DOI: 10. 19650/j. cnki. cjsi. J2209821

# 基于快速稀疏扫频干涉的动态间隙测量方法\*

肖 林1,雷小华1,郭光辉2,陈昱如1,章 鹏1

(1. 光电技术及系统教育部重点实验室 重庆 400044; 2. 中国航发四川燃气涡轮研究院 绵阳 610500)

**摘 要:**本文建立了基于扫频干涉的动态间隙测量模型,推导出间隙与多普勒误差、光源扫频速率之间的关系式;定义多 普勒误差修正系数,对多普勒误差进行补偿。分析了扫频速度变化时的间隙瞬时频率变化特征,获得傅里叶变换频率解 调法的适用条件。仿真分析了间隙以三角波形式变化情况下,稀疏扫频点数、噪声等对傅里叶变换解调的影响;进而分 析了该方法在篦齿间隙测量中的适用性。最后,搭建快速稀疏扫频干涉间隙测量系统并开展动态测量实验,结果表明: 扫频分别速率为 20、40 及 60 kHz,间隙变化频率分别为 100、500 及 1 000 Hz 的情况下,测量均方误差不超过 0.2 μm,重 复性误差小于 0.3 μm。

关键词: 扫频干涉;稀疏采样;间隙;傅里叶变换 中图分类号: TH7 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 510.20

## A dynamic clearance measurement method based on a fast sparse frequency-swept interferometry

Xiao Lin<sup>1</sup>, Lei Xiaohua<sup>1</sup>, Guo Guanghui<sup>2</sup>, Chen Yuru<sup>1</sup>, Zhang Peng<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Optoelectronic Technology and Systems, Ministry of Education, Chongqing 400044, China;
 2. AECC Sichuan Gas Turbine Research Establishment, Chengdu 610500, China)

Abstract: In this article, a dynamic clarance measurement model based on the swept frequency interferometry is formulated. The relationship among the clarance, Doppler error and light source sweeping speed is deduced. The Doppler error correction coefficient is defined to compensate for the Doppler error. The characteristics of the instantaneous frequency change of the clarance are analyzed when the sweeping speed is changed. And the applicable conditions of the Fourier transform demodulation method are obtained. The influence of the number of sparse frequency sweeping points and noise on Fourier transform demodulation is simulated and analyzed when the clarance changes in the form of a triangular wave. Then, the applicability of the method in Clearance of labyrinth measurement is analyzed. Finally, a clearance measurement system based on a fast sparse frequency-swept Clearance of labyrinth interferometry is setup and dynamic measurement experiments are carried out. Results show that the mean square error of measurement is less than 0.2  $\mu$ m when the sweeping rate is 20, 40, and 60 kHz, respectively. The clarance change frequency is 100, 500, and 1 000 Hz, respectively. And the repeatability error is less than 0.3  $\mu$ m.

Keywords: frequency-swept interferometry; sparse sampling; clearance; Fourier transform

### 0 引 言

航空发动机是航空器的心脏,其运行安全至关重要。 发动机间隙是影响航空发动机安全平稳运行的关键参数 之一,主要包含叶尖、轴向和篦齿间隙。间隙过大或者过 小都会直接影响飞机正常运行<sup>[1-2]</sup>。需要对其进行在线 监测获得运行状态参数,对发动机设计提供指导。

发动机间隙测量方法主要有电学和光学两大类。电 学类测量方法主要有微波法、电容法、电涡流法以及放电 探针法等,其测量精度和范围可满足测量要求,但受限于 发动机内部测量环境的特殊性,电学传感器探头尺寸过

收稿日期:2022-05-19 Received Date: 2022-05-19

<sup>\*</sup>基金项目:国家自然科学基金(52175530,51975077,51675068,61875023)项目资助

大,不便深入发动机内部<sup>[1,36]</sup>,不适合进行轴向和篦齿间 隙测量。光学类测量方法,主要有光强法、宽光谱干涉 法。得益于光纤的独有特点,其传感器探头具有耐高温、 小尺寸、抗电磁干扰等优势,便于深入发动机内部;但其 在测量精度和稳定性上仍然还有很大的提升空间<sup>[7-12]</sup>。

