引用格式: LI Jing, ZHANG Wei, SHAO Bin, et al. Low-coherence Heterodyne Interference Clearance Measurement Technology Based on Differential Detection[J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(9):0906004 李靖,张伟,邵斌,等. 基于差分探测的低相干外差干涉间隙测量技术[J].光子学报,2021,50(9):0906004

基于差分探测的低相干外差干涉间隙测量技术

李靖,张伟,邵斌,樊星,章鹏,陈伟民

(重庆大学光电工程学院光电技术及系统教育部重点实验室,重庆400044)

摘 要:针对低相干外差干涉间隙测量技术应用于发动机、燃气轮机等设备内部高温、高压、强振等恶 劣环境时,面临信号弱、信噪比差导致测量范围受限的问题,提出利用差分探测技术来提升拍频信号信 噪比的方法。围绕所提出的方法,建立了严格的间隙测量模型,并从理论上说明了其具有提升信号信 噪比、扩大测量范围的优势。为证明方法的可行性,搭建了全光纤低相干外差干涉间隙测量实验验证 系统,进行单端探测与差分探测的间隙测量对比实验。实验结果表明在同等测量条件下,差分探测方 式将信噪比提高了4.22倍,测量范围由10 mm增加到了20 mm。进一步,对系统的测量不确定进行了 分析,理论和实验均表明,由于光纤延迟器件扫描速度的不稳定性,系统测量不确定度整体上具有随测 量间隙增大而增大的趋势,但在20 mm测量范围内,测量不确定不超过15 μm。

关键词:光学技术与仪器;间隙测量;低相干干涉;外差干涉;差分探测;光纤;发动机

中图分类号:O436.1 **文献标识码**:A **doi**:10.3788/gzxb20215009.0906004

Low-coherence Heterodyne Interference Clearance Measurement Technology Based on Differential Detection

LI Jing, ZHANG Wei, SHAO Bin, FAN Xing, ZHANG Peng, CHEN Weimin

(The Key Laboratory for Optoelectronic Technology & Systems of Ministry of Education, College of Optoelectronic Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: The clearance measurement environment of engine and gas turbine is harsh due to the high temperature, high pressure, and strong vibration. In such a measurement environment, the low-coherence heterodyne interferometric clearance measurement technique faces the problem of weak signal and the limited measurement range caused by the low Signal-to-Noise Ratio (SNR). To address this problem, a method using differential detection is proposed to enhance the SNR. The theoretical measurement model of the proposed method is strictly established, and the model indicates the method has the advantages of improving the SNR and expanding the measurement range. To prove the feasibility of the method, an all-fiber clearance measurement experimental verification system is built, and a comparison experiment between single-ended detection and differential detection is carried out. The experiment result shows that, under the same measurement range from 10 mm to 20 mm. Furthermore, the measurement uncertainty of the system is analyzed. It is theoretically and experimentally found that, due to the scanning speed instability of the optical fiber delay device, the measurement uncertainty increases with the increase of the

http://www.photon.ac.cn

基金项目:国家自然科学基金(No. 51805054),中国博士后科学基金项目(No. 2018M643405),中国航发集团创新平台项目(No. SHYS-GXDPL-18)

第一作者:李靖(1995—),男,硕士研究生,主要研究方向为光纤传感与光电技术。Email: jng.li@outllook.com

导 师:陈伟民(1955—),男,教授,博士,主要研究方向为光电技术、精密测试、在线监测。Email:wmchen@cqu.edu.cn

通讯作者:张伟(1990一),男,讲师,博士后,主要研究方向为光纤传感与光电技术。Email:zhangwei1213052@126.com

收稿日期:2021-01-19;录用日期:2021-04-01

clearance. But within 20 mm, the measurement uncertainty is less than 15 μm. **Key words**: Optical technology and instruments; Clearance measurement; Low-coherence interference; Heterodyne interference; Differential detection; Optical fiber; Engine **OCIS Codes**: 060.2840; 040.2840; 120.3180; 120.4640; 120.4820

0 引言

对于发动机、燃汽轮机等设备,转子的径向间隙^[1-4](也称叶尖间隙)以及轴向间隙^[5-8]与设备的运行效率 和安全性息息相关。为了增加设备的工作效率,间隙需要尽可能小,但同时又要避免转子与静子件之间的 摩擦碰撞。在研制和运行阶段,对间隙进行精确测量可为设备性能的提升及设备安全性的保障提供有效措 施。由于发动机、燃汽轮机等设备存在多级转子,因此不同部位处的间隙变动范围大小不一,既存在毫米级 的叶尖间隙,也存在厘米级的轴向间隙。同时,在对这些间隙进行测量时,传感器的安装空间狭小,且传感 器工作于高温、高压、高速强振的恶劣环境中。因此,有必要研究具有传感探头尺寸小、系统测量范围大、测 量精度高、且抗振耐温等特点的测量技术。

在发动机、燃汽轮机间隙测量领域,目前应用比较多的间隙测量方法有电容法^[9-12]、电涡流法^[13-14]、微波 法^[15-18]以及光强比例法^[19-22]等。电容法和电涡流法是最为成熟的两种间隙测量方法,但其测量范围一般不 超过厘米级,且其传感探头尺寸会随着测量范围增大而增大;微波法具有厘米级的测量范围,能够在多污染 物的环境下进行测量,然而其传感探头的尺寸也较大;光强比例法具有光纤探头微小的优势,但是其测量范 围为毫米级,测量精度易受被测表面材质及粗糙度等诸多因素影响。上述方法具有各自的优势特点,但不 能同时满足小尺寸、大范围、高精度的需求。

低相干干涉技术^[23-27]常被用于绝对距离测量,具有测量精度高的特点,但由于宽带光源相干长度短,测量范围往往有限;外差干涉^[28-32]可以被用于振动位移测量,但是不能实现绝对距离测量。为了满足恶劣环境下的大范围间隙准确测量的需求,KEMPEA等在2003年提出一种将低相干干涉与外差干涉相结合的间隙测量方法,并进行了原理性验证^[33]以及燃气涡轮机叶尖间隙实验测试^[34]。但KEMPEA等未给出其严格的理论测量模型,并且在实验中发现测量信号的信噪比较低^[34],甚至低于检测极限,导致实际测量范围有限。相关问题后续未见持续报道。理论上,此方法可达到厘米级的测量范围,且只需一根光纤探头进行信号的探测和传输,非常适合于发动机、燃汽轮机等狭小安装空间环境下的间隙测量,因此有进一步研究的价值。针对此方法在高温、高压、强振等恶劣环境下信号弱、信噪比较低导致测量范围受限的问题,本文提出采用平衡探测器来接收干涉光信号、基于差分探测的原理来提升信号信噪比的方法,并从理论和实验两方面进行验证。

1 理论

在KEMPE A 提出的低相干外差干涉间隙测量技术中,采用单个光电探测器作为光接收器件,然而单端 探测器不能充分利用本振光的光功率,通常只能用到本振光光功率的10%,甚至更低,同时由于本振光中存 在过剩的强度噪声以及光电探测器的散粒噪声等,获得的干涉信号噪声较高,信噪比较低^[35]。而差分探测 通过两束相位相反的光相减,提高了本振光光功率的利用率,同时还能消除过剩强度噪声,以及抑制系统中 的共模干扰,可以提升信号强度和信号信噪比。

本文基于差分探测的原理对低相干外差干涉测量技术进行改进,经改进的间隙测量系统整体结构如图 1所示。宽带光源发射出的光经过环形器后,分别在光纤探头表面与被测目标表面发生反射,形成光信号 E_1 与 E_2 ;光信号 E_1 与 E_2 通过环形器第3端口后进入1×2光纤耦合器,1×2光纤耦合器将 E_1 与 E_2 信号能量分成 两半,然后分别经过可调光纤延迟线(Variable Delay Line, VDL)(记为A路)和声光调制器(Acousto-Optic Modulator, AOM)(记为B路),对应形成 E_{1A} 、 E_{2A} 、 E_{1B} 和 E_{2B} ,光纤延迟线的作用是调节A路的光程(Optical Path, OP) L_D ,声光调制器的作用是对光进行 Δf_B 的频移;当光信号 E_{1A} 与光信号 E_{2B} 的光程差在宽带光源的 相干长度 L_c 以内时,两光信号会在2×2耦合器两个输出端口发生外差干涉,产生两个频率为 Δf_B 、相位相差 π 的拍频信号;两拍频信号经过平衡光电探测器转换为电信号U(t),U(t)通过数据采集模块(Data Acquisition, DAQ)采集并输入电脑(Personal Computer, PC),通过U(t)进行拍频信号的检测便可实现间隙 L的测量。



图1 基于差分探测的低相干外差干涉间隙测量原理

Fig. 1 Schematic diagram of low-coherence heterodyne interference clearance measurement based on differential detection

为简化推导,认为光源的光为频率为f的单色光;同时,由于光在空间、光器件中传播造成的光衰减并不 影响原理的分析,后续的推导中将其忽略。假设光纤探头端面反射的光信号记为信号*E*₁,其复数形式可表 示为

$$E_1(t) = A_1 \exp\left(-j2\pi ft\right) \tag{1}$$

式中,A1表示振幅。

部分光透过光纤探头,在被测目标表面发生反射后耦合回光纤,将其记为信号*E*₂,由于*E*₂相对于*E*₁存在时间延迟*t*₁=2*L*/*c*(*c*为光速),因此*E*₂可表示为

$$E_2(t) = A_2 \exp\left[-j2\pi f\left(t - t_L\right)\right]$$
(2)

光信号 E_1 经过A路与B路后形成 E_{1A} 和 E_{1B} ,由于光纤延迟线的存在, E_{1A} 相对 E_{1B} 存在时间延迟 $t_D = L_D/c$; 由于声光调制器的存在, E_{1B} 的信号会发生 Δf_B 的频移;因此 E_{1A} 和 E_{1B} 可分别表示为

$$E_{1A}(t) = \frac{A_1}{\sqrt{2}} \exp\left[-j2\pi f\left(t - t_D\right)\right]$$
(3)

$$E_{1B}(t) = \frac{A_1}{\sqrt{2}} \exp\left[-j2\pi \left(f + \Delta f_B\right)t\right]$$
(4)

同理,光信号E2经过A路与B路后形成E2A和E2B,可分别表示为

$$E_{2A}(t) = \frac{A_2}{\sqrt{2}} \exp\left[-j2\pi f \left(t - t_{\rm D} - t_{\rm L}\right)\right]$$
(5)

$$E_{2B}(t) = \frac{A_2}{\sqrt{2}} \exp\left[-j2\pi \left(f + \Delta f_B\right) \left(t - t_L\right)\right]$$
(6)

四路光*E*_{1A}、*E*_{1B}、*E*_{2A}和*E*_{2B}通过2×2耦合器后干涉获得两束光并通过平衡探测器两端口。假设平衡探测器的增益为α,平衡探测器的两端口转换电压*U*₊(*f*, *t*)和*U*₋(*f*, *t*)可表示为

$$U_{+}(f,t) = \frac{\alpha}{2} \Big[E_{1A} + E_{1B} + E_{2A} + E_{2B} \Big] \Big[E_{1A} + E_{1B} + E_{2A} + E_{2B} \Big]^{*} = \frac{\alpha}{2} \Big(A_{1}^{2} + A_{2}^{2} \Big) + \frac{\alpha}{2} A_{1} A_{2} \Big\{ \cos \big(2\pi f t_{L} \big) + \cos \big[2\pi \big(f + \Delta f_{B} \big) t_{L} \big] \Big\} + \frac{\alpha}{2} \Big\{ A_{1}^{2} \cos \big[2\pi \big(\Delta f_{B} t + f t_{D} \big) \big] + A_{1} A_{2} \cos \Big\{ 2\pi \Big[\Delta f_{B} \big(t - t_{L} \big) + f \big(t_{D} - t_{L} \big) \big] \Big\} + (7) A_{1} A_{2} \cos \Big\{ 2\pi \Big[\Delta f_{B} t + f \big(t_{D} + t_{L} \big) \Big] \Big\} + A_{2}^{2} \cos \Big\{ 2\pi \Big[\Delta f_{B} \big(t - t_{L} \big) + f t_{D} \Big] \Big\} \Big\}$$

$$U_{-}(f,t) = \frac{\alpha}{2} \Big[E_{1A} - E_{1B} + E_{2A} - E_{2B} \Big] \Big[E_{1A} - E_{1B} + E_{2A} - E_{2B} \Big]^{*} = \frac{\alpha}{2} \Big(A_{1}^{2} + A_{2}^{2} \Big) + \frac{\alpha}{2} A_{1} A_{2} \Big\{ \cos \big(2\pi f t_{L} \big) + \cos \big(2\pi f t_{L} \big) \Big\} \Big\}$$

$$U_{-}(f,t) = \frac{\alpha}{2} \Big[E_{1A} - E_{1B} + E_{2A} - E_{2B} \Big] \Big[E_{1A} - E_{1B} + E_{2A} - E_{2B} \Big]^{*} = \frac{\alpha}{2} \Big(A_{1}^{2} + A_{2}^{2} \Big) + \frac{\alpha}{2} A_{1} A_{2} \Big\{ \cos \big(2\pi f t_{L} \big) + \cos \big(2\pi f t_{L} \big) \Big\} \Big\}$$

$$(f,t) = \frac{\alpha}{2} \Big[E_{1A} - E_{1B} + E_{2A} - E_{2B} \Big] \Big[E_{1A} - E_{1B} + E_{2A} - E_{2B} \Big]^{*} = \frac{\alpha}{2} \Big(A_{1}^{2} + A_{2}^{2} \Big) + \frac{\alpha}{2} A_{1} A_{2} \Big\{ \cos \big(2\pi f t_{L} \big) + \cos \big(2\pi f t_{L} \big) \Big\} \Big\}$$

$$(f,t) = \frac{\alpha}{2} \Big[E_{1A} - E_{1B} + E_{2A} - E_{2B} \Big] \Big[E_{1A} - E_{1B} + E_{2A} - E_{2B} \Big]^{*} = \frac{\alpha}{2} \Big(A_{1}^{2} + A_{2}^{2} \Big) + \frac{\alpha}{2} A_{1} A_{2} \Big\{ \cos \big(2\pi f t_{L} \big) + \cos \big(2\pi f t_{L} \big) \Big\} \Big\}$$

$$(f,t) = \frac{\alpha}{2} \Big[E_{1A} - E_{1B} + E_{2A} - E_{2B} \Big] \Big[E_{1A} - E_{1B} + E_{2A} - E_{2B} \Big]^{*} = \frac{\alpha}{2} \Big(A_{1}^{2} + A_{2}^{2} \Big) + \frac{\alpha}{2} A_{1} A_{2} \Big\{ \cos \big(2\pi f t_{L} \big) + \cos \big(2\pi f t_{L} \big) \Big\} \Big\}$$

$$(f,t) = \frac{\alpha}{2} \Big\{ 2\pi \Big[A_{1}^{2} + A_{2}^{2} \Big\} \Big\} \Big\}$$

根据式(7)和(8)可得平衡探测器的输出电压U(f,t)为

$$U(f,t) = U_{+}(f,t) - U_{-}(f,t) = \alpha \left\{ A_{1}^{2} \cos \left[2\pi \left(\Delta f_{B}t + ft_{D} \right) \right] + A_{1}A_{2} \cos \left\{ 2\pi \left[\Delta f_{B}(t-t_{L}) + f(t_{D}-t_{L}) \right] \right\} + A_{2}^{2} \cos \left\{ 2\pi \left[\Delta f_{B}(t-t_{L}) + ft_{D} \right] \right\} \right\}$$
(9)

由于光源实际是宽带光源,假设光源的归一化光谱分布为S(f)(S(f)为正实数),相干长度为L_c,实际输出电压U(t)将变为

$$U(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} U(f, t) S(f) df = \alpha \left\{ A_{1}^{2} \cos \left(2\pi \Delta f_{B} t + \varphi_{t_{D}} \right) + A_{2}^{2} \cos \left[2\pi \Delta f_{B} \left(t - t_{L} \right) + \varphi_{t_{D}} \right] \right\} \left| F[t_{D}] \right| + \alpha A_{1} A_{2} \cos \left[2\pi \Delta f_{B} \left(t - t_{L} \right) + \varphi_{t_{D} - t_{L}} \right] \right| F[t_{D} - t_{L}] + \alpha A_{1} A_{2} \cos \left(2\pi \Delta f_{B} t + \varphi_{t_{D} + t_{L}} \right) \left| F[t_{D} + t_{L}] \right|$$
(10)

式中, $F[x](x=t_{D},t_{D}-t_{L},或 t_{D}+t_{L})为S(f)对应的傅里叶变换,即$

$$F[x] = |F[x]| \exp\left[-j\varphi_x\right] = \int_{-\infty}^{+\infty} S(f) e^{-j2\pi fx} df$$
(11)

式中, $\varphi_x(x=t_{D,}t_D-t_{L,}$ 或 t_D+t_L)表示对应的相位。

由式(10)可以看出,最终的输出为经过|*F*[*t*_b]|、|*F*[*t*_b-*t*_L]|、以及|*F*[*t*_b+*t*_L]|幅度调制的频率为 $\Delta f_{\rm B}$ 的拍频 信号;当*c*|*t*_b|=|*L*_b|=0m、*c*|*t*_b-*t*_L]=|*L*_b-2*L*|=0m、*c*|*t*_b+*t*_L]=|*L*_b+2*L*|=0m时,|*F*[*t*_b]|、|*F*[*t*_b-*t*_L]|和|*F*[*t*_b+*t*_L]| 分别达到最大值,对应时刻的拍频信号对比度会显著增强;当*c*|*t*_b]=|*L*_b|>*L*_c、*c*|*t*_b-*t*_L]=|*L*_b-*L*₀-2*L*|>*L*_c、 *c*|*t*_b-*t*_b+*t*_L]=|*L*_b+2*L*|>*L*_c时,|*F*[*t*_b]|、|*F*[*t*_b-*t*_L]|和|*F*[*t*_b+*t*_L]|迅速衰减并趋于0,对应调制的拍频信号的对比 度趋于0。由于宽带光源相干长度*L*_c短,因此可以通过检测拍频信号是否出现来定位间隙*L*。具体地,假设 当光纤延迟线以速度*V*_b扫描时,光程*L*_b则可以表示为

$$L_{\rm D} = L_{\rm D0} + V_{\rm D}t \tag{12}$$

式中,L_{D0}表示初始光程延迟。光纤延迟线的光程L_D、待测间隙L以及输出电压信号U(t)的波形如图2所示。

如图 2 所示,当 $L_{\rm D}$ 为 $L_{\rm D0}$ 和 2L+ $L_{\rm D0}$ 时(时间上对应 t_0 和 t_1), $|F[t_{\rm D}]|$ 和 $|F[t_{\rm D}-t_{\rm L}]|$ 达到最大值,对应的输出 U(t)将出现短暂的拍频信号。通过检测参考拍频与信号拍频出现的时间差 $\Delta t = t_1 - t_0$,便可通过式(13)解算 出间隙。

$$L = V_{\rm D} \Delta t / 2 \tag{13}$$



图 2 输出电压与可调光纤延迟线光程和间隙的关系 Fig. 2 The relationship between output voltage and VDL optical path and clearance

