

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2311652

基于激光自混合原理的涡轮叶片转速与叶尖间隙 动态同步测量方法*

吴 军¹, 陈 杨¹, 赵君伟², 陈玖圣³, 郭润夏³

(1. 中国民航大学航空工程学院 天津 300300; 2. 忻州市综合检验检测中心 忻州 034000;
3. 中国民航大学电子信息与自动化学院 天津 300300)

摘 要:针对在高温等恶劣环境下,航空发动机高转速下涡轮叶尖间隙测量稳定性差、易受干扰、精准度低等问题,提出一种基于激光自混合原理的涡轮叶片转速与叶尖间隙动态同步测量方法。首先,提出基于三镜 F-P 腔模型的自混合干涉模型,并以此为基础构建测速和测距的数学模型;其次着重研究了涡轮叶片转动下动态自混合干涉信号的处理,将采集到的信号依次经过带通滤波以及小波降噪处理,再用 FFT 进行处理得到频率,由此求得叶尖间隙值;之后分别进行静态和动态激光自混合干涉测距实验进行验证;最后探讨影响动态测量的误差源,并对测量系统以及算法进行优化补偿。实验结果证明,该方法可以有效地提高涡轮叶片转速与叶尖间隙的动态同步测量的稳定性及精度,测速相对误差为 1%,叶尖间隙测量误差为 23 μm 。

关键词:激光自混合干涉;涡轮叶片转速;叶尖间隙;动态同步测量;信号处理

中图分类号: TN248 TH7 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.20

Dynamic synchronous measurement method of turbine blade speed and blade tip clearance based on laser self-mixing principle

Wu Jun¹, Chen Yang¹, Zhao Junwei², Chen Jiusheng³, Guo Runxia³

(1. School of Aeronautical Engineering, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;
2. Xinzhou Comprehensive Inspection and Testing Center, Xinzhou 034000, China; 3. School of Electronic
Information and Automation, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

Abstract: The turbine tip clearance measurement has problems of poor stability, easy interference and low accuracy at high speed of aero-engine in harsh environments such as high temperature. To address these issues, a dynamic synchronous measurement method of turbine blade speed and tip clearance based on the principle of laser self-mixing is proposed. Firstly, a self-hybrid interference model based on the three-mirror F-P cavity model is proposed, and a mathematical model of velocimetry and ranging is formulated on this basis. Then, the processing of dynamic self-mixing interference signals under the rotation of turbine blades is studied, and the collected signals are successively processed by bandpass filtering and wavelet noise reduction. FFT is used to obtain the frequency and the blade tip clearance value. After that, static and dynamic laser self-hybrid interferometric ranging experiments are implemented for verification. Finally, the error sources affecting dynamic measurement are discussed, and the measurement system and algorithm are optimized and compensated. Experimental results show that this method can effectively improve the stability and accuracy of synchronous measurement of turbine blade speed and tip clearance. The relative error of speed measurement is 1%, and the error of tip clearance measurement is 23 μm .

Keywords: laser self-mixing interference; turbine blade rotational speed; blade tip clearance; dynamically synchronized measurement; signal processing

收稿日期: 2023-07-10 Received Date: 2023-07-10

* 基金项目: 国家自然科学基金(52375557, 52005500, 62173331)、中央高校基本科研业务费高水平成果培育专项(3122023PY06)、中央高校科研基本业务费(3122023044)项目资助

0 引言

发动机作为飞机的关键组成部分,它的性能直接影响到飞机的可靠性和经济性^[1]。涡轮风扇式发动机的叶片转速和叶尖间隙的实时监测对于保证飞机的安全运行至关重要^[2-3]。研究显示,当高压压气机叶尖间隙增大 0.125 mm 时,发动机的能量转换效率会降低 0.5%,油耗会相应增加 0.2%,这将对航空发动机的性能产生重大影响。适当减小叶尖间隙可以显著提高发动机的效率和性能^[4-5]。然而,由于涡轮叶片的高转速会影响测量的准确性,因此,实现叶尖间隙和涡轮叶片转速同步测量对于确保飞机的安全性和可靠性具有重要的研究价值。

发动机叶尖间隙的测量主要有放电探针法、电涡流法、放电探针法、电容法及光纤法^[6]。放电探针法的原理是利用系统测量时会产生放电现象,叶尖间隙大小由电流大小决定。该方法的优点是简单并能适应恶劣的测量环境,缺点是要求发动机叶片必须为导体,且测量精度受机构的驱动精度影响。电涡流法的原理是基于电涡流效应,通过测量线圈的阻抗或感抗的大小来计算叶尖间隙值,当叶片通过传感器时,切割的磁感线产生涡流效应,当传感器感受到涡流变化时,相应的电阻会发生变化,并以电信号形式传递,以此来测定叶片速度和间隙值^[7-8]。该方法有着良好的灵敏度与分辨率,但是受发动机高温影响,以及叶片特定材料限制^[9-10]。电容法是当旋转叶片扫过安装在发动机机匣内壁上的固定探头时,会发生参数改变,根据电容值的改变量可以得到叶尖间隙值。该方法结构简单、测量精度高、响应速度快,但是有着和电涡流法测量相似的缺点^[11-12]。光学测量法以光作为测量手段,比其他测量方法响应频率快、系统性能可靠,可实现非接触性测量。该测量方法为光强测量,容易受到外界因素,如油污、表面粗糙度,具备较弱的抗干扰性^[13-14]。本文所使用的基于激光自混合干涉的测距系统有着测距精度高、功耗低和结构简单等优点^[15],该方法是基于频率进行测量。相比于传统对光强直接测量易受高温及叶片表面粗糙度等干扰,其测量结果会受到极大影响,精度大大降低。本文所用方法在激光自混合干涉中,虽然也会受到待测对象反射率、表面粗糙度的影响,且回光功率会影响干涉信号信噪比,但不会改变信号频率的大小,通过对采集到的激光自混合干涉信号进行相应的信号处理,测量频率的大小,有效避免了此类弊端,在稳定性以及抗干扰能力方面有着显著优势。同时,根据信号的周期时间可以测量转速的大小,对航空发动机动态叶尖间隙测量有着工程性意义。