基于扫频干涉的光学间隙测量技术,测量范围更大, 灵敏度更高,近年来成为了该领域的研究热点。但在进 行动态测量时,由于待测目标相对位移引起的多普勒效 应而造成的误差会是实际间隙变化量的数十倍甚至上百 倍<sup>[13]</sup>。为此,许多研究团队通过采用增加系统硬件来增 加已知量,以消除多普勒误差的影响。

如采用扫频光源正负扫描<sup>[14]</sup>、双扫频光源结构<sup>[15]</sup>、 单频+扫频结构<sup>[16]</sup>、双声光移频器的单扫频光源加双声 光移频器结构<sup>[17]</sup>等。这些方法虽然能够有效抑制多普 勒误差,提高测量精度,但依然存在测量系统结构复杂且 成本大幅度提升的问题。为了降低系统结构的复杂度, 西安交通大学的 Tao 等<sup>[18]</sup>则仅基于单扫频光源,利用双 向扫频加卡尔曼滤波的频率扫描干涉法,实现了高精度 动态距离测量。该方法精简了系统硬件结构,具有更高 灵活性。

沿着简化硬件的思路,基于单扫频光源,本文提出基 于快速稀疏扫频干涉的动态间隙测量方法,即采用提高 光源扫描速率,来降低多普勒误差;并通过定义多普勒误 差修正系数,进一步抑制多普勒误差至亚微米级。以扫 频速率与间隙运动速率关系,定义相对静止状态获得傅 里叶变换频率解调法的适用条件。分析了间隙以三角波 变化情况下,扫频点数、噪声等对复合算法解调的影响; 分析了该方法在实际篦齿间隙测量中的适用性。最后, 开展动态间隙实验,对该方法的可行性进行了验证。

## 基于快速稀疏扫频干涉的动态间隙测量 原理

#### 1.1 动态间隙测量模型

建立动态下的扫频干涉模型,如图 1 所示。记动态 下的间隙长度为时间 *t* 的函数,即 *L*=*l*(*t*),并令激光在 *l*(*t*)内传播时间为:

$$t_c = \frac{l(t)}{c} \tag{1}$$

式中:c为光的传播速度。并且l(t)的真值可表示为:

$$l(t) = l(0) + \int_{0}^{t} v(t) dt$$
 (2)

式中:*l*(0)表示静态下的间隙长度,*v*(*t*)表示动态端面的运动速度,该速度同样为时间的函数。

记 t 时刻  $\theta$  点的频率为  $f_{\theta}(t)$ ,由于本系统使用的扫频光源为线性光源,故此时  $\gamma$  点与  $\theta$  的激光频率关系可





记为:

$$f_{\theta}(t) = f_{\gamma}(t - t_{c}) \tag{3}$$

由光的多普勒效应可得,当入射光与反射面有相对 运动时,反射光相对于入射光会产生频移。令运动端面 的运动方向与光纤探头相背为正,相向为负,则多普勒频 移前后的光频率有式(4)所示关系<sup>[19]</sup>:

$$f_{\gamma}(t) = f_{\beta}(t) \frac{c - v(t)}{c + v(t)} = f_{\beta}(t) \left[ 1 - \frac{2v(t)}{c + v(t)} \right]$$
(4)

在实际应用当中,c远大于 v(t),则频移前后的频率 关系可进一步简化为:

$$f_{\gamma}(t) = f_{\beta}(t) \left[ 1 - \frac{2v(t)}{c + v(t)} \right] \approx f_{\beta}(t) \left[ 1 - 2\frac{v(t)}{c} \right]$$

$$\tag{5}$$

则 t 时刻, $\theta$  点光频率、 $\gamma$  点光频率与 $\beta$  点光频率的 关系可表示为:

$$f_{\theta}(t) = f_{r}(t - t_{c}) = f_{\beta}(t - t_{c}) \left[1 - \frac{2v(t - t_{c})}{c}\right] \quad (6)$$

同样由于扫频光源的线性输出,α 点和β 点的光频 率可满足如下关系:

$$f_{\beta}(t-t_{c}) = f_{\alpha}(t-2t_{c}) \tag{7}$$

则 t 时刻, $\theta$  点光频率与  $\alpha$  点的光频率的关系可表示为:

$$f_{\theta}(t) = f_{\beta}(t - t_c) \left[ 1 - \frac{2v(t - t_c)}{c} \right] =$$

$$f_{\alpha}(t - 2t_c) \left[ 1 - \frac{2v(t - t_c)}{c} \right]$$
(8)

因扫频光源为线性扫频输出,则 $f_{\alpha}(t-2t_{c})$ 可表示为:  $f_{\alpha}(t-2t_{c}) = f_{\alpha}(t) - 2k \cdot t_{c}$  (9)

式中:t为扫频周期内扫描的某个时刻,k为扫频光源的 调频速率。动态下的拍频信号频率可表示为:

$$f_{b} = f_{\alpha}(t) - f_{\theta}(t) =$$

$$f_{\alpha}(t) - [f_{\alpha}(t) - 2kt_{c}] \left[ 1 - \frac{2v(t - t_{c})}{c} \right] =$$

$$f_{\alpha}(t) \frac{2v(t - t_{c})}{c} + 2k \left[ 1 - \frac{2v(t - t_{c})}{c} \right] \cdot t_{c} \approx$$

$$f_{\alpha}(t) \frac{2v(t)}{c} + 2\frac{B}{T} \cdot t_{c} \qquad (10)$$

式中:*B*为光源扫频带宽,*T*为光源扫描周期。 由式(10),可进一步写出动态间隙为:

$$L_{d}(t) = \frac{c}{2} \cdot \left[ f_{\alpha}(t) \frac{2v(t)}{c} + 2 \frac{B}{T} \cdot t_{c} \right] \cdot \frac{T}{B} =$$

$$l(t) + f_{\alpha}(t) \frac{T}{B}v(t) = l(t) + f_{\alpha}(t) \frac{v(t)}{B} \cdot \frac{1}{S}$$
(11)

式中:S为光源的扫频速度。由式(11)可知,动态环境下的间隙值 $L_d$ 为间隙真实值l(t)加上多普勒效应引起的误差值,该误差受光源扫频速度S和端面运动速度v(t)的影响。

### 1.2 多普勒误差抑制方法

令 v(t)的加速度为 a(t),其也是时间 t 的函数,即:  $a(t) = \frac{dv(t)}{dt}$ (12)

当光源扫描速率足够高时,在一个扫描周期 T 内,待 测间隙端面的运动加速度可认为是常数(记为 a)。该周 期内,端面运动速度将由 v<sub>0</sub> 增加到(v<sub>0</sub>+aT)。

则 $L_d(t)$ 可表示为:

$$L_{d}(t) = l(0) + v_{0}T + \frac{1}{2}aT^{2} + v_{0} \cdot \frac{f_{\alpha}}{B} \cdot T$$
(13)

式中:l(0)表示待测间隙的初始长度, $v_0T + aT^2/2$ 表示单个扫描周期内的间隙长度变化量<sup>[18]</sup>, $v_0T \cdot f_\alpha/B$ 表示动态多普勒误差。

为补偿多普勒误差,定义多普勒修正系数 G,则有:

$$G = 1 + \frac{f_{\alpha}}{B} \tag{14}$$

在一个扫描周期结束时刻的瞬态间隙  $L_{a}(t)$  可表示为:

$$L_{d}(t) = l(0) + v_{0}T + \frac{1}{2}aT^{2} + (v_{0} + aT)T \cdot \frac{f_{\alpha}}{B} =$$
  
$$l(0) + v_{0}T \cdot G + aT^{2}\left(\frac{1}{2} + \frac{f_{\alpha}}{B}\right)$$
(15)

再对 L<sub>d</sub>(t) 进行多普勒误差补偿, 可得:

$$L'_{d}(t) = l(0) + \frac{v_{0}T \cdot G + aT^{2}\left(\frac{1}{2} + \frac{f_{\alpha}}{B}\right)}{G} = l(0) + v_{0}T + \frac{aT^{2}\left(\frac{1}{2} + \frac{f_{\alpha}}{B}\right)}{G}$$
(16)

经过补偿后的剩余误差可表示为:

$$\Delta x = \frac{B + 2f_{\alpha}}{2[B + f_{\alpha}]} \cdot aT^{2} - \frac{1}{2}aT^{2} = \frac{f_{\alpha}}{2[B + f_{\alpha}]} \cdot \frac{\Delta v}{\Delta t} \cdot T^{2}$$
(17)

