

激光与光电子学进展

基于调频干涉的发动机转静子轴向间隙测量技术

邵斌, 张伟*, 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 对转静子轴向间隙进行测量时, 要求传感探头尺寸小、系统测量范围大、测量精度高, 目前常用的间隙测量方法难以同时满足这些要求。结合转静子轴向间隙变化特点, 提出一种采用调频干涉原理实现间隙测量的方案, 并最终研制出高速实时在线测量样机。样机通过采用大宽带高速调频及周期性多普勒误差平滑处理技术来实现大范围高精度测量, 通过采用单模光纤来实现小尺寸传感探头。为测试样机的性能, 搭建了转静子轴向间隙模拟实验平台。动态间隙实验测试结果表明: 研制的样机测量量程达 20 mm, 在 15000 r/min 的高速转速下, 样机测量精度可达满量程的 0.08%。所研制的样机可为转静子轴向间隙提供一种新的测量技术, 给解决轴向间隙测量难题提供重要参考。

关键词 测量; 间隙测量; 调频干涉; 光纤; 转静子间隙; 发动机

中图分类号 TN247

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.1112004

Rotor-Stator Axial Clearance Measurement Technique of Engine Based on Frequency-Swept Interferometry

Shao Bin, Zhang Wei*, Chen Weimin

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

Abstract Rotor-stator axial clearance measurement requires small-size sensing probe, large measurement range, and high measurement accuracy. However, existing measurement methods cannot meet these requirements. Considering the characteristics of rotor-stator axial clearance variation, we propose a measurement method based on frequency-swept interferometry and develop a corresponding high-speed real-time online measurement prototype. The prototype combined large-bandwidth high-speed frequency sweeping and periodical Doppler error smoothing to achieve a large measurement range and a high measurement accuracy and used a single-mode optical fiber to realize the small-size probe. To test the prototype performance, we built a simulation experiment platform for the proposed rotor-stator axial clearance measurement. Dynamic clearance experimental results showed that the measurement range of the prototype was 20 mm, and the measurement accuracy was 0.08% of the full range at 15000 r/min. The proposed prototype represents a new measurement technique for rotor-stator axial clearance measurement and provides an important reference for improving measurements.

Key words measurement; clearance measurement; frequency-swept interferometry; optical fiber; rotor-stator clearance; engine

OCIS codes 120.3180; 060.2310; 140.3518

收稿日期: 2020-09-25; 修回日期: 2020-10-04; 录用日期: 2020-11-12

基金项目: 国家自然科学基金(51805054)、中国博士后科学基金(2018M643405)、中国航发集团科技创新平台项目(SHYS-GXDPL-18)

*E-mail: zhangwei1213052@126.com

1 引言

转静子轴向间隙对压气机、涡轮机、汽轮机等设备的运行效率和安全性具有重要影响^[1-5],对其进行准确测量可以为分析间隙变化成因、验证理论设计模型提供重要依据。转静子轴向间隙位于设备内部,一般需要毫米级的小尺寸探头深入设备内部进行测量;同时,转静子轴向间隙变动范围可达厘米级,这就要求测量系统具有传感探头尺寸小、系统测量范围大、测量精度高的特点。

目前,常见的间隙测量方法主要可以分为电学类和光学类。电学类主要包括放电探针法^[6]、电容法^[7-8]、电涡流法^[9]、微波法^[10]。放电探针法测量速度很慢,无法实现快速实时测量。电容法和电涡流法的测量范围与传感器尺寸存在正比关系,当测量范围达厘米级时,传感器尺寸也要大于厘米级,且需要频繁的现场标定^[11]。微波法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在厘米级以上。与电类测量方法相比,光学类测量方法可利用光纤制作探头以解决小尺寸难题,具有轴向间隙测量的潜力。目前,应用于间隙测量的光学类方法主要有光强比例法^[12-15]、激光相位测距法^[16]及白光干涉法^[17-18]。光强比例法用反射光强比例求取间隙值,具有测量速度快、不受光源强度波动影响的优点,但测量精度受光纤束安装角度、被测表面材质及粗糙度等诸多因素影响^[15],且需进行现场标定。激光相位测距法对激光强度进行正弦调制,然后通过相移测量间隙,这种方法的参考光路和测量光路不同路,易受温度和振动影响。白光干涉法利用宽光谱光源形成干涉信号以测量间隙,测量精度很高,但是受光源相干长度影响,测量范围很难扩大。