1 激光自混合原理与信号处理研究

1.1 自混合干涉模型

激光自混合干涉是激光器出射光照射到目标表面后,一部分光被目标表面反射或散射,并返回激光器的谐振腔内^[16],与原有激光形成光反馈效应,激光器输出功率等参数发生改变。根据三镜 F-P (Fabry-Pérot) 腔模型,推导出激光自混合干涉的频率以及功率变化公式如式(1)和(2)所示。

$$\nu = \nu_0 - \frac{C}{2\pi\tau_L} \sin(2\pi\nu\tau_L + \arctan\alpha) \quad (1)$$

$$p = p_0(1 + m\cos 2\pi\nu\tau_L) \quad (2)$$

其中, p, p_0 分别为有光反馈和无光反馈时激光器的输出光功率^[17]; ν, ν_0 分别为有反馈和无反馈时激光器的频率; L 为激光器外腔长度; τ_L 为激光往返传播一次所用时间^[18], $\tau_L = 2L/c$, c 为光传播速度; α 为激光器线宽展宽因子; m 为激光器调制系数,由激光器内部相关参数决定; C 为光反馈强度系数^[19],用来表示外部反射体反射的光反馈量的强弱。实验中 C 为弱反馈条件。

1.2 激光自混合干涉测量原理

测距时需要将激光器进行调制,激光器的输出频率呈现线性相关^[20],可表示为:

$$\nu = \nu_0 + \gamma tr(t) \quad (3)$$

其中, γ 为激光器的电流调制系数, $tr(t)$ 为随时间变化的三角波信号。

将式(3)代入到激光自混合干涉功率变化式(2)中,将其做相应的变化之后,可以得出式(4):

$$p = p_0 \left[1 + m\cos \left(\frac{4\pi L}{c} \frac{\gamma dtr(t)}{dt} t + \frac{4\pi\nu_0 L}{c} \right) \right] \quad (4)$$

根据式(4)可以得到:

$$F = \cos(2\pi ft + \varphi) = \cos \left(\frac{4\pi L}{c} \frac{\gamma dtr(t)}{dt} t + \frac{4\pi\nu_0 L}{c} \right) \quad (5)$$

得到激光自混合干涉频率 f 和距离 L 的关系:

$$f = \frac{2\gamma}{c} \frac{dtr(t)}{dt} L \quad (6)$$

当采用三角波电流信号对激光器进行调制^[21],电流调制幅度为 ΔI ,调制频率为 f_m ,作为下文信号处理部分调制频率的选择依据,这两者与信号调制斜率 $\frac{dtr(t)}{dt}$ 三者之间关系可以表示为:

$$\frac{dtr(t)}{dt} = \frac{dI}{dt} = 4\Delta I f_m \quad (7)$$

激光器电流调制系数 γ 与激光器本身参数有关,其大小与激光器出射光波长大小、光传播速度以及波长调

制系数有关,计算公式如式(8)所示。

$$\gamma = \frac{df}{dI} = \frac{c}{\lambda^2} \times \frac{d\lambda}{dI} \quad (8)$$

其中, λ 为激光器出射光波长, $\frac{d\lambda}{dI}$ 为波长调制系数, 此参数由激光器本身的性质决定。

当采用三角波信号对激光器进行电流调制以后, 激光器的输出功率 p 随着调制信号的变化而呈现周期性的变化, 傅里叶变换处理之后呈现为频率分量。距离 L 与频率 f 存在比例关系, 激光器电流调制系数 γ 和信号斜率可以根据调制信号计算得知, 则只需得到频率 f 的大小即可得出距离 L 的值。通过对采集的信号直接进行快速傅里叶变换得到频率, 根据激光自混合测量公式进行距离的换算。

1.3 激光自混合动态测距的信号处理方法

转速信号参与的复杂动态测距信号采用正弦波调制可以有效避免三角波调制引起的相位突变。动态测量实验调制信号的频率设置在 50~1 000 Hz 范围内, 自混合干涉信号频率 f 与调制信号频率 f_m 有关, 并受到激光器调制系数 γ 影响, 实验中自混合干涉信号频率 f 在 500~30 000 Hz 范围内变化。动态自混合干涉信号经过光电流检测电路放大滤波处理, 用示波器采集相应信号, 将其作傅里叶变换即可得到相应频率来换算距离。动态信号的周期时间为目标物体涡轮风扇叶片两叶片经过的时间, 结合涡轮叶片数可以计算出涡轮叶片的转速, 将其与实际转速相对比可以评估测速精度。

实验中通过示波器采集到的信号会比静态时采集到的丰富许多, 比如调制信号、旋转物体引起的高频和低频噪声干扰信号等, 这些会叠加在动态自混合信号上, 会导致信噪比过低, 影响测量的精度, 大大增加信号处理的难度。激光自混合测量需对激光器进行调制, 但调制信号本身是一种干扰信号, 实验处理时采用带通滤波去除调制信号。静态测距采用集成在电路板上的光电流检测电路的低通滤波进行去噪, 但动态测量时一般的低通滤波不能满足其信号处理的要求。小波变换可以根据激光自混合动态干涉信号特点区分高频和低频分量噪声信号^[22], 在提高测量精度方面优势明显。对动态自混合干涉信号采用连续小波变换进行处理, 其原理如式(9)所示。

$$\psi_t(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (9)$$

式中: $\psi_t(a, b)$ 为小波基函数, a 为尺度因子, 其数值代表函数的宽窄程度, b 为平移因子, 代表小波基函数的时间位置^[23]。

小波降噪中首先需要进行小波基函数的选取, 根据动态自混合信号的特点来选择合适的的小波基。实验中采

集的激光自混合动态信号是一个连续的正弦信号, 在小波基函数的选择中, 为了避免相位畸变、减小重构误差^[24]、增加信号的平滑性, 选用具有正则性以及对称性的小波, 同时选择和信号波形相似的小波基函数降噪效果好, 结合动态自混合信号的正弦波形, 对比采用了最为相似的 coifN 小波。分解尺度为 $N=5$ 。阈值规则上采用固定阈值去噪, 常见的阈值函数有硬阈值与软阈值, 两者方法各有特点, 硬阈值会在信号的完整性保留上优于软阈值, 但信号去噪之后的平滑性, 差于软阈值方法; 软阈值方法优化信号之后整体连续性较好。分别进行软阈值以及硬阈值去噪, 根据信噪比 SNR 这一指标评估小波去噪的效果, 最终对阈值函数进行选择。其原理公式分别表示为:

$$w_r = \begin{cases} 0, & |w| < r \\ [\text{sgn}(w)(|w| - \lambda)], & |w| \geq r \end{cases} \quad (10)$$

$$w_r = \begin{cases} w, & |w| \geq r \\ 0, & |w| < r \end{cases} \quad (11)$$

根据激光自混合测量公式, 将降噪之后的信号进行快速傅里叶变换(fast Fourier transform, FFT)得到峰值频率, 换算出的距离即为叶尖间隙值。但是普通的 FFT 处理会让 FFT 变换中出现高频干扰和泄漏^[25], 不利于信号频率的准确测量。最直接的方法就是对 FFT 加窗函数, 可以有效消除高频干扰、减小泄漏, 对于测量精度会有明显改善。

2 基于激光自混合测距实验与误差优化

2.1 基于激光自混合干涉静态测距

本文搭建了激光自混合干涉测量系统, 如图 1 所示, 信号发生器用来产生三角波调制信号; 三路稳压源对电路板提供驱动电压及稳定工作电流; 高精度示波器用于采集激光自混合干涉信号; 激光器驱动电路及光电流处理电路集成在电路板上; 电路板用夹具固定在位移平台上, 通过底座上的可调旋钮将激光器向远离涡轮叶片的方向移动来模拟叶尖间隙由小到大的变化; 涡轮转子模拟平台固定在光学平台上; 闭环驱动器连接脉冲宽度调制可以控制涡轮叶片的转速; 测距仪为奥泰斯工业自动化公司生产的超高线性精度 CDX-30A 系列激光位移传感器, 其漫反射模式下量程 30 ± 5 mm, 线性精度为 ± 3 μm , 分辨率为 0.25 μm , 采样周期 25 μs , 通过调整测距仪的初始位置使测距仪与被测物体移动方向保持准直, 以控制物体每次移动时的精度。

实验选取的激光器为 HVS6003-002 型号激光器, 激光器与实验设置的各项参数如表 1 所示。

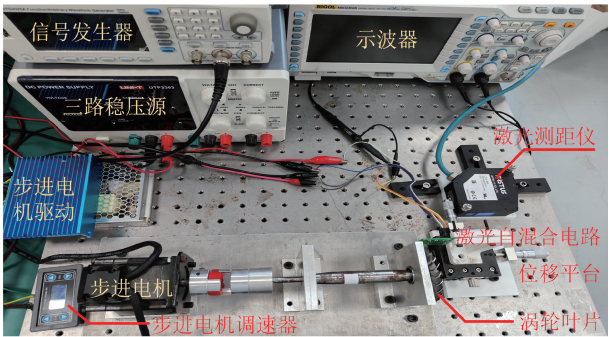


图1 激光自混合干涉测量系统

Fig. 1 Laser self-mixing interferometry system

表1 静态测距实验参数

Table 1 Static ranging experimental parameters				
波长调制系数($\text{m}\cdot\text{A}^{-1}$)	$\gamma/(\text{Hz}\cdot\text{A}^{-1})$	λ/m	f_m/Hz	采集频率/Hz
0.25×10^{-6}	103.8×10^{12}	850×10^{-9}	100	100×10^3