设带宽 B 为 5 100 GHz, 扫描起始频率  $f_{\alpha}$  为 196 250 GHz,对式(17)进行仿真,得到误差与扫描速率、

加速度之间的变化曲线,如图2所示。误差只与其速度 的变化率(加速度)有关系;随着加速度增大,误差增大。 且该误差随着光源的扫频周期减小(即扫频速率增大), 误差成倍减小;当扫频速增大到一定程度时,误差降至纳 米级。



图 2 误差随扫频速率变化曲线



## 2 基于稀疏扫频干涉光谱的动态间隙解调 原理

#### 2.1 频率解调法的适用条件分析

根据式(11),可进一步写出扫频干涉信号为:  

$$s(t) = \cos\left\{2\pi \int_{0}^{t} \left[f_{\alpha}(t) \frac{2v(t)}{c} + \frac{B}{T} \cdot \frac{2l(t)}{c}\right] dt + \phi_{0}\right\}$$
(18)

上式包含的拍频频率为:

$$f_{bd} = f_{\alpha}(t) \frac{2v(t)}{c} + 2 \frac{B}{T} \cdot \frac{L(t)}{c} =$$

$$(f_{\alpha} + \frac{B}{T} \cdot t) \cdot \frac{2v(t)}{c} + 2 \frac{B}{T} \cdot \frac{L(t)}{c}, (0 < t < T) \quad (19)$$

由式(19)可知,动态拍频信号的瞬时频率,不是单一频率,而是包括真实间隙所产生的频率 $f_t(t)$ 和多普勒频移 $f_{denuler}(t)$ 两部分。

设定间隙变化频率为 500 Hz,幅值为 500 μm,初始 间隙为1 000 μm,对式(18)所描述的扫频干涉光谱进行 傅里叶变换,获得不同扫频速率下,式(19)中瞬时拍频 频率的变化结果,如图 3 所示。

扫频速率较低时,频谱完全展开,表明瞬时频率成分 较多;但随着扫频速率增大,各频谱成分逐渐合拢;当扫 频速率达到 10 kHz 时,合并为一个值,表明此时仅包含 一个频率成分。



图 3 不同扫描速度下的干涉光谱对应的傅里叶变换结果

Fig. 3 Fourier transform results of interference spectrum at different scanning speed

定义 η 为相对静止系数, 描述静态下的拍频信号频 率与动态下的拍频信号频率的比值, 记为:

$$\eta = \frac{f_b}{f_{bd}} = \frac{f_a(t) \frac{2v(t)}{c} + 2\frac{B}{T} \cdot \frac{L(t)}{c}}{2\frac{B}{T} \cdot \frac{L(t)}{c}} \approx$$

$$1 + \frac{[f_a + B] \cdot v(t)}{\frac{B}{T} \cdot L(t)}, (0 < t < T)$$
(20)

假设间隙运动端面以三角波形式变化,变化频率分 别为 100、250、500 和 1 000 Hz,间隙初始值 *l*(0) = 1 000 μm,取光源扫频带宽 *B* = 5 100 GHz,对式(20)进行 仿真,可得如图 4 所示结果。对任一曲线,随着光源扫描 速率增大,η先出现大幅波动,随着光源扫频速率进一步增 大,η逐渐趋于恒定。综合来看,当扫频速率约为间隙变化 频率 20 倍时,正好对应如图 3 所示频域的频率合并为一个 峰值的情况;可认为间隙运动相对扫频光源扫频速率而 言,处于相对静止状态。此时,与扫频干涉的静态间隙测 量模型一致,可利用傅里叶变换方法进行间隙解调。







### 2.2 基于稀疏扫频干涉光谱的动态间隙解调方法

提高扫频速率可减小多普勒误差,在达到相对静止 状态时,可利用傅里叶变换<sup>[20]</sup>方法进行间隙解调。但扫 频速率提高,意味着扫频光源成本增加,以及数据海量增 加。为此,本文采用普通扫频光源(扫频速率在 kHz 量 级);通过减少扫描点数,提高扫描速度的方法来实现低 成本快速扫频。

1)稀疏扫频干涉光谱的采样需求分析

为获得减少扫频点数的稀疏干涉光谱,需分析满足 信号处理的采样点需求。当间隙动态变化时,瞬时频率 包含多普勒频移,因此通过频率解调获得的间隙值,比真 实间隙值大。所以,在计算光谱数据点需求时,应在满足 相对静止条件下,按照包含多普勒频移的间隙值进行 计算。

当满足相对静止条件时,即满足 t 趋近于 T,式(19) 描述的瞬时频率可进一步简化为:

$$f_{bd} = [f_{\alpha} + B] \frac{2v(t)}{c} + \frac{B}{T} \cdot \frac{2L}{c}$$
(21)

根据足奈奎斯特采样定理<sup>[21]</sup>,扫描点数即采样点数 应满足:

$$N \ge \frac{4}{c} \left[ BL + (f_{\alpha} + B) \cdot v(t) T \right]$$
(22)

2)间隙以三角函数形式变化的解调仿真分析

假设间隙以三角形函数形式变化,如图 5 所示。设 其在某个扫频周期内的间隙长度变化量为 ΔL,则有:

 $\Delta L = vT \tag{23}$ 

式中:v为间隙待测端面运动速率,T为光源扫描周期。





假设间隙变化范围为 50~1 050 μm,光源扫描带宽 为4 000 GHz,三角形变化频率为 200 Hz。根据相对静止 条件,光源扫频速率应大于 4 kHz 以上。又由式(22)可 计算出,光源稀疏扫描点数需大于 112 点。

根据式(18),在 60 kHz 扫描速率下的间隙,分别以 不同扫描点数仿真得到一个扫频周期内间隙的对应干涉 光谱,间隙值为 350 μm,如图 6 所示。



图 6 不同扫描点数的扫频干涉光谱

Fig. 6 Interference spectra with different scanning points

分别对不同点数光谱进行傅里叶变换解调,再根据 式(16)进行误差补偿,得到解调间隙如图 7(a)。由 图 7(b)可知,不同采样点数的间隙解调误差差异较小, 且均小于 0.12 μm。





为了验证信噪比对解调误差的影响,令单周期光谱 点数为201点,在图7的仿真条件下,进一步仿真不同信 噪比下的解调误差,结果图8所示。



#### 图 8 信噪比对解调误差的影响



当信噪比小于 5 dB 时,解调误差最大约 0.2 μm,波 动范围为 0.08 μm;随着信噪比逐渐提高,解调误差逐渐 减小。当信噪比达到 25 dB 时,误差减小到 0.16 μm 以 下,当信噪比达到 50 dB 的时候,最大误差减小到 0.15 μm 内,且误差波动范围小于 0.02 μm。

3) 篦齿间隙的解调仿真分析

为分析该方法在实际间隙测量中的适用性,以篦齿 间隙为例,并考虑实际转轴的圆度和偏心度为非理想状态,建立如图9所示模型。



Fig. 9 Schematic diagram of grate clearance change

假设转子从 M 点开始旋转 φ,到达点 N,即图中的青 色叶片转动到黄色叶片处,由于转子存在偏心,篦齿间隙 可表示为<sup>[12]</sup>:

$$\Delta L(t) = MO - NO =$$

$$g(1 - \cos\psi) + R \cdot \left(\sqrt{1 - \frac{g^2}{R^2} \sin^2 \omega} - 1\right) =$$

$$g(1 - \cos(2\pi\omega \cdot t)) + R \cdot \left(\sqrt{1 - \frac{g^2}{R^2} \sin^2(2\pi\omega \cdot t)} - 1\right)$$
(24)
  
当转子转到占 N时 算齿间隙可表示为.

$$L(t) = y_2 - y_1 = y_2 - (y_0 + \Delta L) = y_2 - R + g \cdot \cos(2\pi\omega \cdot t) - R \cdot \left(\sqrt{1 - \frac{g^2}{R^2} \sin^2(2\pi\omega \cdot t)} - 1\right)$$
(25)

式中:*y*<sub>0</sub> 为 *M* 点到 *O* 点的距离,*y*<sub>1</sub> 为 *N* 点到 *O* 点的距离,*y*<sub>2</sub> 为光纤探头到 *O* 点的距离,*R* 为转子半径。

由于转子的偏心量满足 g<<R,式(25)最后一项可 近似为0,间隙将按照类余弦的方式进行变化,如式(26) 所示。

 $L(t) = y_2 - R + g \cdot \cos(2\pi\omega \cdot t)$  (26) 式中:g 为转子偏心量, R 为转子半径,  $\omega$  为转子的转动 频率。

利用式(16)对其进行多普勒误差补偿,并根据 式(17)计算残余多普勒误差为:

$$\Delta x = \frac{f_{\alpha}}{2[B + f_{\alpha}]} \cdot aT^{2} = \frac{f_{\alpha}}{2[B + f_{\alpha}]} \cdot (-4\pi^{2}\omega^{2} \cdot g \cdot A\cos(2\pi\omega \cdot T)) \cdot T^{2}$$
(27)

令光源扫描带宽为 5 100 GHz, 扫描中心频率为 193 700 GHz, 信号振幅 *A* 为 2 000 μm (即间隙为 -1 000~+1 000 μm), 转子偏心率 *g* 为 5 mm。对 式(27)进行仿真,可得光源扫频速率、信号频率和误差 之间的关系, 如图 10 所示。当光源的扫描速率一定 时,间隙的变化频率越大, 产生的误差越大; 当间隙变 化的频率一定时, 光源的扫描速率越快, 则产生的误差 越小。

根据实际间隙测量需求,假设间隙变化范围为 0~2 mm,转速15 000 r/min(频率约为250 Hz),令间隙 变化表达式为:

 $L = 1\ 200 + 500\cos(2\pi \cdot 250 \cdot t) \tag{28}$ 

对式(28)添加 35 dB 的噪声,采用本文提出解调方 法进行解调,结果如图 11 所示。随着光源的扫描速率逐 渐增大时,误差显著减小;当扫描速度达 40 kHz 时,误差 则将降低到 1 μm 以内,理论上可能满足间隙的测量 需求。



Fig. 10 Relationship between measurement error of grate clearance and scanning rate of light source, frequency



## 3 基于快速稀疏扫频干涉的动态间隙测量 实验

为验证基于快速稀疏扫频干涉方法的可行性,搭建 如图 12 所示实验系统。间隙由光纤端面和固定在 PZT 上贴有金属反射膜的平面组成。动态间隙变化由信号发 生器(DG4000)驱动 PZT 带动金属反射面运动产生, PZT 的位移与电压关系如图 12 所示。

![](_page_6_Figure_3.jpeg)

![](_page_6_Figure_4.jpeg)

扫频光源采用珠海光辰(GC-76001C-01)可调谐激 光器,通过双触发对扫频光源进行二次开发控制,获得不 同扫频速率(对应不同扫描点数)。扫频光源扫频速率 的相关参数如表1所示。

表1 扫频光源相关参数 Table 1 Parameters of the FSI

扫描步长/GHz	1	5	10	15	20	25	30
扫描点数	5 101	1 021	511	341	256	204	171
扫频速率/kHz	2	10	20	29.4	40	50	60

动态间隙测量实验系统如图 13 所示,由扫频光源发 出的光经过环形器进入光纤,部分光在光纤端面发射,另 部分光则透射出光纤后在金属反射膜处发生反射并再次 进入光纤,两束反射光发生干涉,其干涉信号由光电探测 器探测并经过采集后进入计算机进行处理。

设置信号发生器的输出信号类型为三角波,占空比 为50%,改变初始相位并添加偏移,使得间隙变化区间为 0~4 µm,变化频率为100、500 和1000 Hz;初始间隙设置 为 250 µm。

在满足相对静止情况下,对光源扫描速率为20、40 和 60 kHz 3 种情况,开展动态间隙测量实验,得到图 14 所示结果。并对3种情况下得到的实验结果进行拟合. 同时根据 PZT 的设定参数获得间隙的标准值,再计算实 验结果与标准间隙之间的均方根误差。

可见,对同一扫频速率,随着间隙变化频率增加,误 差增大:对同一间隙变化频率,随着扫频速率增大,误差 减小。均方根误差不超过 0.2 μm。具体数值如表 2 所示。

为了验证该方法的重复性,在扫描速率为60 kHz,间 隙信号频率为1000 Hz 情况下,进行多次重复实验,结果 如图 15。其重复性最大误差小于 0.3 µm。可见多次重 复测量结果与 PZT 产生的标准间隙吻合较好。

![](_page_6_Figure_13.jpeg)

图 13 动态间隙测量实验系统

Fig. 13 Experimental setup of dynamic clearance measurement

![](_page_6_Figure_16.jpeg)

![](_page_7_Figure_2.jpeg)

图 14 不同扫描速率下的间隙实验结果

![](_page_7_Figure_4.jpeg)

Table 2         Root mean square error of demodulation results							
间隙频率	扫频速率						
	100 Hz	500 Hz	1 000 Hz				
20 kHz	0.12 µm	0.18 µm	0.22 µm				
40 kHz	0.11 μm	0.12 µm	0.17 μm				
60 kHz	0.11 μm	0.12 µm	0.16 µm				

表 2 解调结果的均方根误差

![](_page_7_Figure_6.jpeg)

![](_page_7_Figure_7.jpeg)

## 4 结 论

本文建立了基于扫频干涉的动态间隙测量模型, 推导出间隙与多普勒误差、扫频速率之间的关系式;定 义多普勒误差修正系数,对多普勒误差进行补偿。间 隙的瞬时频率随扫频速率变化特征表明:当扫频速率 大于间隙变化速率的 20 倍时,间隙变化相对扫频处于 相对静止状态,可利用傅里叶变换频率解调法进行间 隙解调。

仿真分析了间隙以三角波变化情况下,稀疏扫频点数、噪声等对傅里叶变换解调的影响;进而分析了该方法 在篦齿间隙测量中的适用性。搭建快速稀疏扫频干涉系 统并开展动态间隙实验,结果表明:扫频速率分别为 20、 40及 60 kHz,间隙变化频率分别为 100 Hz、500 Hz 及 1 kHz 的情况下,均方根误差小于 0.2 μm,重复性误差小 于 0.3 μm,证明了基于稀疏快速扫频干涉进行动态间隙 测量的可行性。

该方法仅采用单扫频激光光源,具有结构简单的优 点;可适应任意速度和加速度变化的动态间隙测量,具有 较高的适用性。

### 参考文献

[1] 胡延青,申秀丽.航空发动机叶尖径向间隙研究进展 综述[J].航空发动机,2014,40(1):60-67.

> HU Y Q, SHEN X L. Research progress in aeroengine radial tip clearance analysis [J]. Aeroengine, 2014, 40(1):60-67.

- [2] 许欧阳,童杏林. 航空发动机叶尖间隙测量技术研究 进展[J]. 半导体光电,2020,41(6):774-778.
  XU OU Y,TONG X L. Research progress of aero-engine blade tip clearance measurement technology [J].
  Semiconductor Optoelectronics, 2020,41(6):774-778.
- [3] 常利坤. 位移变化量谐振法测试技术研究[D]. 四川: 电子科技大学, 2016.

CHANG L K. Research on the resonance method of displacement change testing technology [D]. Sichuan: University of Electronic Science and Technology of China, 2016.

[4] 张鑫. 电容式叶尖间隙测量信号处理技术研究[D].天津:天津大学,2020.

ZHANG X. Research on signal processing technology for capacitive leaf tip clearance measurement [D]. Tianjin: Tianjin University, 2020.

[5] 张亮,王启迪,李欣,等.叶尖定时及叶尖间隙测量技术研究综述[J].河北科技大学学报,2021,42(5):431-441.

ZHANG L, WANG Q D, LI X, et al. Review of research on tip-timing and tip clearance measurement technology[J]. Journal of Hebei University Science and Technology, 2021, 42(5):431-441.

[6] 潘跃静. 叶尖间隙微波测量系统前端研究[D]. 四川:
 电子科技大学, 2017.
 PAN Y J. Front-end study of microwave measurement

system for leaf tip clearance[D]. Sichuan: University of Electronic Science and Technology of China, 2017.