虽然这些基于电学和光学的间隙测量方法被广泛用于叶尖间隙测量,但在转静子轴向间隙测试方面的报道却几乎空白。深究其原因,一是因为叶尖间隙测试时仅需将传感头安装在机匣的开孔处,而轴向间隙测试时却必需将传感头及其引线深入设备内部,这要求传感探头尺寸更小;二是因为叶尖间隙一般小于 3 mm,而轴向间隙可到厘米级,这便要求系统测量范围更大。由于这两点区别,现有的测量方法难以直接满足转静子轴向间隙测量的要求。针对此测量难题,本文提出一种基于调频干涉原理的转静子轴向间隙测量方法,并研制出了间隙测量样机,进行了样

机的性能测试。

2 基于调频干涉的转静子轴向间隙测量原理

为了适应转静子轴向间隙测量时狭小的安装空间,抵抗光纤沿线温度变化及振动的影响,采用如图 1 所示的调频干涉间隙测量系统。调频激光器(FSL)发出频率 $f(t)$ 线性调制的光;光经过环形器后到达光纤探头端面和被测目标表面,被反射后分别形成参考光与测量光;参考光与测量光相遇产生干涉信号并由光电探测器(PD)接收;干涉信号经数据采集(DAQ)后送入电脑(PC)进行处理。假设调频激光器的起始频率为 f_0 ,调频周期为 T ,调频带宽为 B ,则

$$f(t) = f_0 + \frac{B}{T}t. \quad (1)$$

形成的干涉信号^[19-20]可以表示为

$$I(t) = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos\left[\frac{4\pi f(t)}{c}L\right] = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos\left[4\pi \frac{BL}{Tc}t + 4\pi \frac{f_0}{c}L\right], \quad (2)$$

式中: I_1 和 I_2 分别为参考光与测量光的光强; c 为光速; L 为被测间隙。由(2)式可知,干涉信号的频率 f_{sig} 由间隙 L 决定,通过 f_{sig} 可以解调出间隙 L 。

$$L = \frac{Tc}{2B} f_{\text{sig}}. \quad (3)$$

为了实现快速在线实时解调,本文开发的样机采用补零快速傅里叶变换来实现 f_{sig} 的计算。只要采集卡采样频率 f_s 满足采样定律 $f_s > f_{\text{sig}}/2$,便可求取干涉信号的频率,以实现间隙测量。因此,通过合理选择采样频率 f_s ,调频周期 T ,调频带宽 B ,便可以实现厘米级的间隙测量范围。

理论上,如果被测间隙 L 在调频周期 T 内保持不变,通过(3)式可以获得准确的测量值 L 。但转静子间隙是动态变化的,当调频速度不够快时,会导致多普勒效应^[21-23],从而引起测量误差 R 。

$$R = \frac{f_0}{B} \Delta L. \quad (4)$$

式中: ΔL 为调频周期 T 内的间隙变化量。

对于图 1 所示的参考光与测量光共路型系统结构,要减小多普勒误差,一方面可以提高调频激光器的调频速度,另一方面可以对多普勒误差进行修正。修正多普勒误差常用方式是正负同步调频方式^[23-25]或三角波调频方式^[21,26-27],无论是正负同步调

