Research on Axial Clearance Sensing Technique Based on RF Heterodyne Method with Dual-Wavelength Laser*

YU Zhenxin, DUAN Fajie*, FU Xiao, NIU Guangyue
(State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: Rotor-stator axial clearance is a critical parameter for major equipment such as aero-engines, determining the efficiency and operational safety of the equipment. The all-fiber axial clearance measurement method based on radio-frequency (RF) heterodyne technique with dual-wavelength laser is proposed. By utilizing the radio frequency phase-shift ranging principle, the theoretical model for axial clearance measurement is established. To suppress temperature drift in the axial clearance measurement, the dual-wavelength RF heterodyne common optical path structure is constructed. To efficiently separate different wavelength lasers at the probe, the dual-wavelength fiber clearance sensor is designed. To achieve high-precision demodulation of the axial clearance, the phase differences are calculated by using the Hilbert transform phase demodulation method. An experimental system based on the proposed method is built, and the results show that the measurement range of axial clearance can reach 0-20 mm, with a measurement accuracy better than 2.8 μm. Temperature drift experiments verify the effectiveness of the dual-wavelength common optical path structure in suppressing temperature drift. The proposed method has significant engineering application value in the field of axial clearance measurement for major equipment.
Key words: online measurement; narrow space clearance sensing; RF heterodyne method; dual-wavelength laser; rotor-stator clearance
EEACC: 7230; 6140 **doi**: 10.3969/j.issn.1004-1699.2026.09.002

基于双波长激光射频外差法的轴向间隙传感技术研究*

余珍鑫, 段发阶*, 傅 骁, 牛广越
(天津大学精密测试技术及仪器全国重点实验室, 天津 300072)

摘 要: 转静子轴向间隙是航空发动机等重大装备的核心参数, 决定了装备的工作效率和运行安全。提出一种基于双波长激光射频外差法的全光纤轴向间隙测量方法, 基于射频外差法相位测量原理, 建立射频相位式轴向间隙测量模型。构建双波长射频调幅共光路结构, 实现轴向间隙测量温度漂移抑制。设计双波长光纤间隙传感器, 实现不同波长激光在探头处高效分离。采用希尔伯特变换相位差解算方法, 实现轴向间隙高精度解调。搭建了射频相位式全光纤轴向间隙测量实验系统, 结果表明, 轴向间隙测量范围可达 0~20 mm, 测量精度优于 2.8 μm, 温度漂移实验验证了双波长共光路结构对轴向间隙温度漂移抑制的有效性, 在重大装备间隙测量领域具有重要的工程应用价值。
关键词: 在线测量; 狭窄空间间隙传感; 射频外差法; 双波长激光; 转静子间隙
中图分类号: V19; P585.1; TN911.7; TP212.9 **文献标识码**: A **文章编号**: 1004-1699(2026)09-1931-09

航空发动机、燃气轮机等重大装备是关乎我国军事水平和国防安全的“国之重器”, 现代航空发动机正朝高推重比、高增压比、高涡前温度方向发展。转静子轴向间隙是重大装备的核心状态参数, 决定了装备的工作效率和运行安全[1-5]。当航空发动机轴向间隙与叶片弦长之比从 0.37 减少至 0.25 时, 效率提高 0.7%[6], 然而过小的转静子轴向间隙会增加动叶片、转轴等转子系统与静叶片、机匣等静子系统碰撞摩擦的概率, 造成重大安全隐患[7]。转静子轴向间隙在线测量是掌握变工况下间隙参数变化规律的有效手段, 为重大装备实施主动间隙控制等提供基础[8-9], 为新一代装备的设计和改进提供重要依据, 为实现重大装备的智能运维、数字孪生提供大数据支撑。

项目来源: 国家自然科学基金项目(52575633, 52675719, U25A20292, 52575634); 高端仪器设备项目(20251.6XT213-001); 中国航发四川燃气涡轮研究院外委课题项目(GJCZ-0202-2024-0006, GJCZ-0202-2024-0004, GJCZ-0202-2024-0010); 天津市全国重点实验室重大专项项目(24ZXZSSS00290, 26JRZDSS00140)
收稿日期: 2024-04-07 **修改日期**: 2024-09-15

转静子轴向间隙测量本质上属于绝对距离测量,但轴向间隙测量对发动机介入程度较高,需要将传感器伸入发动机内部。然而,航空发动机等重大装备内部空间狭窄、结构复杂且环境极端恶劣,对轴向间隙测量带来了严峻的挑战。首先,重大装备内部狭窄的空间限制了传感器探头的尺寸,然而轴向间隙测量范围通常较大,这要求轴向间隙传感器探头在保证小尺寸的同时有极高的耦合效率,从而能在大量程范围内保证较高工作效率;其次,重大装备内部结构复杂,需要使用长距离线缆传输间隙传感信号,并且传输线缆路径蜿蜒曲折;再次,重大装备内部高温且温度多变的恶劣环境,要求长距离传输线缆能在高温环境下工作且能抑制温度变化带来的干扰。由于上述这些难点,这使得以往提出的许多间隙测量方法无法应用到轴向间隙测量上。

目前,间隙测量方法主要分为电学类方法和光学类方法。电学类间隙测量方法主要包括电涡流法、电容法、放电探针法和微波法。2008 年,Yang 等[10]提出了一种电涡流式轴向间隙测量方法,实现了常温下涡旋压缩机的轴向间隙测量,但是电涡流间隙传感方法无法补偿温漂,不适用于航空发动机等重大装备内部高温环境。2012 年,Lavagnoli 等[11]提出了一种电容式叶尖间隙测量方法,并且在 2018 年,Addabbo 等[12]验证了电容式间隙测量方法的静态和动态性能。但是电容式间隙传感器探头尺寸过大,间隙量程范围要求 3 mm 时的传感器尺寸要达到 10 mm 以上,不适用于重大装备内部轴向间隙测量场景下的狭窄空间测量环境[13-15]。并且电容式间隙传感方法同样无法补偿温漂。2020 年,南京航空航天大学的 Yu 等[16]提出了一种交流放电式叶尖间隙测量方法,然而,交流放电式间隙测量方法最大测量范围只有 6 mm,不满足轴向间隙测量范围。2020 年,Aslinezhad 等[17]提出了一种微波式叶尖间隙测量方法,使用 22 GHz~27 GHz 微波频率,实现了 1 mm~5 mm 间隙测量范围,使用的微波传感探头尺寸为 10.2 mm,相对精度在 1.8%以上。另外,在 2021 年,Niu 等[18]提出了一种基于微波式外差结构的轴向间隙测量方法,该种微波式轴向间隙测量系统使用传感器探头的尺寸为 9 mm,并且实现了 18.5 mm 较大轴向间隙测量范围。但是由于微波器件的非线性效应和微波信号较强的电磁干扰,加之以微波探头出射微波信号发散角度较大且不易约束,使间隙测量精度受限;另外,为达到间隙测量要求,微波频率通常在 10 GHz 以上,对微波传输线缆要求较高,难以实现重大装备内部长距离微波信号传输,并且微波传输线缆直径较粗且不易弯折,不利于重大装备内部结构复杂部件之间的信号传输,限制了微波法在实际工程中重大装备轴向间隙测量的应用[19-20]。

相比较电学类测量方法而言,基于光纤的激光测量方法,其探头以及传输光纤的直径尺寸较小,具有小巧、柔性的特点,近年来引起了研究者们的广泛关注。2020 年到 2023 年[21-25],国内外团队基于扫频干涉法,开展了针对旋转机械转静子轴向间隙测量的大量研究,采用全光纤光路结构,使用小尺寸光纤间隙传感器探头,用于旋转机械内部的狭窄空间测量。然而,扫频干涉法的测量速度受到扫频光源扫描速度的限制,从而限制了间隙测量带宽。另外,为校正扫频周期内产生的多普勒误差,需采取额外的补偿光路或算法[26-27],这将增加间隙测量系统的复杂度且进一步限制测量速度和带宽,难以满足间隙测量宽带宽的需求。为消除测量速度的限制,2023 年,Bao 等[28]提出了一种色散频域干涉式轴向间隙测量方法,使用脉冲式宽谱光源代替原来的扫频光源,从而解除了光频扫描周期的限制,也避免了扫描周期内的多普勒误差,其测量速度受限于光谱仪中 CCD 的帧率。但是,从本质上来说,色散频域干涉法和扫频干涉法都属于相干干涉式轴向间隙测量方法,有一个共同的缺点:间隙信号的强度和对比度会受到轴向端面反射测量光强度和探头端面反射参考光强度比值的严重影响。当转子端面旋转时,轴向端面漫反射测量光强度发生快速变化,并且十分微弱,这极大程度影响了干涉信号的强度和对比度。因此,上述两种相干干涉式轴向间隙测量方法实验过程中,需要精确调整光纤间隙传感器探头端面与轴向端面尽可能平行,从而保证回光信号尽可能强且变化幅度尽可能小,这一劣势在进行大量程轴向间隙测量中将变得更加明显。

针对现有轴向间隙测量方法的不足,本文提出一种基于双波长激光射频外差法的全光纤轴向间隙测量方法,兼具传感器尺寸小、测量范围大、精度高和温度漂移低等优点。测量系统基于射频外差法相位测量原理,采用不同波长的激光作为测量光和参考光,设计双波长光纤间隙传感器以实现测量光和参考光在探头处的高效分离,构建测量光和参考光共光路结构,以达到抑制轴向间隙测量温度漂移的目的,采用希尔伯特变换求解测量信号和参考信号相位差,实现轴向间隙高精度测量。最后通过实验验证了双波长激光射频相位式轴向间隙测量系统的性能指标和温度漂移抑制效果。

1　测量原理

1.1　基于双波长激光射频外差法的轴向间隙测量系统结构与原理

双波长激光射频相位式轴向间隙测量系统结构框图如图 1 所示,测量系统光学模块光路结构示意如图 2 所示。测量系统主要由射频信号产生模块、光学模块、信号接收和混频模块、信号采集模块和上位机组成。射频信号产生模块由时钟基准、微控制单元(MCU)、两个锁相环频率综合器(PLL#1 和 PLL#2)、射频功率放大器(PA)和射频中等功率放大器(MPA)组成,其功能为生成射频信号 RF_1、RF_2 和 RF_3,用于双波长激光调制和信号混频,RF_2 和 RF_3 频率相同,与 RF_1 有一中频频率差。光学模块由不同波长的两个激光器、光纤耦合器、马赫-曾德尔电光调制器(EOM)、光纤环行器、双波长光纤间隙传感器探头、波分复用器(WDM)、两个射频光电探测器(PD#1 和 PD#2)组成。信号调理和混频模块由测量路混频放大单元、参考路混频放大单元和带通滤波单元(BPF#1 和 BPF#2)组成。

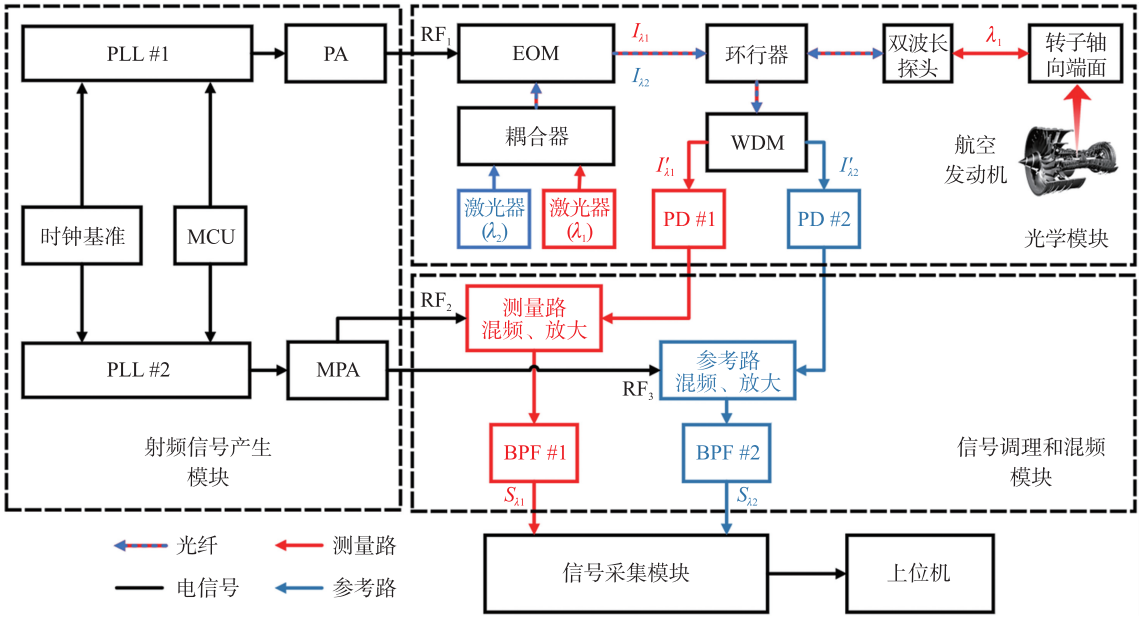

图 1　转静子轴向间隙测量系统结构框图

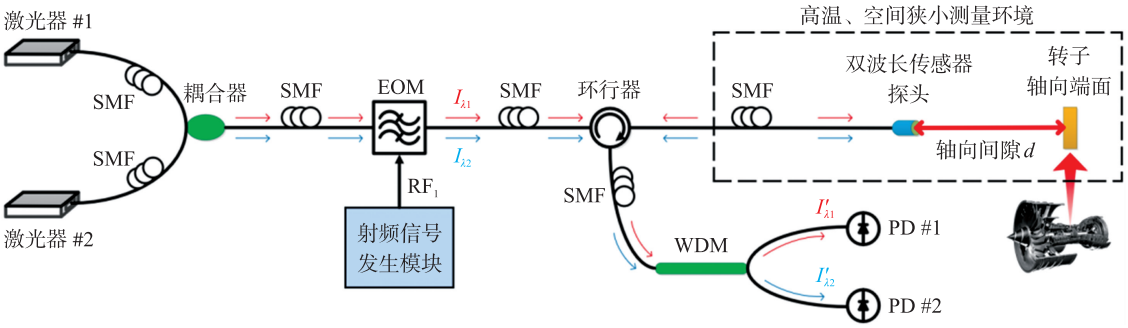

图 2　轴向间隙测量系统光路结构示意图

由两个激光器发射的激光波长为 λ_1 和 λ_2,分别作为测量光和参考光。测量光和参考光通过光纤耦合器耦合到一路光纤内,传输到电光调制器被射频正弦信号 RF_1 调制。调制光经过光纤环行器到达双波长光纤间隙传感器探头,光纤探头通过光纤伸入并安装在航空发动机等旋转机械内部。双波长光纤间隙传感探头镀有光学带通滤波薄膜,对不同波长的测量光和参考光起到不同的作用,波长为 λ_2 的参考光被光纤探头直接反射,波长为 λ_1 的测量光透过探头,穿过轴向间隙空间到达轴向端面,部分端面反射光被光纤探头接收重新耦合到同一路光纤光路中。两种波长混合反射光通过环行器后到达波分复用器,经波分复用器分离后分别被 PD#1 和 PD#2 接收和转换为射频电信号。射频测量信号和参考信号经混频器与射频正弦信号 RF_2 和 RF_3 混频,下变频为中频信号。中频信号经调理后被信号采集模块采样并传输至上位机,测量信号和参考信号经处理后通过相位解调算法解算出两者相位差,并计算出

轴向间隙值。

射频正弦信号 RF_1 的频率为 f_{M1}，RF_2 和 RF_3 的频率为 f_{M2}，两者存在的中频频率差为 f_{IM}。测量光和参考光经电光调制器被射频信号 RF_1 调制后的光强 $I_{\lambda1}$ 和 $I_{\lambda2}$ 可以表示为：

$$\begin{cases} I_{\lambda1}(t)=A_{\lambda1}\sin(2\pi f_{M1}t+\varphi_1) \\ I_{\lambda2}(t)=A_{\lambda2}\sin(2\pi f_{M1}t+\varphi_1) \end{cases} \tag{1}$$

式中：$A_{\lambda1}$ 和 $A_{\lambda2}$ 分别表示调制测量光和参考光强度变化幅度，φ_1 表示射频调制信号 RF_1 的相位。

测量光和参考光在调制之后，所经历的传播过程不同，到达光电探测器时飞行时间不同，从而引入不同的相位变化，测量信号相位变化包含了测量光在轴向间隙空间中传播引起的相位差。到达光电探测器时，测量光和参考光的光强 $I'_{\lambda1}$ 和 $I'_{\lambda2}$ 可以表示为：

$$\begin{cases} I'_{\lambda1}(t)=A'_{\lambda1}\sin(2\pi f_{M1}t+\varphi_1+\varphi_{\lambda1}+\varphi_d) \\ I'_{\lambda2}(t)=A'_{\lambda2}\sin(2\pi f_{M1}t+\varphi_1+\varphi_{\lambda2}) \end{cases} \tag{2}$$

式中：$A'_{\lambda1}$ 和 $A'_{\lambda2}$ 分别表示到达探测器时测量光和参考光的强度变化幅度，$\varphi_{\lambda1}$ 和 $\varphi_{\lambda2}$ 分别表示测量光和参考光在光纤中传播引入的相位变化，φ_d 表示测量光在轴向间隙空间中传播引入的相位变化。

测量光和参考光被光电探测器接收后转换为电信号，经过混频器分别与射频信号 RF_2 和 RF_3 混频，下变频为中频信号，中频信号经电路调理后可以表示为：

$$\begin{cases} S_{\lambda1}=A_1\sin(2\pi f_{IM}t+\varphi_1+\varphi_{\lambda1}-\varphi_2+\varphi'_{\lambda1}+\varphi_d) \\ S_{\lambda2}=A_2\sin(2\pi f_{IM}t+\varphi_1+\varphi_{\lambda2}-\varphi_3+\varphi'_{\lambda2}) \end{cases} \tag{3}$$

式中：A_1 和 A_2 分别表示中频信号变化幅度，φ_2 和 φ_3 分别表示射频信号 RF_2 和 RF_3 的相位，$\varphi'_{\lambda1}$ 和 $\varphi'_{\lambda2}$ 分别表示测量信号和参考信号在电路中引入的相位变化。

通过求解测量信号和参考信号相位差 $\Delta\varphi$，可以求得轴向间隙 d：

$$d=\frac{c}{4\pi n_{air}f_{M1}}\varphi_d=\frac{c}{4\pi n_{air}f_{M1}}[\Delta\varphi-(\varphi_m-\varphi_r)] \tag{4}$$

式中：c 表示真空中的光速，n_{air} 表示空气折射率，φ_m 为 $(\varphi_1+\varphi_{\lambda1}-\varphi_2+\varphi'_{\lambda1})$，$\varphi_r$ 为 $(\varphi_1+\varphi_{\lambda2}-\varphi_3+\varphi'_{\lambda2})$。

当旋转机械内部温度发生变化时，引起式(3)中 $\varphi_{\lambda1}$ 和 $\varphi_{\lambda2}$ 的变化，若这两部分相位变化失配，则会引起轴向间隙测量温度漂移。本文所提出的双波长激光射频相位式轴向间隙测量系统采用双波长激光共光路结构，两种波长的测量光和参考光在同一光纤光路中传播，仅在双波长光纤间隙传感器探头处分光，可以抑制旋转机械内部温度等环境因素的变化所引起的轴向间隙漂移，这一点将在后文做详细分析。

1.2 双波长光纤间隙传感器结构及间隙温漂抑制原理

当航空发动机等重大装备内部高温环境下的温度发生变化时，由于热膨胀效应，光纤的总长度发生变化，并且由于热光效应，测量光和参考光在光纤中的折射率发生变化，因此，测量光和参考光在光纤中传输的光程发生变化，当两者光程变化不一致时，导致两部分 $\varphi_{\lambda1}$ 和 $\varphi_{\lambda2}$ 相位变化不一致，从而引入轴向间隙测量温度漂移。为抑制旋转机械内部温度等环境因素对轴向间隙测量的影响，本文采用图 2 所示的双波长激光共光路的光学结构，旋转机械内部高温环境下的双波长共光路结构如图 3 所示。以下将基于光纤热膨胀效应和热光效应对双波长共光路轴向间隙测量温度漂移做详细分析。

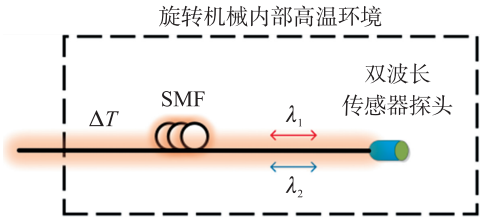

图 3 旋转机械内部双波长共光路结构

当航空发动机内部温度变化 ΔT 时，基于光纤的热膨胀效应和热光效应，双波长激光在旋转机械内部光纤中传输主要发生以下两方面的变化：

其一，温度由 T_0 变化为 T 时，石英光纤发生热胀冷缩，光纤的长度发生改变，考虑光纤热膨胀二阶效应[29]，光纤的总长度变化 Δl 可以表示为：

$$\Delta l(T)=l_0(\alpha_1\times\Delta T+\alpha_2\times\Delta T^2) \tag{5}$$

式中：l_0 表示温度 T_0 下光纤长度，α_1 和 α_2 分别表示热膨胀一阶系数和二阶系数。

其二，测量光和参考光波长不同，在同一路光纤中的折射率不一样，并且当旋转机械内部温度发生变化时，基于光纤的热光效应，两种波长激光的折射率会随着温度的变化而发生改变，折射率的变化量与温度变化量的比值称作热光系数，不同波长激光的热光系数不同，因此当温度变化 ΔT 时，测量光和参考光的折射率 $n'_{\lambda1}$ 和 $n'_{\lambda2}$ 可以表示为：

$$\begin{cases} n'_{\lambda1}=n_{\lambda1}+\Delta n_{\lambda1}=n_{\lambda1}+\beta_{\lambda1}\times\Delta T \\ n'_{\lambda2}=n_{\lambda2}+\Delta n_{\lambda2}=n_{\lambda2}+\beta_{\lambda2}\times\Delta T \end{cases} \tag{6}$$

式中：$n_{\lambda1}$ 和 $n_{\lambda2}$ 分别表示温度 T_0 下测量光和参考光的光纤折射率，$\Delta n_{\lambda1}$ 和 $\Delta n_{\lambda2}$ 表示测量光和参考光折射率变化量，$\beta_{\lambda1}$ 和 $\beta_{\lambda2}$ 分别表示不同波长测量光和参考光在光纤中的热光系数，可以由常用材料光学常数手册[30]得到。

则轴向间隙测量温度漂移可以表示为：

$$\Delta d=(l_0+\Delta l)(n'_{\lambda1}-n'_{\lambda2})-\Delta d_0 \tag{7}$$

式中:Δd_0 表示测量光和参考光的初始光程差,为常数。

由式(7)可以看出,当测量光和参考光热光系数相近时,轴向间隙温度漂移可以被抑制,根据常用材料光学常数手册,当测量光和参考光波长选为 1 550 nm 和 1 530 nm 时,两者热光系数差值为 3×10^{-8}/℃[30],石英光纤一阶热膨胀系数为 5.36×10^{-7}m/℃[29],若伸入旋转机械内部光纤长度为 3 m,轴向间隙温度漂移计算值约为 0.09 μm/℃;当不采用参考补偿光路时,轴向间隙温度漂移计算值约为 26.3 μm/℃。从理论计算结果来看,双波长共光路结构可以有效抑制轴向间隙测量温度漂移,在本文实验部分将通过实验验证双波长共光路结构对轴向间隙测量温度漂移抑制效果。

为实现不同波长测量光和参考光在光纤间隙传感器探头处的高效分离,本文采用双波长光纤间隙传感器设计方法,其结构如图 4 所示。

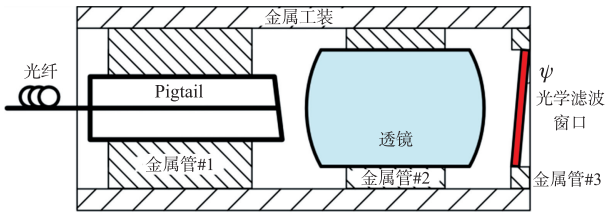

图 4　双波长光纤间隙传感器探头结构图

双波长间隙传感器探头由光纤、8 度角 Pigtail、石英透镜、石英光学滤波窗口、金属工装和三个金属管组成,金属工装和金属管用于固定。测量光和参考光从光纤端面出射,透过透镜后到达光学滤波窗口,光学滤波窗口对不同波长的测量光和参考光起到不同的作用,测量光透射光学滤波窗口,参考光反射,从而实现测量光和参考光的分离。

在理想情况下,波长 λ_1 的测量光能够完全透过滤波窗口,波长 λ_2 的参考光反射。然而,基于我们知识范围内的现有技术,光学截止滤波膜对两种波长光的透射带隔离度 iso_t 和反射带隔离度 iso_r 均有限。一方面,透过滤波窗口的激光不只含有波长 λ_1 的测量光,还包含有波长 λ_2 的参考光,由于透射带隔离度 iso_t 一般较高,并且两种波长光经过转子轴向端面漫反射后小部分反射光被探头重新接收,因此接收到的波长 λ_2 激光强度很小,相比于由滤波窗口直接反射的波长 λ_2 参考光,这部分相对强度很小,可以忽略其对轴向间隙测量带来的影响;另一方面,由滤波窗口反射的激光不只含有波长 λ_2 参考光,还包含有波长 λ_1 的测量光,由于双波长探头回收的从转子轴向端面漫反射测量光强度较弱,因此这部分测量光相对强度较大,其对测量带来的影响不可忽略。基于上述原因,不能直接将光学截止滤波膜直接镀在透镜上,否则,波长为 λ_1 的测量光从光纤探头端面的回光过强,与转子轴向端面的反射光混合后,带来较大误差,导致无法测量。因此,在设计双波长光纤探头的过程中,需要平衡测量光和参考光的回损,即在测量光回损足够高的情况下,最大程度降低参考光回损。在本文所提出的轴向间隙测量系统中,通过控制滤波窗口的轴向位置和滤波窗口法线与光轴的角度 ψ 来实现这一目的。

2　基于希尔伯特变换的轴向间隙求解算法

在得到式(3)表示的中频信号 $S_{\lambda1}$ 和 $S_{\lambda2}$ 之后,需要选取一种合适的相位解调算法,计算中频信号的相位差,从而解算出轴向间隙值。在实际工程应用中,普遍采用的数字相位解调算法主要有相关分析鉴相法、FFT 鉴相法和希尔伯特变换鉴相法等。相关分析法通过对两个信号进行互相关分析求解信号相位差,由于有效信号与噪声相关性很低,因此这种方法具有良好的抗噪特性,但是这种方法要求对信号整周期采样并且需要足够多的样点[31],这在轴向间隙在线测量中难以保证。FFT 鉴相法通过对信号进行快速傅里叶变换,得到信号的幅频图和相频图,从而解算信号的相位差,但是这种方法对异步采样信号进行傅里叶变换的过程中容易存在频谱泄漏,从而引入额外的鉴相误差[32]。本文采用希尔伯特变换鉴相法,这种方法不需要整周期采样,所需的采样点数适中,利于间隙信号相位实时解调和轴向间隙在线测量。

如图 5 所示,中频信号 $S_{\lambda1}$ 和 $S_{\lambda2}$ 经过放大、滤波等调理过程之后,被 A/D 转换单元采样后成为数字信号 S_1 和 S_2,在微控制单元中对信号 S_1 和 S_2 分别做希尔伯特变换计算相位并求解相位差。

希尔伯特变换的核心内容是测量信号和参考信号分别与信号 $1/(\pi t)$ 做卷积,则对信号 S_1 和 S_2 做希尔伯特变换,可以得到:

$$\begin{cases}\hat{S}_1(t)=H[S_1(t)]=\dfrac{1}{\pi}\displaystyle\int_{-\infty}^{\infty}\dfrac{A_1\sin(2\pi f_{\mathrm{IM}}\tau+\varphi_m+\varphi_d)}{t-\tau}\mathrm{d}\tau\\ \hat{S}_2(t)=H[S_2(t)]=\dfrac{1}{\pi}\displaystyle\int_{-\infty}^{\infty}\dfrac{A_2\sin(2\pi f_{\mathrm{IM}}\tau+\varphi_r)}{t-\tau}\mathrm{d}\tau\end{cases}\tag{8}$$

对 $\hat{S}_1(t)$ 和 $\hat{S}_2(t)$ 做傅里叶变换可知,卷积的结果即为对测量信号和参考信号移相 90°,则:

$$\begin{cases}\hat{S}_1(t)=\cos(2\pi f_{\mathrm{IM}}\tau+\varphi_m+\varphi_d)\\ \hat{S}_2(t)=\cos(2\pi f_{\mathrm{IM}}\tau+\varphi_r)\end{cases}\tag{9}$$

测量信号和参考信号相位差 φ_d 可以表示为：

$$\Delta\varphi=\tan^{-1}[S_1/\hat{S}_1]-\tan^{-1}[S_2/\hat{S}_2] \quad (10)$$

根据上式计算出相位差后，由式(4)解算出间隙值，然后传输至上位机存储并显示。

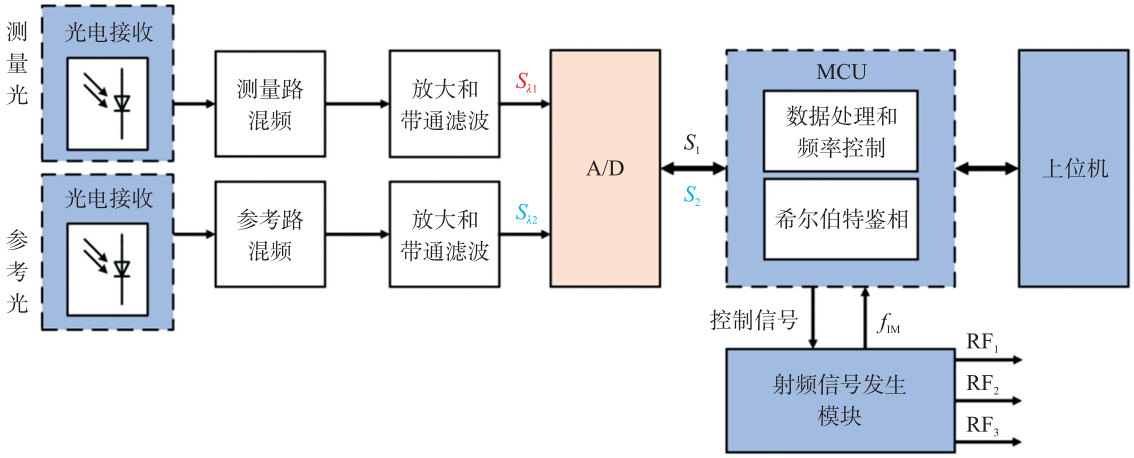

图 5 轴向间隙测量系统信号处理部分结构框图

3 实验和结果

如图 6 所示，在实验室条件下，为了模拟轴向间隙的变化，将双波长光纤探头固定在设计好的机构上并将其安装在一个精密电动位移台上，使其可以沿轴向移动产生轴向位移。设计的双波长光纤探头的直径为 3 mm，采用的位移台的丝杠导程为 5 mm，内置驱动步进电机步距角为 1.8 度，细分数设置为 8。另外，将一个金属圆盘固定在一个电机上，将其端面朝向光纤探头，用于模拟发动机的转子。将搭载有圆盘的电机安装在一个升降台上以方便调整高度和光纤探头对准。实验中，搭建了图 2 所示的光路结构。用到了两个不同波长的激光器，激光器#1 的波长 λ_1 为 1 550 nm，激光器#2 的波长 λ_2 为 1 530 nm。双波长传感器探头对 1 550 nm 激光透射，对 1 530 nm 激光反射，因此，1 550 nm 激光作为测量光，1 530 nm 激光作为参考光。通过一个马赫-曾德尔调制器对测量光和参考光进行共光路射频调制，调制频率为 6 GHz。最后，如图 7 所示，本实验中使用到一个激光干涉仪，其距离测量结果被用作本实验中的标准值和用于作对比。

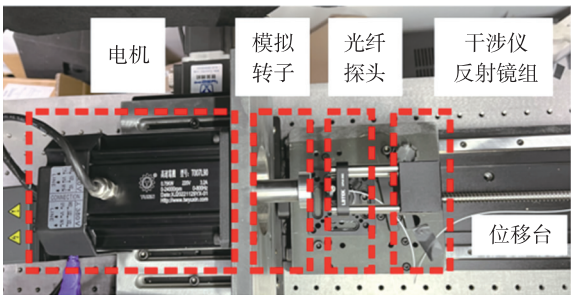

图 6 光纤探头安装结构图

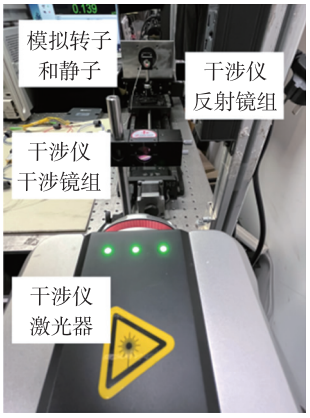

图 7 激光干涉仪光路结构和模拟转静子安装结构图

实验主要需要验证的测量性能指标包括 0～20 mm 测量范围内的测量分辨率 、重复性、测量精度和温度漂移。为了更准确验证本测量系统的上述性能指标，在性能验证实验开始之前，使用激光干涉仪对测量系统在测量范围内进行标定，使用激光干涉仪测量值作为参考值，本系统得到的相位差测量结果为测量值，使用多项式拟合完成标定，标定实验完成之后，进行一系列验证实验。

首先，进行测量重复性验证实验，在 0～20 mm 范围内，电动位移台从距离为 0 的位置开始，每隔 0.5 mm 移动一步，并进行一次轴向间隙测量，每次进行时长 60 s 的测量，每隔 20 ms 记录一次轴向间隙测量值。一共在 41 个位置进行测量，对每个测量位置的 60 s 轴向间隙测量结果求标准差，标准差计算结果如图 8 所示。由图 8 可以看出，在 0～20 mm 测量范围内的测量标准差结果优于 6.1 μm。

其次，进行测量分辨率验证实验，选取测量范围内任意位置，通过驱动器控制电动位移台以单步步距

向前移动,单步步距位移为 3 μm,在每个点进行测量,得到相位差测量结果如图 9 所示,由测量结果可知,本测量系统的轴向间隙测量分辨率优于 3 μm。

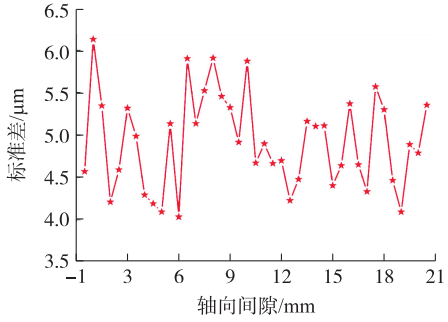

图 8　重复性验证实验测量结果

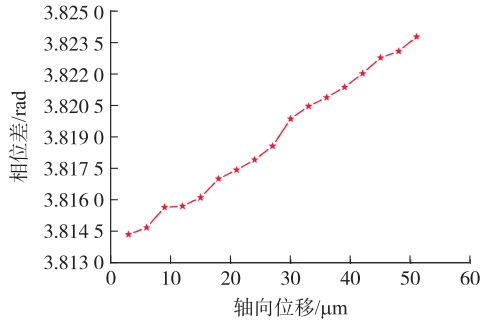

图 9　分辨率验证实验测量结果

再次,进行测量系统精度验证实验,在 0 ~ 20 mm 测量范围内,电动位移台以 0.5 mm 步距向前移动,每移动一步进行一次轴向间隙测量,记录测量系统的轴向间隙测量结果和激光干涉仪的输出结果,用每一个测量点的测量系统轴向间隙测量值减去激光干涉仪参考值,得到每个测量点的测量误差。进行三组如上测量实验,实验误差结果如图 10 所示。由测量结果可以看出,在 20 mm 测量范围内,测量精度优于 2.3 μm。

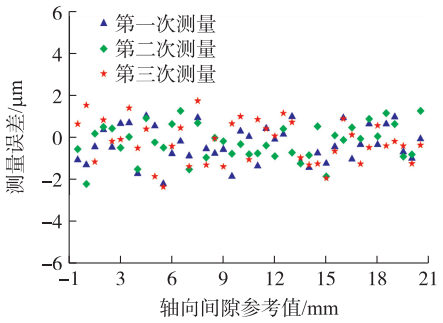

图 10　精度验证实验测量结果

最后,为验证双波长激光射频相位式轴向间隙测量系统对温度漂移抑制效果,进行温度漂移测量实验。温度漂移实验在高温恒温箱中进行,采用耐高温聚酰亚胺涂层光纤。首先,将恒温箱内部温度设置为 130 ℃,等待其内部温度稳定后,在轴向间隙 12 mm 处附近进行一次测量,测量时长为 60 s,记录测量结果。然后,将恒温箱内部温度设置为 230 ℃,待其内部温度稳定后,在同一轴向间隙位置处进行一次测量,记录测量结果。两个温度下的测量结果如图 11 所示,对比两次测量结果的均值,当温度从 130 ℃变化到 230 ℃时,即温度变化 100 ℃时,轴向间隙测量结果漂移了约 9 μm,和理论计算结果符合,且远小于未经补偿的轴向间隙温度漂移结果,这也能说明本文提出的双波长激光共光路结构具有良好的温度漂移抑制效果。

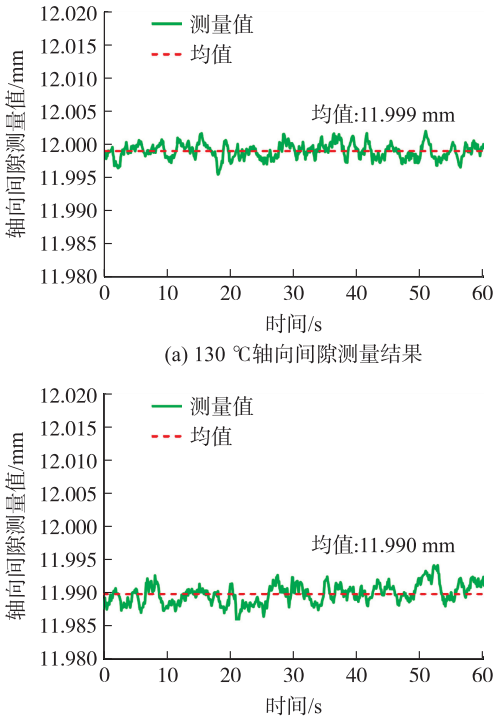

图 11　温度漂移实验测量结果

另外,对于双波长光纤传感器探头来说,温度的变化对光学带通滤波器的透射带和反射带中心波长的影响比较微小。温度每变化一摄氏度,中心波长移动几皮米。并且在进行实验设计之初考虑了留有一定的裕量,因此温度变化不会影响双波长光纤间隙传感器对测量光和参考光的高效分离。

4　结论

为解决航空发动机、燃气轮机等重大装备在狭窄空间、高温环境下转静子轴向间隙测量难题,本文提出一种基于双波长激光射频外差法的全光纤轴向间隙测量方法。测量系统基于射频外差法相位测量原理,建立了射频相位式轴向间隙测量模型。为抑制重大装备内部温度变化带来的轴向间隙温度漂移,构建了测量光和参考光双波长射频调幅共光路结构。为

实现探头处不同波长测量光和参考光的高效分离,设计了双波长光纤间隙传感器。采用基于希尔伯特变换的测量信号和参考信号相位差解算方法,进行轴向间隙高精度解调,最终实现了狭窄空间下大量程、高精度转静子轴向间隙测量。实验结果表明,基于双波长激光射频外差法搭建的测量系统轴向间隙测量范围可达 0~20 mm,在测量范围内的测量分辨力优于 3 μm,测量精度优于 2.8 μm。所使用的双波长光纤间隙传感器的直径为 3 mm,适用于重大装备内部狭窄空间测量环境。温度漂移验证实验结果表明,当温度变化 100 ℃时,轴向间隙测量结果漂移约为 9 μm,远小于未经温漂补偿的结果,说明双波长激光共光路结构具有良好的温度漂移抑制效果。

总结来说,基于双波长激光射频外差法的全光纤轴向间隙测量方法具有大测量范围、高精度、低温度漂移等优点,在航空发动机等重大装备间隙测量领域具有较大的潜力和广泛的工程应用推广意义。需要指出,由于空气流动、温度变化等环境因素会对间隙空间空气折射率产生影响从而可能引入轴向间隙测量误差。在未来的研究工作中,可以关注于探究间隙空间内环境因素变化对间隙测量影响机理,构建数学模型,并研究干扰抑制方法。

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] Choi M G, Ryu J. Numerical Study of the Axial Gap and Hot Streak Effects on Thermal and Flow Characteristics in Two-Stage High Pressure Gas Turbine [J]. Energies, 2018, 11(10): 2654.

[3] Li H, Zheng Q, Jiang B. Influence of Rotor-Stator Axial Clearance on Compressor Rotating Stall Characteristics[J]. Aerospace Science and Technology, 2023, 139: 108373.

[4] Li P, Cao L. Effect of Rotor-Stator Axial Gap on the Tip Seal Leakage Flow of a Steam Turbine[J]. Journal of Thermal Science, 2021, 30(3): 973-982.

[5] Yang C, Fan L, Zhong Z, et al. Numerical and Experimental Investigation on Flow Field of the Turbine Stage under Different Axial Gaps[J]. Processes, 2023, 11(7): 2138.

[6] Ali S M M. Numerical Simulation of Air Flow in Aero-engine Compressors[D]. London, ON, Canada: The University of Western Ontario, 2017.

[7] Wu J, Wen B, Zhang Q, et al. A Novel Blade Tip Clearance Measurement Method Based on Event Capture Technique [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2020, 139: 106626.

[8] Gao B, Shen W, Guan H, et al. Review and Comparison of Clearance Control Strategies[J]. Machines, 2022, 10(6): 492.

[9] Jia B H, Zhang X D. An Optical Fiber Blade Tip Clearance Sensor for Active Clearance Control Applications[J]. Procedia Engineering, 2011, 15: 984-988.

[10] Yang Q, Li L, Zhao Y, et al. Experimental Measurement of Axial Clearance in Scroll Compressor Using Eddy Current Displacement Sensor[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2008, 222(7): 1315-1320.

[11] Lavagnoli S, Paniagua G, Tulkens M, et al. High-Fidelity Rotor Gap Measurements in a Short-Duration Turbine Rig [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2012, 27: 590-603.

[12] Addabbo T, Bertocci F, Fort A, et al. A Clearance Measurement System Based on on-Component Multilayer Tri-Axial Capacitive Probe [J]. Measurement, 2018, 124: 575-581.

[13] 易亮,薛志飞,郑芳芳,等. 航空发动机碳纤维复合材料风扇叶片叶尖间隙测量研究[J]. 传感技术学报, 2023, 36(5): 673-679.

[14] 张鑫,段发阶,叶德超,等. 基于 RMS 的旋转叶片叶尖间隙信号处理方法[J]. 自动化与仪表, 2019, 34(11): 42-46.

[15] 邵兴臣,段发阶,蒋佳佳,等. 基于自适应滑动均值和小波阈值的叶尖间隙信号降噪方法[J]. 传感技术学报, 2021, 34(1): 34-40.

[16] Yu B, Zhang T, Ke H, et al. Research on the Tip Clearance Measuring Method Based on AC Discharge[J]. IEEE Access, 2020, 8: 60355-60363.

[17] Aslinezhad M, Hejazi M A. Turbine Blade Tip Clearance Determination Using Microwave Measurement and *k*-Nearest Neighbour Classifier[J]. Measurement, 2020, 151: 107142.

[18] