb technology[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(19): 1901003. (in Chinese)
- [24] 杨昌喜, 赵康俊, 曹博, 等. 单腔双光梳锁模光纤激光器及其应用研究进展[J]. 中国激光, 2021, 48(15): 1501001.
- Yang Changxi, Zhao Kangjun, Cao Bo, et al. Recent progress of single-cavity dual-comb mode-locked fiber lasers and their applications[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(15): 1501001. (in Chinese)
- [25] Nürnberg J, Willenberg B, Phillips C R, et al. Dual-comb ranging with frequency combs from single cavity free-running laser oscillators[J]. Optics Express, 2021, 29(16): 24910-24918.

Research on Dual-Comb-Based Three-Dimensional Imaging System Aiming for Aero-Engine Blades Surface Measurement

Li Sixuan¹, Liu Tingting^{1,2}, Chen Caixin¹, Yan Ming¹

1. State Key Laboratory of Precision Spectroscopy, East China Normal University, Shanghai 200062, China

2. Chongqing Key Laboratory of Precision Optics, Chongqing Institute of East China Normal University, Chongqing 401121, China

Abstract: High-precision, high-efficiency, low-cost, and real-time surface measuring of aero-engine blades provides a guarantee for prolonging the lifetime of the engine and protecting the life and property safety of the passengers. Aiming for that, this paper demonstrates a dual-comb-based three-dimensional(3D)imaging system which combines the advantages of dual-comb ranging and high-speed two-dimensional scanning mirrors. In the 3D imaging system, the two independent optical combs were replaced by an integrated single-cavity dual-wavelength laser and a high-bandwidth phase-locking loop was used to stabilize the frequency of the repetition rate difference signal (Δf_r). As a result, the frequency deviation of Δf_r signal was reduced from 0.8 Hz to an unprecedented 720 μ Hz, which achieved three orders of magnitude lower. With the use of high-speed two-dimensional scanning mirrors, the system can complete a 40 mm×40 mm 3D image in seconds with a static measurement error of 2 μ m (1 s measurement time). The dual-comb-based 3D imaging system developed in this paper is advantageous with large measurement range, high precision, fast data update, and low cost and is expected to provide a new technological approach for high-precision, real-time surface measuring of aero-engine blades or any other key components.

Key Words: aero-engine blades; surface measurement; optical frequency comb; dual-comb ranging; single-cavity dual-comb

Received: 2025-01-07; Revised: 2025-04-03; Accepted: 2025-05-09

Foundation item: Aeronautical Science Foundation of China (202200220X8001)