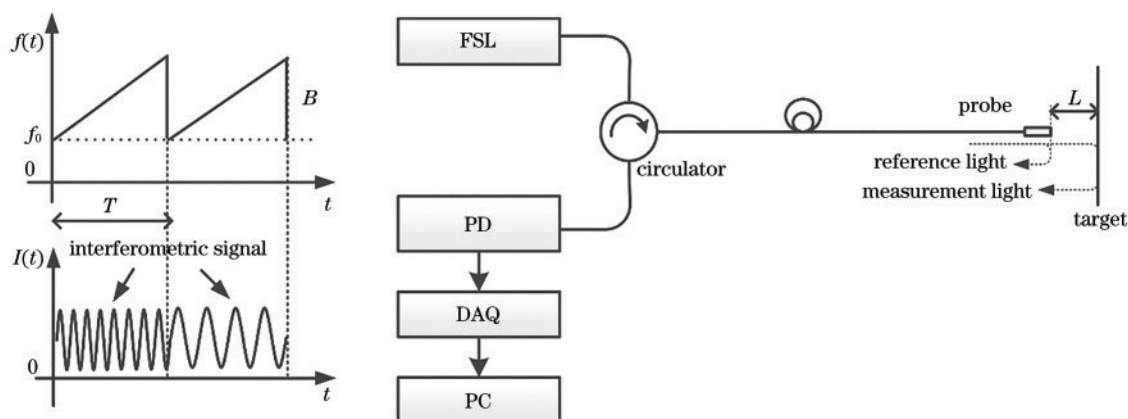


图 1 调频干涉间隙测量系统原理

Fig. 1 Schematic of the clearance measurement system based on frequency-swept interference

频还是三角波调频,核心思想都是通过调频形成正负多普勒误差进行相消补偿。然而,正负同步调频方式会增加光路结构,三角波调频方式要求间隙变化速度在两个调频周期内保持不变。针对转静子轴向间隙,可直接利用转动情况下多普勒误差的周期特性进行误差修正。

图 2(a)为航空发动机内部结构简图,其中叶尖间隙反映转子叶片与机匣之间的间隙,而转静子轴向间隙则反映转子和静子之间的间隙。将光纤探头安装在静子叶片上,通过测量探头与转子转盘之间的距离,可以反映转静子轴向间隙。由于光纤探

头安装位置距离转轴中心有一定距离,因此测出的实时间隙 $L(t)$ 可以看成是两类影响因素的叠加:一类是转子转盘安装倾角形成的周期性间隙变化,该变化量相对微小且幅度固定不变,但却是转速级的变化,这类变化容易引起多普勒误差;另一类是转动设备内部温度、气流、离心力等因素导致的间隙变化,这类变化相对缓慢,但却极大地影响设备的运行效率和安全性,这类变化在调频速度快时不易引起多普勒误差,该变化也是希望测量出转静子轴向间隙变化。考虑这两种变化,转静子实时轴向间隙 $L(t)$ 可近似表示为