根据式(7)、(8)和(9)可知,采用平衡探测的方式可以消除与直流分量相关的强度噪声,同时还能抑制 信号中的共模干扰,并将交流分量的幅值提升一倍,使交流分量的功率谱强度提升6dB,在第2节中,将以实 测信号具体说明通过频域解调间隙的方法。此外,如果光纤探头接收到的被测目标表面反射光足够强,该 方法的测量范围理论上仅受可调光纤延迟线扫描范围L₀的限制,容易达到厘米级的测量范围。然而,随着 被测间隙的增大,光纤探头实际接收到的反射光会减少,同时实际发动机内部间隙测量环境恶劣,这些综合 因素很容易导致信号弱、信噪比降低至信号检测极限,进而限制系统实际的测量范围。为此,通过差分探测 提升信噪比,可以保障信号在更大间隙、更恶劣环境条件下可测,从而具有扩大系统实际测量范围的效果。

2 实验系统及测量结果

2.1 实验系统

为验证测量原理,搭建了如图3所示的实验系统。



图 3 实验系统示意图 Fig. 3 Schematic diagram of experimental system

实验系统主要由间隙模拟平台和间隙测量系统两部分组成。间隙模拟平台主要由光纤探头(切平的光 纤端面)、铝制反射面、以及位移台组成。光纤探头安装在电控位移台上(位移分辨率0.625 μm),通过电控 位移台,可以使光纤探头和反射面之间形成标准间隙。实验前,在光纤探头内通入650 nm 红色激光对测量 光束与位移台位移方向的夹角进行了精密调整,以保证两者平行(虽然光纤端面出射光具有一定发散性,但 是在2 cm 间隙的反射面上形成的光斑直径不超过6 nm,这不影响测量点位置的准确判断)。另外,需要说 明的是,本文未对光纤探头出射光进行准直,主要是考虑到对于如发动机涡轮部分的间隙测量,其环境温度 高,很难保证准直透镜及其与光纤的耦合性能不退化,而仅采用耐高温光纤端面做探头虽然会损失一部分 反射光能量,但理论上可以提升探头的耐温性,这可为探头恶劣环境耐受性的设计留出更大的空间。间隙 测量系统各部件按照图1进行连接,主要部件的主要参数如下:宽带光源(放大自发辐射光源(Amplified Spontaneous Emission,ASE),上海瀚宇通信公司,型号:VASS-C-Er-B-17-GF,功率40 mW,光谱范围 1528~1563 nm)、声光调制器(重庆尚茂科技发展有限公司,型号:SGTF40-1550-1,移频量40 MHz)、可调 光纤延迟线(北京中讯光普科技有限公司,型号:VDL-R-MOS-33-15-SM-FA,扫描范围0~100 mm)、平 衡探测器(北京康冠世纪光电科技有限公司,型号:KG-BPR-200-A-FC,带宽200M)、数据采集模块(采样 率6.25 Msa)以及电脑;测量信号保存至电脑后进行间隙解调处理。

2.2 实验测试结果

为清楚说明间隙解调原理,图4(a)截取了4mm间隙下的部分时域测量电压信号,由图4(a)可以看出在 0s时刻附近出现了明显的拍频信号,在0.97s时刻附近拍频信号隐约可见。为了使0.97s附近的拍频信号 可见度更高,对时域信号按1.479ms进行分段计算功率谱,每段对应的光程OP为12.179μm(可调光纤延迟

线速度 $V_{\rm p}$ =8.2369 mm/s),每段功率谱的最大值与对应的 OP/2 的关系如图 4(b),从图 4(b)中可以清晰地 判断在 4 mm 处出现了明显的拍频信号,由此可解调出间隙为 4 mm。



图 4 4 mm 间隙下的时域与频域信号 Fig. 4 Time domain and frequency domain signals of 4 mm clearance

为了说明平衡探测方式的优势,仅将2×2耦合器的一路输出信号接入平衡探测器形成单端输入方式。 在0~20 mm范围内,通过电控位移台以2 mm步进量设置标准间隙,每个间隙测量处分别采用单端输入与 差分输入重复测量20次。

图 5 为单端输入与差分输入下,信号功率谱强度随间隙的变化曲线,从图中可以看出,采用差分输入的 方式相较于单端输入的方式功率谱强度得到了提升,功率谱强度的平均值提升了 6.33 dB(约4.22倍)。理 论上,差分输入方式使得时域电压信号提升为单端输入方式的 2 倍,功率谱强度提升 4 倍,这与实验测试结 果相符。当间隙超过 10 mm 后,由于回光变得微弱,采用单端输入的方式已经不能在频域内检测到明显的 功率谱峰;而采用差分输入的方式,系统最大量程可测到 20 mm。



图 5 单端输入与差分输入功率谱强度变化曲线 Fig. 5 Power spectral intensity curves for single-ended versus differential input

图 6为20次重复测量的平均值与测量误差((测量间隙-标准间隙)的标准差,标准间隙由位移台提供) 曲线,从图 6(a)中可以看出,单端输入与差分输入下测量结果均具有良好的线性度;从图 6(b)中可以看出, 随着间隙的增大,误差具有增大的趋势。在10 mm范围内,单端输入与差分输入的最大标准差分别为11.16 μm 和11.54 μm;在 20 mm范围内差分输入的最大标准差为14.56 μm。



图 6 单端输入与差分输入的对比实验结果 Fig. 6 Comparison of experimental results between single-ended input and differential input

2.3 系统不确定度分析

为分析系统测量误差的来源,对式(13)进行全微分,并根据误差合成公式,可以得到测量结果的不确定 度为

$$\sigma_{\rm L} = \sqrt{\left(\frac{\Delta t}{2}\right)^2 \sigma_{V_{\rm D}}^2 + \left(\frac{V_{\rm D}}{2}\right)^2 \sigma_{\Delta t}^2} \tag{14}$$

式中, $\sigma_{v_{\rm D}}$ 和 $\sigma_{\Delta t}$ 分别为可调光纤延迟线扫描速度的不确定度和时间差测量的不确定度,且 $\sigma_{v_{\rm D}}$ 与 $\sigma_{\Delta t}$ 彼此独立不相关。

2.3.1 时间差测量的不确定度σΔι

因为 $\Delta t = t_1 - t_0$,所以时间差 Δt 的测量不确定度主要由信号拍频时间测量不确定度 σ_{t_1} 与基准拍频时间测量不确定度 σ_{t_0} 引起。由于间隙解调算法在时域采取1.479 ms分段计算功率谱,因此 t_1 和 t_0 可能的误差应在±0.74 ms范围内,且属于均匀分布,于是 $\sigma_{t_0} = \sigma_{t_1} = 0.74/\sqrt{3} \approx 0.427$ ms;又由于 t_1 与 t_0 相互独立,于是

$$\sigma_{\Delta t} = \sqrt{\sigma_{\Delta t_0}^2 + \sigma_{\Delta t_1}^2} \approx 0.604 \,\mathrm{ms} \tag{15}$$

2.3.2 可调光纤延迟线扫描速度的不确定度σ_{Vn}

为确定 VDL 扫描速度的不确定度,设置其扫描范围 ΔL 为 44 mm,并测量其扫描起始至结束之间的时间差 Δt_s ,最后通过 $\Delta L/\Delta t_s$ 来测定 VDL 的扫描速度 $V_{\rm Do}$ 。对该过程重复进行 20次,根据 20次重复测量的结果获得 VDL 扫描速度的不确定度 $\sigma_{V_{\rm D}}$ 。VDL 扫描速度 20次重复测量的结果为: $V_{\rm De}$ =8.239 0,8.229 9,8.239 0,8.234 4,8.239 0,8.236 7,8.241 3,8.239 0,8.236 7,8.232 2,8.239 0,8.232 2,8.239 0,8.232 2,8.243 6,8.232 2,8.243 6,8.232 2,8.243 6,8.232 2 mm/s。20次重复测量平均值 $\overline{V}_{\rm D}$ =8.236 9 mm/s。于是由 VDL 扫描速度 的非稳定性所引入的不确定度为

$$\sigma_{V_{\rm D}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} \left(V_{\rm Di} - \overline{V}_{\rm D} \right)^2}{n-1}} = 0.0044 \,\mathrm{mm/s}$$
(16)

2.3.3 合成不确定度σ_L

根据式(14)~(16)可以计算得到系统测量结果的合成不确定的表达式为

$$\sigma_{\rm L}(L) \approx \sqrt{(0.29L^2 + 6.19) \times 10^{-6}} \tag{17}$$

根据式(17),图7画出了系统不确定度随测量间隙变化的曲线:从图中可以看出系统测量不确定度整体 上具有随测量间隙增大而增大的趋势,这种趋势和实验结果相似;而造成该现象的主要原因在于,随着被测 间隙的增大,时间差 Δt 也会增大,导致 $V_{\rm D}$ 的偏差被不断累积。本文分段将信号从时域变换到频域,在假设 $\overline{V}_{\rm D}$ 没有偏差的情况下,这种处理方法引入的系统测量不确定约为2.5 μm,具有较高的精度。理论上,该系统 在 20 mm 范围内的最大不确定度为11.05 μm,而实际测量的最大不确定度为14.56 μm,两者相近,小许偏差



可能由于测量光束与位移台位移方向非完美平行引入的阿贝误差造成。

图7 系统测量的理论不确定度随测量间隙的变化曲线 Fig. 7 Relationship of theoretical measurement uncertainty of system and measuring clearance

3 结论

给出了低相干外差干涉间隙测量方法的理论模型,并提出了差分探测的改进方案,将测量信号的信噪 比提升了4.22倍,测量范围提升了1倍。搭建实验系统进行了原理验证性测试实验,并进行了系统测量不确 定度分析,理论和实验证明低相干外差干涉的方法具有实现高精度、大范围的间隙测量能力。目前,在实验 室环境下,所搭建的实验系统在20mm范围内测量的最大标准差为14.56 μm。后续将对高温光纤探头的研 制、光纤探头以及测量系统恶劣环境的耐受性进行更深入的研究。

参考文献

- SHEARD A G. Blade by blade tip clearance measurement [J]. International Journal of Rotating Machinery, 2011, 2011 (1): 1-13.
- [2] DU J, LIN F, ZHANG H W, et al. Numerical simulation on the effect of tip clearance size on unsteadiness in tip clearance flow[J]. Journal of Thermal Science, 2008, 17(4): 337–342.
- [3] YU B, KE H W, SHEN E Y, et al. A review of blade tip clearance-measuring technologies for gas turbine engines [J]. Measurement & Control, 2020, 53(3): 339-357.
- [4] TAN L, XIE Z F, LIU Y B, et al. Influence of T-shape tip clearance on performance of a mixed-flow pump [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy, 2018, 232(4): 386-396.
- [5] JIAO Junfeng, SONG Hongchao, JI Lucheng. Research on the effect of inter-row spacing on the shock wave structure and performance of turbine[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2017, 38(1): 62-67.
 焦俊峰, 宋红超,季路城. 轴向间距对涡轮激波结构及性能影响研究[J]. 工程热物理学报, 2017, 38(1): 62-67.
- [6] LIU Dongjian, LI Jun, JIANG Aiwu, et al. Influence of axial gap on compressor passage blockage and aerodynamic performance[J]. Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica, 2015, 36(11): 3522-3533.
 - 刘东健,李军,蒋爱武,等.轴向间距对压气机通道堵塞及总性能的影响[J].航空学报,2015,36(11):3522-3533.
- [7] CAO L, ZHANG Y Y, WANG Z W, et al. Effect of axial clearance on the efficiency of a shrouded centrifugal pump[J]. Journal of Fluids Engineering-Transactions of the Asme, 2015, 137(7): 071101.
- [8] DANISH S N, QURESHI S R, IMRAN M M, et al. Effect of tip clearance and rotor-stator axial gap on the efficiency of a multistage compressor[J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 99:988-995.
- [9] FABIAN T, PRINZ F B, BRASSEUR G. Capacitive sensor for active tip clearance control in a palm-sized gas turbine generator[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2005, 54(3): 1133-1143.
- [10] STEINER A. Techniques for blade tip clearance measurements with capacitive probes [J]. Measurement Science and Technology, 2000, 11(7): 865-869.
- [11] 龙成.电容调频式叶尖间隙测量技术研究[D].天津:天津大学,2009.
- [12] 马标.薄片电容式间隙测量技术研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2013.
- [13] WANG Weimin, SHANG Wen, YAO Jianfei, et al. A blade tip-timing measurement study based on eddy current technology[J]. Journal of Beijing University of Chemical Technology (Natural Science Edition), 2014, 41(3):102-107.
 王维民,尚文,姚剑飞,等.基于电涡流技术的叶尖间隙及定时测量研究[J].北京化工大学学报(自然科学版), 2014, 41(3): 102-107.
- [14] HU Tianlin, XIE Haihe, YAN Huangping, et al. Measurement model and tip clearance's spatial filtering effect of eddy displacement sensor[J]. Journal of Xiamen University (Natural Science), 2014, 53(1): 66-70.

胡天林,谢海鹤,颜黄苹,等.电涡流位移传感器测量模型及其在叶尖间隙测量中的空间滤波效应[J].厦门大学学报(自然科学版),2014,53(1):66-70.

- [15] ZHANG Jilong, DUAN Fajie, NIU Guangyue. Blade tip clearance and blade tip timing measurement based on microwave sensors[J]. Control Engineering of China, 2019, 36(7): 1233-1238.
- 张济龙,段发阶,牛广越.基于微波传感器的叶尖间隙与叶尖定时测量[J].控制工程,2019,36(7):1233-1238.
- [16] WOIKE M, ABDUL-AZIZ A, CLEM M. Structural health monitoring on turbine engines using microwave blade tip clearance sensors[C]. Smart Sensor Phenomena, Technology, Networks, and Systems Integration, 2014, 9062: 90620L.
- [17] WU Yahui, XIE Xingjuan, SUN Haolin. Research on measurement system for blade tip clearance based on microwave
 [J]. Metrology & Measurement Technology, 2016, 36(6): 37-39.
 吴娅辉,谢兴娟,孙浩琳.微波间隙测量系统研究[J]. 航空计测技术, 2016, 36(6): 37-39.
- [18] 常利坤. 位移变化量谐振法测试技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2016.
- [19] WU Bing, ZHANG Xiaodong, XIE Siying. Influence of roughness and inclination of blade tip on output behavior of reflective fiber bundle sensor[J]. Aeroengine, 2017, 43(2): 75-80.

吴冰,张小栋,谢思莹.叶尖粗糙度与倾角对光纤传感器输出特性影响[J].航空发动机,2017,43(2):75-80.

- [20] JIA B H, HE L. An optical fiber measurement system for blade tip clearance of engine [J]. International Journal of Aerospace Engineering, 2017, 2017: 1–9.
- [21] TONG Q B, MA H P, LIU L H, et al. Measurements of radiation vibrations of turbomachine blades using an opticalfiber displacement-sensing system[J]. Journal of Russian laser research, 2011, 32(3): 216–229.
- [22] GIL-GARCIA J M, SOLIS A, ARANGUREN G, et al. An architecture for on-line measurement of the tip clearance and time of arrival of a bladed disk of an aircraft engine[J]. Sensors, 2017, 17(10): 2162.
- [23] ZHANG X Z, LIU T G, JIANG J F, et al. Theoretical investigation of ultraprecise position determination by spatially modulated low-coherence interference fringe in optical fiber sensing[J]. IEEE Photonics Journal, 2016, 8(2): 1–9.
- [24] YAN X Y, CHENG J, BIAN D, et al. Surface profile measurement of doped silicon using near-infrared low-coherence light[J]. Applied Optics, 2019, 58(27): 7436-7442.
- [25] QI B, WINDER D E, LIU Y. Quadrature phase-shifted optical demodulator for low-coherence fiber-optic fabry-perot interferometric sensors[J]. Optics Express, 2019, 27(5): 7319-7329.
- [26] CHEN Chaoliang, GAO Wanrong, BIAN Haiyi. A method to improve precision and sensitivity of dispersion compensation in fourier domain optical coherence tomography[J]. Acta Photonica Sinica, 2014, 43(2): 0203001.
 陈朝良,高万荣,卞海溢.频域光学相干层析术系统中高准确度高灵敏度补偿色散法[J]. 光子学报, 2014, 43(2): 0203001.
- [27] QU Ming, ZHENG Junjie, LI Min, et al. Pixel-level observation of phase profile in liquid crystal on silicon by white light scanning interferometry[J]. Acta Photonica Sinica, 2019, 48(9): 0911004.
- 屈铭,郑俊杰,李敏,等.基于扫描白光干涉法的LCOS芯片像素级相位分析[J].光子学报,2019,48(9):0911004.
- [28] PARK Y, CHO K. Heterodyne interferometer scheme using a double pass in an acousto-optic modulator [J]. Optics Letters, 2011, 36(3): 331-333.
- [29] GRISHIN S G. Estimating phase errors in heterodyne laser interferometer measurement systems [J]. Measurement Techniques, 2011, 54(8): 865-868.
- [30] TITOV A A. Measurements of movements of micro-objects by the heterodyne method [J]. Measurement Techniques, 2017, 60(2): 156-160.
- [31] ZHANG Weijing, SUN Yunqiang. Phase characteristics of the collinear heterodyne interferometer system [J]. Acta Photonica Sinica, 2016, 45(4): 0414003.
- 张文静,孙运强.共线外差干涉系统相位特性[J].光子学报,2016,45(4):0414003.
- [32] CHANG X Y, YANG Y, LU J S, et al. Vibration amplitude range enhancement method for a heterodyne interferometer [J]. Optics Communication, 2020, 466: 125630.
- [33] KEMPE A, SCHLAMP S, RÖSGEN T, et al. Low-coherence interferometric tip-clearance probe[J]. Optics Letters, 2003, 28(15): 1323-1325.
- [34] KEMPE A, SCHLAMP S, RÖSGEN T, et al. Spatial and temporal high-resolution optical tip-clearance probe for harsh environments[C]. 13th International Symposium on Application of Laser Techniques to Fluid Mechanics, 2006: 1155.
- [35] YANG Yanling, LI Yanchao, GAO Long, et al. Numerical simulation of balanced heterodyne detection for coherent lidar
 [J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(10): 1918-1922.
 杨彦玲,李彦超,高龙,等.相干激光雷达平衡外差探测方法的数值仿真[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(10): 1918-1922.

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 51805054), China Postdoctoral Science Foundation (No. 2018M643405), Technology Innovation Platform Project of Aero Engine Corporation of China (AECC) (No. SHYS-GXDPL-18)