静态测量实验中所测量的目标物为叶片顶端,涡轮叶片顶端到激光器的距离即为所要测量的叶尖间隙的大小,示意图如图2所示。

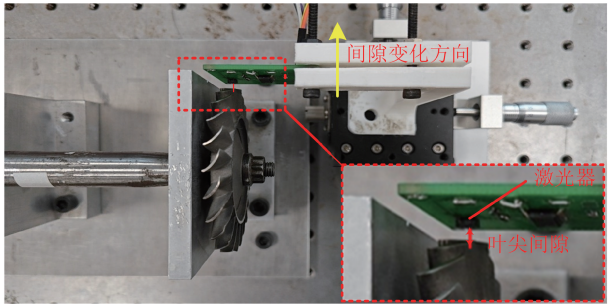


图2 叶片叶尖间隙测量示意图

Fig. 2 Diagram of blade tip clearance measurement

在开始实验前先调试激光器的大概测量范围,防止出现因超出范围而使信号失真的情况,将激光器调到合适的距离,采集信号,得到的信号如图3所示。

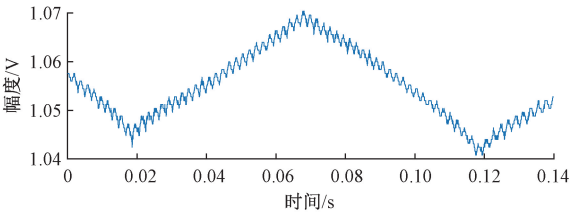


图3 激光自混合干涉测距信号图

Fig. 3 Diagram of laser self-mixing ranging signal

叶尖间隙的设计值一般为叶片长度的1%~2%,在飞机运行过程中,航空发动机涡轮转子和叶片在离心力以及飞机负载等影响下产生径向变化,叶尖间隙最大变化量在1 mm左右。实际工况下叶尖间隙变化范围在0.3~1.5 mm,实验中每次以步距0.01 mm缓慢移动底座,将采集到的激光自混合干涉测量信号数据进行FFT处理,由式(6)可以得到距离与频率的关系图。如图4所示。

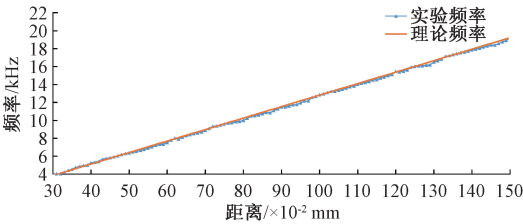


图4 实验频率与理论频率距离关系对比

Fig. 4 Comparison of experimental frequency and theoretical frequency distance

实验频率计算的距离与测距仪所测距离的误差如图5所示,为了降低数据的偶然性,在每个位置重复10次实验,将每个位置10次测量结果做平均误差,取其绝对值,测量距离的误差在20 μm 以内,均差在12 μm 。

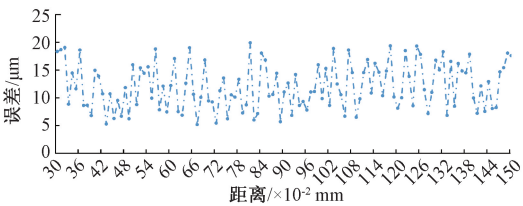


图5 静态测距误差图

Fig. 5 Diagram of static ranging error

2.2 基于激光自混合干涉动态测距

通过改变步进电机调速器而调节涡轮叶片转速的大小,通过位移平台控制激光器向远离涡轮叶片的方向移动固定距离进行实验,动态测量目标物体为旋转的涡轮叶片。动态测量实验各项参数如表2所示。

表2 动态测距实验参数

Table 2 Dynamic ranging experimental parameters			
$\gamma/(\text{Hz}\cdot\text{A}^{-1})$	f_m/Hz	采集频率/Hz	初始转速/rpm
103.8×10^{12}	100	100×10^3	548.5

将示波器采集的动态信号进行带通滤波,带通滤波参数设置为3 000~30 000 Hz,处理后的信号如图6所示。

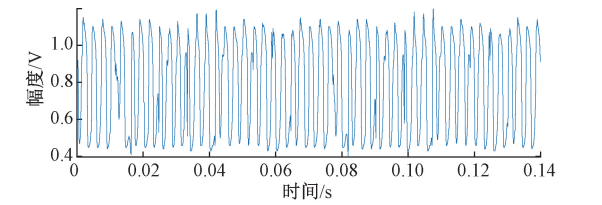


图 6 带通滤波之后的动态自混合干涉信号

Fig. 6 Dynamic self-mixing signal after bandpass filtering

将动态自混合干涉信号进行小波降噪,采用 *coif5* 小波,分解等级为 2,在软阈值及硬阈值下分别进行小波降噪,分别计算原始信号、软阈值及硬阈值去噪信号的信噪比,结果如表 3 所示。相较于原始信号信噪比 SNR 为 11.864 3,硬阈值 SNR 为 25.068 5,软阈值 SNR 为 22.659 3,信噪比 SNR 越大,降噪效果越好,故采用硬阈值去噪。

表 3 不同阈值函数去噪效果评估对比

Table 3 Comparison of denoising effect evaluation of different threshold function

阈值函数	信噪比/dB
硬阈值函数	25.068 5
软阈值函数	22.659 3

实验中动态自混合干涉信号的周期时间为两叶涡轮风扇叶片经过的时间,实验所用涡轮风扇叶片数为 23,结合信号周期可以计算出涡轮叶片的转速。为了评估测速精度的大小,需要知道涡轮叶片当前真实转速,实验采用测速仪对转速进行直接测量,测速仪为德力西公司生产的 DLS-2301 型号,测量量程为 2.5~99 999 rpm,采样率 1 次/s,误差最大为 $\pm 1\%$,测量分辨率为 1 rpm。为了尽可能减小测量时的误差,重复 10 次实验测得转速取其平均值,同样地,用测速仪测量 10 次取平均转速作为真值,相对误差如图 7 所示,从图中看出相对误差在 1% 以内。

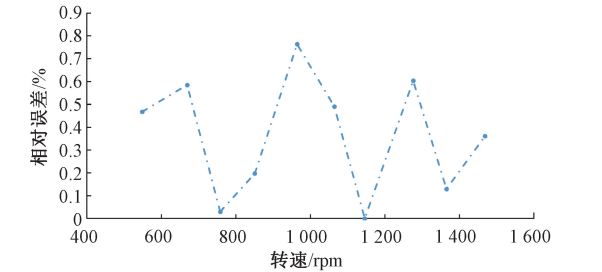


图 7 转速相对误差

Fig. 7 Relative error of rotational speed

在 0.3~1.5 mm 距离范围内每次移动 0.01 mm,用测距仪确保其精度,同时将转速分别设置在 548.5、850.6、

1 064.3、1 365.4 rpm 下进行实验,同静态测距一样,每个位置测量 10 次取平均值,为了方便计算,将其取绝对值,各转速下误差如图 8 所示,在 548.5 rpm 下误差在 25 μm 以内,均差为 16 μm ,在 850.6 rpm 下误差在 27 μm 以内,均差为 17 μm ,在 1 064.3 rpm 下误差在 30 μm 以内,均差为 19 μm ,在 1 365.4 rpm 下误差在 32 μm 以内,均差为 22 μm ,分析得出动态测量下总体误差在 32 μm 以内,最大均差在 22 μm 。通过观察实验结果可以发现随着叶片旋转转速增加,叶尖间隙测量误差会变大。

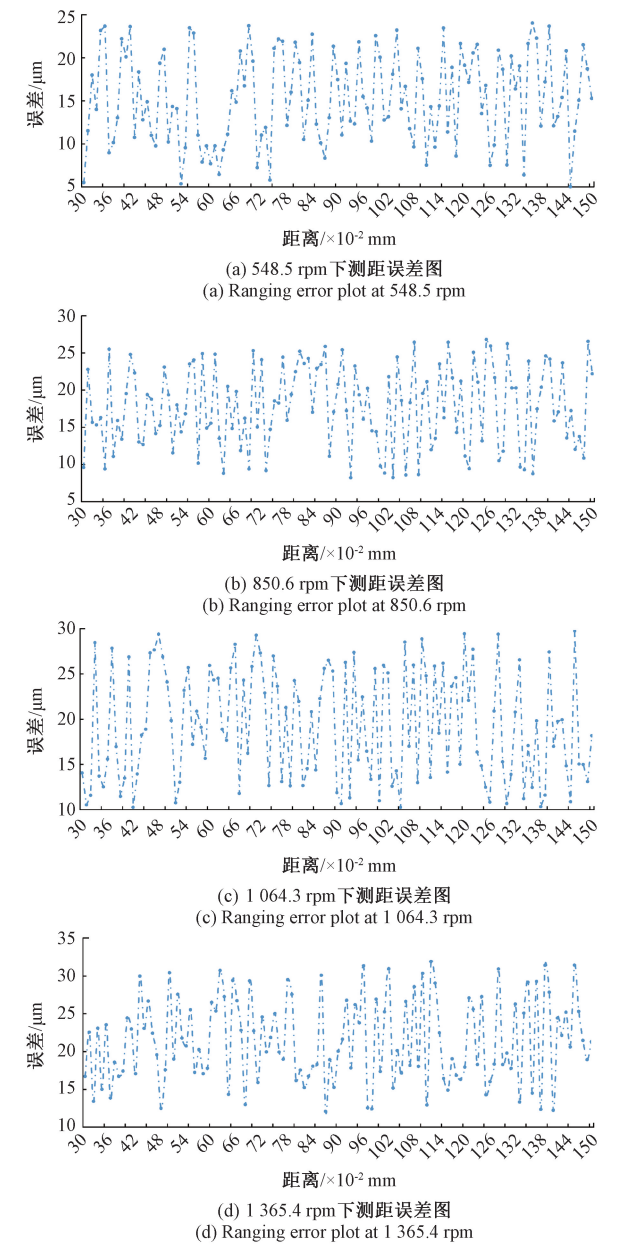


图 8 各转速下实验误差图

Fig. 8 Experimental error diagram at each speed

2.3 误差源的分析与改善

从数据处理结果可以发现,相比静态测距,动态测距相比静态测距会有较大误差,需要对动态测量误差的影响因素进行探讨,分析其误差来源并对精度进行改善。

调制频率的变化会影响测量系统的测量精度。当调制频率远离信号频率范围时测量精度高,但是当调制频率接近测量信号频率时,不利于激光自混合干涉信号的分离提取,会导致信号处理不当,从而影响测量精度。通过选取不同的调制频率分别进行实验,结果如图9所示,当 $f_m = 1\ 000\text{ Hz}$ 时,此时信号频率 f 在 $600 \sim 3\ 000\text{ Hz}$ 范围内,调制信号频率在自混合干涉信号频率的测量范围之内,信号频率的测量精度受到干扰明显降低,均差为 $39\ \mu\text{m}$,标准差为 $19\ \mu\text{m}$ 。而当调制信号频率 f_m 设置到 300 Hz 时,此时信号频率 f 在 $2\ 000 \sim 10\ 000\text{ Hz}$ 范围内,调制频率远离信号频率范围,对测距信号的干扰小,测距精度高,此时平均误差为 $15\ \mu\text{m}$,标准差为 $9\ \mu\text{m}$ 。当调制频率 f_m 设置在 100 Hz ,激光的调制电流幅度会增大,产生相当大的电流干扰从而影响 f 的测量精度,此时均差为 $20\ \mu\text{m}$,标准差为 $17\ \mu\text{m}$ 。综合实验结果,最终将调制信号频率 f_m 设置在 300 Hz 。

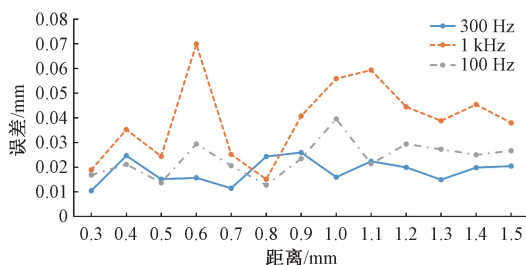


图9 不同频率调制信号下所测得误差对比

Fig. 9 Comparison of measured errors at different frequency modulated signals

实验中发现调制幅度 ΔI 太大时也会影响系统测量精度和分辨率。调制幅度 ΔI 很大会对拍频信号产生干扰,影响测量精度。而过小的调制幅度 ΔI 将会引起信号幅度减弱,影响其抗干扰能力。

选取不同的调制幅度进行实验,用 0.1 、 0.3 、 0.5 mAp-p 分别进行动态自混合干涉实验,三者的误差对比如图10所示,在 0.1 mAp-p 时均差为 $30\ \mu\text{m}$,标准差为 $15.5\ \mu\text{m}$,调制幅度为 0.5 mAp-p 时,均差为 $46\ \mu\text{m}$,标准差为 $19\ \mu\text{m}$ 。调制幅度 ΔI 为 0.3 mAp-p 时,均差为 $15\ \mu\text{m}$,均差为 $9\ \mu\text{m}$,此时系统的测量精度和分辨率相比之下最高。

在进行信号的提取时,为了控制成本以及测量系统的简化和元器件的小型化,同时尽量满足动态测距实时性测量的要求,使用FFT进行信号处理,但该方法存在缺点,主要是因为对有限数据进行傅里叶变换,该变换需要

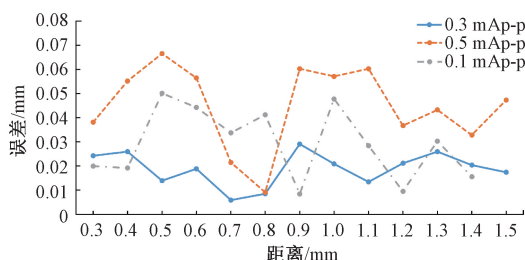


图10 不同电流调制幅度下所得实验误差

Fig. 10 Experimental error obtained at different modulation current amplitudes

对信号进行截取,如果被截断的信号不是周期性的,在频谱图中的原始特征谱线的能量就会泄露在其他特征谱线中,即形成了频谱的泄露效应。因此继续使用FFT可能对系统测量精度产生影响。为了减少频谱能量泄漏,可采用加窗FFT。

汉宁窗和汉明窗用数学形式表示为:

$$W_{\text{Hann}}(n) = 0.5 - 0.5 \cos\left(\frac{2\pi n}{N}\right), n = 0, \dots, N-1 \quad (12)$$

$$W_{\text{Hamm}}(n) = 0.5 - 0.46 \cos\left(\frac{2\pi n}{N}\right), n = 0, \dots, N-1 \quad (13)$$

其中, $W(n)$ 为时域窗口的数学表达式。

经过实验仿真对比,最后使用汉宁窗来对FFT进行优化,重复进行动态自混合干涉测距实验,对比优化前后测得的实验误差,结果如图11所示。

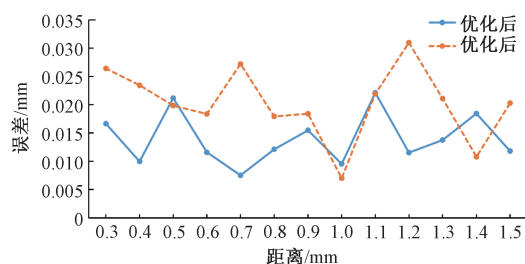


图11 优化后与优化前的误差对比

Fig. 11 Error comparison after optimization and before optimization

相比优化前,优化后误差能够控制在 $23\ \mu\text{m}$ 以内。优化前均差为 $18\ \mu\text{m}$,优化后为 $12\ \mu\text{m}$ 。优化前标准差为 $10\ \mu\text{m}$,优化后为 $7\ \mu\text{m}$ 。

3 结 论

本文提出一种基于激光自混合干涉的涡轮转速和叶尖间隙动态测量方法。在研究静态测量的基础上,开展

动态测量的研究。实验通过搭建转子模拟平台,将激光器到叶片顶端的距离视为叶尖间隙,通过采集到的自混合干涉信号得出涡轮转速,不同于静态测距信号处理的是,动态测量对采集到的动态自混合干涉信号进行正弦波调制、带通滤波、小波降噪的处理,用改善的 FFT 得到峰值频率即为叶尖间隙值。实验表明,相比传统测量,基于激光自混合原理的涡轮叶片转速与叶尖间隙动态同步测量,测速误差为 1%,叶尖间隙测量值误差为 23 μm 。基于激光自混合干涉的叶尖间隙测量可以有效克服航空发动机高温、高压等恶劣环境,对飞机上相关传感器的小型化、航空发动机叶尖间隙的主动控制,以及更高的测量精度、更大数据量的信号采集与处理有着重大的发展意义。在实际应用中,叶尖间隙在线测量系统可以很好地进行航空发动机的地面台架试验,并且在微小精密距离的测量方面有着精度高、成本低、响应快等优点,未来可以在飞机发动机内实现叶尖间隙的在线监测与主动控制,提高飞机运行效率以及保障安全。

参考文献

- [1] 李发富,段发阶,易亮,等. 基于频谱的篦齿轴向窜动与叶尖间隙测量方法[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(8): 261-270.
- LI F F, DUAN F J, YI L, et al. Spectroscopy-based axial channeling and tip clearance measurement method of grate teeth[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(8): 261-270.
- [2] 谷雪花,郝晟淳,张东海,等. 叶尖间隙对涡轮性能影响的试验研究[J]. 航空发动机, 2020, 46(4): 78-81.
- GU X H, HAO SH CH, ZHANG D H, et al. Experimental study on the influence of tip clearance on turbine performance[J]. Aero Engine, 2020, 46(4): 78-81.
- [3] 张剑. 叶尖间隙对涡轮性能影响的计算与试验研究[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2012, 25(2): 33-36, 62.
- ZHANG J. Calculation and experimental study on the influence of tip clearance on turbine performance[J]. Gas Turbine Test and Research, 2012, 25(2): 33-36, 62.
- [4] JOSÉ G, ANDRÉS T, ROBERTO N, et al. Numerical analysis of the effects of different rotor tip gaps in a radial turbine operating at high pressure ratios reaching choked flow[J]. Energies, 2022, 15(24): 9449.
- [5] 贾丙辉,张小栋,任新宇. 转子对高压涡轮叶尖间隙变化规律的影响[J]. 振动、测试与诊断, 2012, 32(3): 488-492.
- JIA B H, ZHANG X D, REN X Y. Effect of rotor on tip clearance variation law of high-pressure turbine[J]. Vibration, Testing and Diagnosis, 2012, 32(3): 488-492.
- [6] 庞燕龙,秦仕勇,陈妍妍,等. 航空发动机压气机叶尖径向间隙变化规律研究[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2022, 35(5): 27-32.
- PANG Y L, QIN SH Y, CHEN Y Y, et al. Study on radial clearance variation law of blade tip of aero-engine compressor[J]. Gas Turbine Testing and Research, 2022, 35(5): 27-32.
- [7] ZHANG J W, DING K Q, GHEN G. High-precision extraction method for blade tip-timing signal with eddy current sensor[J]. International Journal of Rotating Machinery, 2020: 1-13.
- [8] YAKIMOV E, USTYUGOV D. Reducing the impact of electroconductivity and the gap between the pipe and the transducer at measuring thickness of electroconductive pipe walls using the eddy-current method[J]. MATEC Web of Conferences, 2016, 79: 1069.
- [9] SHENG H L, LIU T, ZHAO Y, et al. New model-based method for aero-engine turbine blade tip clearance measurement[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2023, 36(8): 128-147.
- [10] DU L, ZHU X L, ZHE J. A high sensitivity inductive sensor for blade tip clearance measurement[J]. Smart Materials & Structures, 2014, 23(6): 65018-65026.
- [11] GRZEGORZ T. Measurement of multilayered conductive discs using eddy current method[J]. Measurement, 2022, 204: 112053.
- [12] YU B, KE H W, SHEN E Y, et al. A review of blade tip clearance-measuring technologies for gas turbine engines[J]. Measurement and Control, 2020, 53(3-4): 339-357.
- [13] ZHOU H J, CHEN J Y, HUANG K, et al. Optical fiber measurement method of large scale charge detonation velocity and its application effect[C]. Global Intelligent Industry Conference 2020, 2021: 270-278.
- [14] MA H P, WANG X M, ZHANG X G, et al. Research on tip clearance measurement technology of aero-engine blade based on optical fiber sensing system[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2023, 2428(1): 012032.
- [15] 徐军,赵天鹏,何德勇,等. 单模 VCSEL 激光自混合测距精度的提高[J]. 光电工程, 2006, 12: 27-31, 74.

- XU J, ZHAO T P, HE D Y, et al. Improvement of single-mode vcsel laser self-mixing ranging accuracy[J]. Opto-Electronic Engineering, 2006, 12: 27-31, 74.
- [16] 张秀艳, 刘珈池, 顾婉莹. 基于分段傅里叶变换的激光自混合干涉速度测量[J]. 国外电子测量技术, 2018, 37(11): 32-36.
- ZHANG X Y, LIU J CH, GU W Y. Laser self-mixing interferometric velocity measurement based on segmented fourier transform [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2018, 37(11): 32-36.
- [17] 季新昕, 刘劲松. 半导体激光器自混合干涉理论与研究现状[J]. 光电技术应用, 2005(6): 40-45.
- JI X X, LIU J S. Self-hybrid interference theory and research status of semiconductor lasers [J]. Optoelectronic Technology Application, 2005(6): 40-45.
- [18] CAVEDO F, ESMAILI P, NORGIA M. Self-mixing laser distance-sensor enhanced by multiple modulation waveforms[J]. Sensors, 2022, 22(21): 8456.
- [19] 杨颖, 李醒飞, 寇科, 等. 全相位谱分析在自混合干涉位移测量中的应用[J]. 光学精密工程, 2012, 20(8): 1740-1746.
- YANG Y, LI X F, KOU K, et al. Application of full phase spectrum analysis in self-hybrid interferometric displacement measurement [J]. Optics and Precision Engineering, 2012, 20(8): 1740-1746.
- [20] 柴晓博, 吴腾飞, 殷璞芙. 基于激光自混合测振的FSI测距误差补偿方法[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(11): 206-212.
- CHAI X B, WU T F, YIN P F. FSI ranging error compensation method based on laser self-hybrid vibrometry[J]. Progress in Laser and Optoelectronics, 2021, 58(11): 206-212.
- [21] 吴明旭. 自混合干涉振动参数测量算法研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2018.
- WU M X. Research on self-mixing interference vibration parameter measurement algorithm [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2018.
- [22] 张志成. 面向无标签数据的旋转机械故障诊断方法研究[D]. 吉林: 吉林大学, 2021.
- ZHANG ZH CH. Research on fault diagnosis method of rotating machinery for unlabeled data [D]. Jilin: Jilin University, 2021.
- [23] 张泽林, 刘希喆. 基于非接触式电压测量的电压监测系统[J/OL]. 电子测量与仪器学报: 1-9 [2023-10-12]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2488.TN.20221026.1601.024.html>.
- ZHANG Z L, LIU X ZH. Voltage monitoring system based on non-contact voltage measurement [J/OL]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation: 1-9 [2023-10-12]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2488.TN.20221026.1601.024.html>.
- [24] 上官彪. 基于 EEMD 的改进小波阈值降噪算法在超声水表中的应用[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2021.
- SHANGGUUANG G B. Application of improved wavelet threshold noise reduction algorithm based on EEMD in ultrasonic water meter [D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2021.
- [25] 罗东, 钱玲, 闫守洪, 等. 一种对 FFT 结果再处理以提高测频精度的方法[J]. 电子信息对抗技术, 2021, 36(6): 76-78, 88.
- LUO D, QIAN L, YAN SH H, et al. A method for reprocessing FFT results to improve frequency measurement accuracy [J]. Electronic Information Countermeasures Technology, 2021, 36(6): 76-78, 88.

作者简介



吴军(通信作者), 2009 年于天津大学获得学士学位, 2014 年于天津大学获得博士学位, 现为中国民航大学副教授, 主要研究方向为背景纹影技术非接触式测量。

E-mail: wujuncauc@163.com

Wu Jun (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Tianjin University in 2009, and received his Ph. D. degree from Tianjin University in 2014. He is currently an associate professor at Civil Aviation University of China. His main research interest includes non-contact measurement with background schlieren technology.



陈杨, 2021 年于中国民航大学获得学士学位, 现为中国民航大学硕士研究生, 主要研究方向为基于激光自混合的叶尖间隙测量。

E-mail: cy_070401@163.com

Chen Yang received his B. Sc. degree from Civil Aviation University of China in 2021. He is currently a master student at Civil Aviation University of China. His main research interests

include measurement method of blade tip clearance based on laser self-mixing principle.



赵君伟, 2009 年于石家庄铁道大学获得学士学位, 2013 年于石家庄铁道大学获得硕士学位, 现为忻州市综合检验检测中心高级工程师, 主要研究方向为测量技术、检验检测技术。

E-mail: 1506457987@qq.com

Zhao Junwei received his B.Sc. degree from Shijiazhuang Tiedao University in 2009, and received his M.Sc. degree from Shijiazhuang Tiedao University in 2013. He is currently a senior engineer at Xinzhou Comprehensive Inspection and Testing Center. His main research interests include measurement technology, inspection and testing technology.



陈玖圣, 2005 年于青岛大学获得学士学位, 2008 年于中国民航大学获得硕士学位, 现为中国民航大学教授, 主要研究方向为数据处理与分析、机载设备故障诊断与预测。

E-mail: jschen@cauc.edu.cn

Chen Jiusheng received his B.Sc. degree from Qingdao University in 2005 and M.Sc. degree from Civil Aviation University of China in 2008. He is currently a professor at Civil Aviation University of China. His main research interests include data processing and analysis, airborne equipment fault diagnosis and prediction.



郭润夏, 2003 年于空军工程大学获得学士学位, 2008 年于中国民航大学获得硕士学位, 2012 年于天津大学获得博士学位, 现为中国民航大学教授, 主要研究方向为机载装备故障诊断、剩余寿命预测和健康管理。

E-mail: rxguoblp@163.com

Guo Runxia received his B.Sc. degree from Air Force Engineering University in 2003, M.Sc. degree from Civil Aviation University of China in 2008, and Ph.D. degree from Tianjin University in 2012. He is currently a professor at Civil Aviation University of China. His main research interests include airborne equipment fault diagnosis, remaining life prediction and health management.