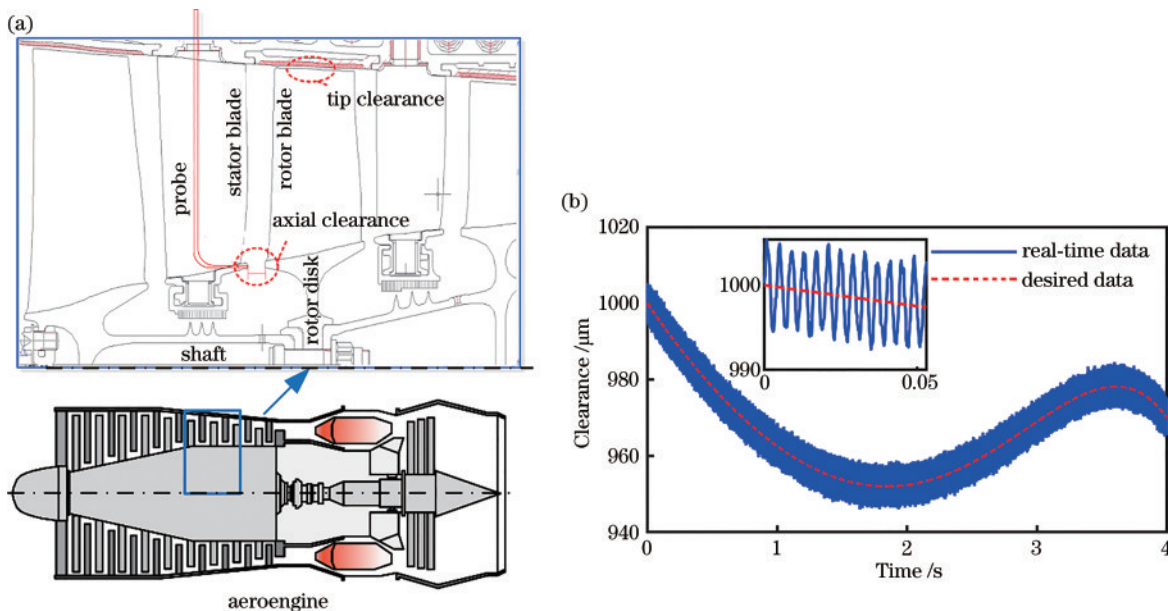


图 2 转静子轴向间隙测量示意图。(a)航空发动机转静子轴向间隙及探头测点的示意图;(b)测点处实时的与期望测出的转静子轴向间隙

Fig. 2 Schematic of rotor-stator axial clearance measurement. (a) Schematic of the rotor-stator axial clearance of the aeroengine and measuring point of the probe; (b) the real-time rotor-stator axial clearance and the clearance desired to be measured at the measuring point

$$L(t) = L_{\text{desired}}(t) + L_r \cos(2\pi f_r t), \quad (5)$$

式中： $L_{\text{desired}}(t)$ 为期望测出的动态轴向间隙； L_r 为转速级间隙变化的幅度； f_r 为转子转动频率。图 2(b)形象地展示了实时间隙值与期望测量值的特点，期

望测出的轴向间隙变化速度是远低于转速级变化的。对于高速调频而言，在极短的调频周期 T 内， $L_{\text{desired}}(t)$ 的变化量可近似为 0。因此，将(5)式代入(4)式，可得实时的测量误差 $R(t)$ ：

$$R(t) = \frac{f_0}{B} \int_t^{t+T} L(t) dt = \frac{f_0}{B} \left\{ \int_t^{t+T} L_{\text{desired}}(t) dt + \frac{L_r}{\pi f_r} \sin(\pi f_r T) \cos[\pi f_r(t + T/2)] \right\} \approx \frac{f_0}{B} \frac{L_r}{\pi f_r} \sin(\pi f_r T) \cos[\pi f_r(t + T/2)]. \quad (6)$$

由(6)式可以看出，实时误差 $R(t)$ 将近似呈周期性变化。对于周期性误差，可以通过平滑处理消除，本文开发的样机采用滑动平均的处理方式。

3 实验系统及验证

3.1 实验系统

为了实现大测量范围，所用调频激光器的调频周期 T 为 0.5 ms(测量速度 2 kHz)，调频带宽 B 为 5000 GHz，功率为 20 mW；采集模块的采样频率 f_s 为 5 MHz；根据采样定律要求，系统理论上最大可测的间隙为 37.5 mm[根据(3)式计算]。为了保证测量精度，采用对干涉信号进行补零快速傅里叶变换的方式来实现 2 kHz 的实时在线间隙解调，补零

后静态解调分辨率为 0.3 μm ；同时对间隙解调值进行 80 点滑动平均以减小周期性的多普勒误差。基于图 1 所示的系统原理和相关方法，自主开发了如图 3 所示的间隙测量样机。

为验证样机的性能，搭建如图 3 所示的转静子轴向间隙模拟实验平台。将光纤探头(切平的 SMF-28e 型单模光纤端面封装在直径为 1.5 mm 的毛细钢管中)安装在电控精密位移台(7SC4 型，SOFN Instruments 公司，位移分辨率为 0.625 μm)上，探头端面与转子转盘(铝制转盘)之间形成被测间隙，精密位移台可提供高精度的间隙标准；采用直流电机来模拟高速转子，通过示波器监测霍尔传感器的输出，并测量转子转速。

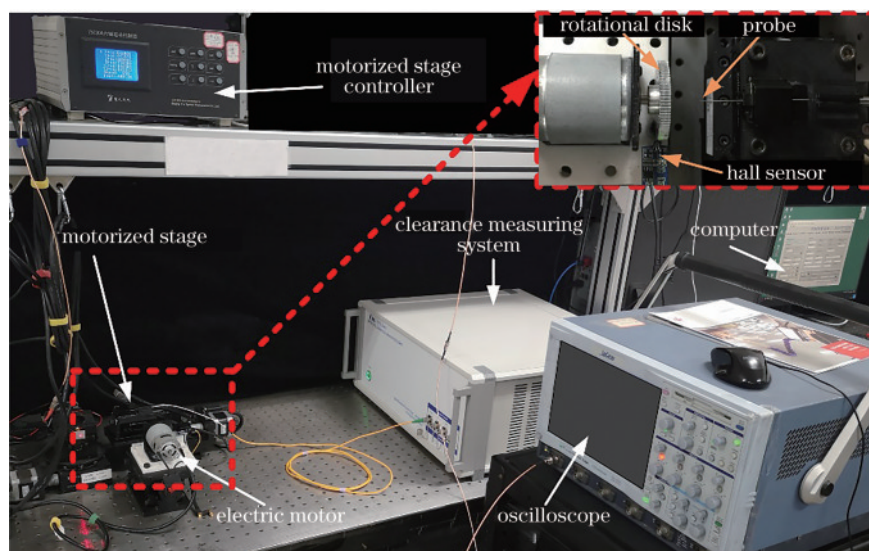


图 3 转静子轴向间隙模拟实验平台

Fig. 3 Rotor-stator axial clearance simulation experimental platform

3.2 样机系统性能测试实验

首先，为了考察样机的测量范围，在转子不转动的情况下，让电控位移台以 1 mm/s 的速度在区间 [0.2 mm, 25.2 mm] 来回移动 10 次(间隙超出 26 mm 后，由于反射回的测量光强变得较弱，容易

出现解调错误)。测量结果如图 4 所示，可以看出，样机测量结果具有良好的重复性和线性度，完全能够满足厘米级测量范围的需求。

接着，为了模拟转静子轴向间隙的变化，采取电机转动加位移台步进平动的复合运动方式。所

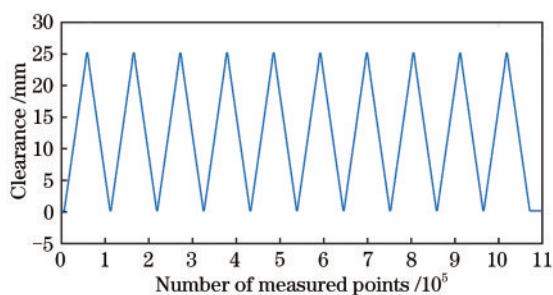


图 4 样机测量范围测试结果

Fig. 4 Testing results of the measurement range of the prototype

采用的电机最高能提供 15000 r/min 的转速,事实上 15000 r/min 转速已远高于常规转动机械,且达到部分型号航空发动机的最高转速。为此,在电机以 15000 r/min 转速进行高速转动的同时,从 1.035 mm

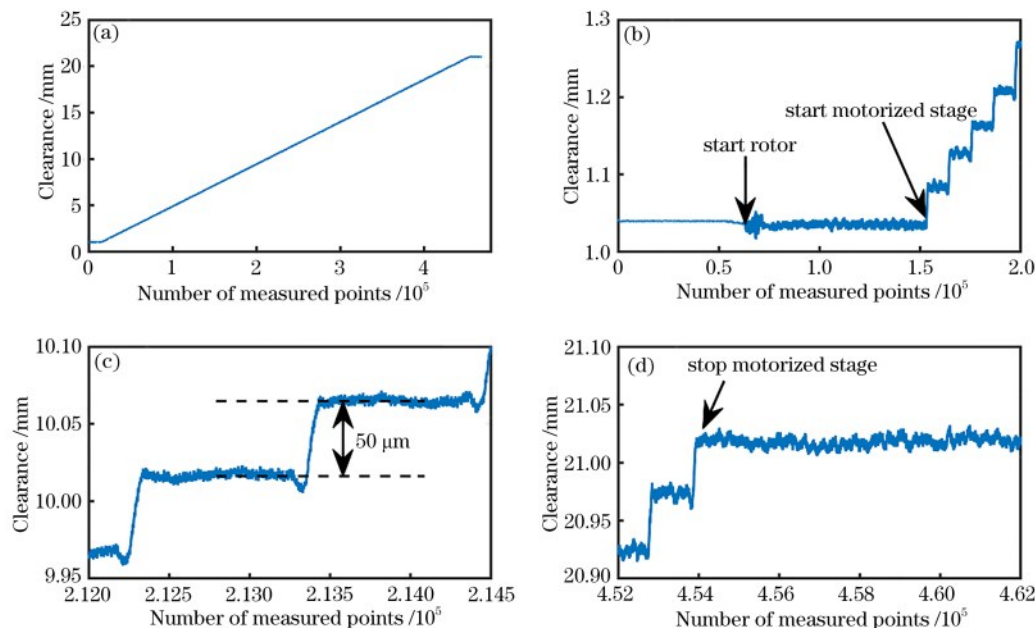


图 5 模拟转静子轴向间隙测量的实验结果。(a)转子转动情况下全程测量结果;(b)转子和位移台启动时局部放大图;
(c)10 mm 间隙处测量结果局部放大;(d)位移台步进结束时局部放大图

Fig. 5 Experimental results of simulated rotor-stator axial clearance measurement. (a) Whole testing result in the case of rotational rotor; (b) the enlarged region of the measurement result when the rotor and motorized stage start; (c) the enlarged region of the measurement result at 10 mm clearance; (d) the enlarged region of the measurement result when the motorized stage stops

对 400 个步进台阶的均值与位移台提供的理论间隙进行对比,可以得出全程的测量误差,如图 6 所示。可以看出,在 0~20 mm 测量范围内测量误差处于 $-15 \sim 15 \mu\text{m}$,仪器精度约为满量程的 0.08%。在转子转动情况下,由于多普勒误差的影响,样机的测量范围有所减小,但是 0~20 mm 的测量范围完全能够满足转静子轴向间隙的测量需求。此外,

初始间隙开始,控制位移台以 $50 \mu\text{m}$ 的步距步进 400 次,测量结果如图 5 所示。从图 5(a)的全程测量结果可以看出,测量结果仍然具有良好的线性度,测量范围可以达到 20 mm。从图 5(b)可以看出,从转子启动时刻开始,转速由静止加速到 15000 r/min,虽然测量值发生了幅度约为 $\pm 15 \mu\text{m}$ 的抖动,但是抖动均值依旧处于初始间隙,直到电控位移台启动以后,测量值才开始出现明显的步进台阶现象,这说明实验中间隙的变化主要由精密位移台提供,与转速无关。图 5(c)为 10 mm 间隙处一个步进台阶的放大图,可以明显看出,步进台阶高度为 $50 \mu\text{m}$,与位移台提供的步进量一致。图 5(d)展示位移台步进结束处的测量结果,步进结束后,测量值在 21.025 mm 附近抖动,这与理论的步进结束值 21.035 mm 相近。

电机高速旋转会不可避免地引起光纤振动,光纤振动会增大干涉信号的包络,但由于系统采用了参考光与测量光共路型的结构,干涉信号的频率并不会受影响,而本文是通过求取干涉信号频率进行间隙解调的,从实验结果可以看出,系统具有良好的抗振能力。

表 1 为所提方法与其他光学类具有代表性的方

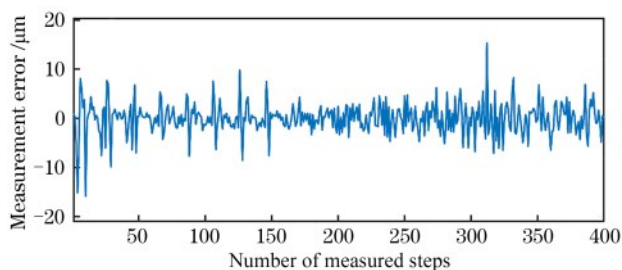


图 6 测量误差

Fig. 6 Measurement error

表 1 不同方法的相关参数对比

Table 1 Comparison of relative parameters for different methods

Method	Measurement range /mm	Instrument precision /%	Measurement speed	Probe diameter
Reflective intensity ratio ^[13]	0-4	0.6	2 MHz	2.5 mm
Laser phase ranging ^[16]	0-9	0.3	200 kHz	6 mm
White light interferometry ^[17]	0-5	0.04	~1 MHz	NA
Frequency-swept interferometry	0-20	0.08	2 kHz	1.5 mm

本实验目前仅初步模拟了高速转动情况下测量方式的可行性,而实际工况,例如航空发动机内部,是高温、高压、高速、且含油污等综合的恶劣环境,要求光纤探头具有耐高温性和抗污损能力。而裸露的光纤端面容易出现高温退化及端面污损,进而可能导致干涉信号对比度下降甚至消失,为此后续将进一步研制带保护窗的耐高温光纤探头封装形式。此外,所研制的样机性能也有待下一步在实际工况下进行实验研究。

4 结 论

对于发动机在旋转情况下的转静子轴向间隙,目前尚无能够实时在线测量的手段。针对此难题,尝试引入调频干涉原理进行转静子轴向间隙测量,并利用高速调频技术与周期性多普勒误差特点,研制出了测量范围为 0~20 mm,测量速度为 2 kHz,仪器精度为满量程的 0.08% 的间隙测量样机。样机采用参考光与测量光共路的系统结构,可有效避免光纤沿线温度与振动的影响;同时,样机可配合光纤制成的微型探头进行测量,能够解决狭小安装空间的难题;样机厘米级的测量范围能够适应大范围的间隙变动。所研制的样机可以为航空发动机转静子轴向间隙这类极端的测量难题提供可用手段与技术参考。当然,本文仅进行了测量方法可行性的初步探索,发动机实际的测试工况远比所搭建的测试环境复杂恶劣。后续,将进一步围绕光纤探头的耐高温性和抗污损性、测量对象(例如转盘粗糙

法关于相关参数的比较,可以看出:调频干涉在测量范围上具有明显优势;仪器精度上与白光干涉法相近,并优于光强比例法和激光相位法;测量速度虽然低于其他方法,但是已经能够适应上万转每分钟的高速转静子轴向间隙测量,并可以实现实时在线测量;对于传感探头而言,光强比例法需要光纤束,激光相位法需要两根多模光纤,白光干涉法需要光子晶体光纤,而调频干涉只需要单模光纤,因此调频干涉可以实现更小尺寸。

度、反射率等)及测量环境(例如烟雾、流场等)对系统性能的影响等方面做进一步研究。

参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] Wang X P, Wang Y R, Tian A M. Effect of axial spacing between rotor-stator on vibration stress of blade[J]. Journal of Aerospace Power, 2016, 31(6): 1427-1434.
王翔鹏, 王延荣, 田爱梅. 转、静子轴向间距对转子叶片振动应力的影响[J]. 航空动力学报, 2016, 31(6): 1427-1434.
- [3] Jiao J F, Song H C, Ji L C. 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.
焦峻峰, 宋红超, 季路成. 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.
- [4] Zhang H, Hu J, Li C P, et al. Effect of axial spacing between rotor and stator on axial compressor stability [J]. Journal of Aerospace Power, 2005, 20(1): 120-124.
张环, 胡骏, 李传鹏, 等. 轴向间距对压气机气动稳定性的影响[J]. 航空动力学报, 2005, 20(1): 120-124.
- [5] Liu D J, Li J, Jiang A W, 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.
- [6] Sheard A G, Turner S R. Electromechanical measurement of turbomachinery blade tip-to-casing running clearance[C]//*Proceedings of ASME 1992 International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exposition*, June 1-4, 1992, Cologne, Germany. New York: ASME, 1992.
- [7] 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.
- [8] Long C, Duan F J, Ouyang T. Application of superheterodyne FM reception in measurement of blade tip clearance[J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2009, 28(3): 108-110.
- 龙成, 段发阶, 欧阳涛. 超外差调频接收技术在叶尖间隙测量中的应用[J]. *传感器与微系统*, 2009, 28(3): 108-110.
- [9] Wang W M, Shang W, Yao J F, 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.
- [10] Woike M, Abdul-Aziz A, Clem M. Structural health monitoring on turbine engines using microwave blade tip clearance sensors[J]. *Proceedings of SPIE*, 2014, 9062: 90620L.
- [11] Wang D P, Jin X, Zhou W J, et al. Nonlinear error calibration method for capacitive displacement sensor based on laser interferometry[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(10): 101203.
- 王大鹏, 金星, 周伟静, 等. 基于激光干涉的电容位移传感器非线性误差标定方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(10): 101203.
- [12] Fang Z Q, Duan F J, Zhang Y G, et al. Application of reflective optical fiber in vibration measurement for high-speed rotating blades[J]. *Journal of Optoelectronics Laser*, 2007, 18(11): 1348-1350.
- 方志强, 段发阶, 张玉贵, 等. 反射式光纤在高速旋转叶片振动测量中的应用[J]. *光电子·激光*, 2007, 18(11): 1348-1350.
- [13] Gil-García J M, Solís 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 (Basel, Switzerland)*, 2017, 17(10): E2162.
- [14] Jia B H, He L, Yan G D, et al. A differential reflective intensity optical fiber angular displacement sensor[J]. *Sensors*, 2016, 16(9): 1508.
- [15] Wu B, Zhang X D, Xie S Y. 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.
- [16] Guo H T, Duan F J, Wu G X, et al. Blade tip clearance measurement of the turbine engines based on a multi-mode fiber coupled laser ranging system [J]. *The Review of Scientific Instruments*, 2014, 85(11): 115105.
- [17] Weng J D, Liu S G, Ma H L, et al. Dynamic frequency-domain interferometer for absolute distance measurements with high resolution[J]. *The Review of Scientific Instruments*, 2014, 85(11): 113112.
- [18] Vakhtin A, Chen S J, Massick S. Optical probe for monitoring blade tip clearance[C]//*47th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition*, January 5-8, 2009, Orlando, Florida. Reston: AIAA, 2009.
- [19] Pang S, Luo Z C, Chang T Y, et al. Similarity demodulation method of interferometric fiber optic sensing system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, 47(6): 0606003.
- 庞铄, 罗政纯, 常天英, 等. 用于干涉型光纤传感系统的相似性解调方法[J]. *光子学报*, 2018, 47(6): 0606003.
- [20] Jing L Q, Zheng G, Zhang X X, et al. Nonlinear correction of frequency-modulated continuous wave interferometric laser sources[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(11): 1114001.
- 井李强, 郑刚, 张雄星, 等. 一种调频连续波干涉激光光源非线性校正方法[J]. *光学学报*, 2019, 39(11): 1114001.
- [21] Jing L Q, Zheng G, Sun B, et al. Measurement of distance to moving target using frequency-modulated continuous-wave interference technique[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(12): 1204001.
- 井李强, 郑刚, 孙彬, 等. 基于调频连续波干涉技术

- 的运动目标距离测量[J]. 中国激光, 2019, 46(12): 1204001.
- [22] Zhang W, Xiong B, Shao B, et al. A demodulation model of dynamic low-finesse Fabry-Perot cavity based on the instantaneous frequency[J]. IEEE Access, 2020, 8: 71074-71082.
- [23] Li Y T, Zhang F M, Pan H, et al. Simulation of vibration compensation in frequency-modulated continuous-wave laser ranging system[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(1): 0104001.
李雅婷, 张福民, 潘浩, 等. 调频连续波激光测距系统的振动补偿仿真研究[J]. 中国激光, 2019, 46(1): 0104001.
- [24] Martinez J J, Campbell M A, Warden M S, et al. Dual-sweep frequency scanning interferometry using four wave mixing[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2015, 27(7): 733-736.
- [25] Chen X L, Wang X C, Pan S L. Laser ranging of frequency scanning interferometry system based on double-sideband modulation[J]. Acta Photonica Sinica, 2017, 46(6): 0612005.
陈希伦, 王祥传, 潘时龙. 基于双边带调制的频率扫描干涉型激光测距技术[J]. 光子学报, 2017, 46(6): 0612005.
- [26] Tao L, Liu Z G, Zhang W B, et al. Frequency-scanning interferometry for dynamic absolute distance measurement using Kalman filter[J]. Optics Letters, 2014, 39(24): 6997-7000.
- [27] Zhang H Y, Tian X N, Lei Y Y, et al. Frequency modulated continuous wave LIDAR based on injection-locking technology for simultaneous distance and speed measurement[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(15): 1528001.
张洪英, 田晓宁, 雷艳阳, 等. 同时测距和测速的注入锁定调频连续波激光雷达[J]. 光学学报, 2020, 40(15): 1528001.