- [7] JOSÉ M G, ALEJANDRO S, GERARDO A. 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.
- [8] MULLER D, SHEARD A G, MOZUMDAR S. Capacitive measurement of compressor and turbine blade tip to casing running clearance [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines & Power, 1996, 119(4):877-884.
- [9] JIA B H, HE L, ROGER L. An optical fiber measurement system for blade tip clearance of engine[J]. International Journal of Aerospace Engineering, 2017, DOI: org/10. 1155/2017/4168150.
- [10] SRIDHAR V, CHANA K S. Tip-clearance measurements on an engine high pressure turbine using an eddy current sensor [ C ]. Asme Turbo Expo: Turbomachinery Technical Conference & Exposition, 2017.
- [11] WOIKE M, ABDUL-AZIZ A, CLEM M. Structural health monitoring on turbine engines using microwave blade tip clearance sensors[J]. Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering, 2014, 9062.
- [12] 苏超乾.发动机径向间隙测量技术的研究 [D].重 庆:重庆大学 2019.
  SU CH Q. Study of engine radial clearance measurement technology [D]. Chongqing: Chongqing University, 2019.
- [13] 路程.基于宽带扫频干涉的高精度绝对距离测量方法 研究[D].黑龙江:哈尔滨工业大学,2017.
   LU CH. Research on high precision absolute distance

measurement method based on broadband swept frequency interference [ D ]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017.

- [14] JIA X, LIU Z, TAO L, et al. Frequency-scanning interferometry using a time-varying Kalman filter for dynamic tracking measurements [J]. Optics Express, 2017, 25(21): 25782-25796.
- [15] RICHARD, S. Distance measurement of moving objects by frequency modulated laser radar [ J ]. Optical Engineering, 2001, 40(1):33-37.
- [16] SHAO B, ZHANG W, ZHANG P, et al. Dynamic clearance measurement using fiber-optic frequency-swept and frequency-fixed interferometry [J]. 2020, 32(20): 1331-1334.
- [17] CHENG L, LIU G, LIU B, et al. Absolute distance measurement system with micron-grade measurement uncertainty and 24 m range using frequency scanning interferometry with compensation of environmental vibration[J]. Optics Express, 2016, 24(26):30215.
- [18] TAO L, LIU Z, ZHANG W, et al. Frequency-scanning interferometry for dynamic absolute distance measurement using Kalman filter[J]. Optics Letters, 2014, 39(24): 6997-7000.
- [19] 景亚冬. 激光多普勒加速度测量方法研究[D]. 陕西: 西安工业大学,2020.

JING YD. Study of laser Doppler acceleration measurement method [D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2020.

 [20] 白旭,胡辉.基于快速傅里叶变换和互相关的多频微弱信号重构法[J].电子测量与仪器学报,2019, 33(3):168-175.

BAI X, HU H. A multi-frequency weak signal reconstruction method based on fast Fourier transform and

mutual correlation [ J ]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2019, 33 ( 3 ): 168-175.

 [21] 曾竞凯,赵文龙,娄嘉骏.基于相关法的低采样率超声水表时延估计方法[J].电子测量与仪器学报,2021, 35(9):179-185.

> ZENG J K, ZHAO W L, LOU J J. Time delay estimation method for low sampling rate ultrasonic water meters based on correlation method [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021, 35 (9): 179-185.

#### 作者简介

![](_page_9_Picture_15.jpeg)

肖林,2019年于福建师范大学获得学士 学位,现为重庆大学硕士研究生,主要研究 方向为光纤传感技术。

E-mail: linxiao@ cqu. edu. cn

Xiao Lin received his B. Sc. degree from

Fujian Normal University in 2019. He is currently a postgraduate at Chongqing University. His main research interest is optical fiber sensing technology.

![](_page_9_Picture_20.jpeg)

**雷小华**(通信作者),2002 年于重庆大 学获得学士学位,2008 年于重庆大学获得博 士学位,现为重庆大学光电学院副教授,博 士生导师,主要研究方向为光纤传感和光电 检测技术。

E-mail: xhlei@cqu.edu.cn

Lei Xiaohua (Corresponding author) received her B. Sc. degree from Chongqing University in 2002, and received her Ph. D. degree from Chongqing University in 2008. She is currently an associate professor and a Ph. D. advisor in the College of Optoelectronic Engineering at Chongqing University. Her main research interests include fiber optic sensing and photoelectric detection technology.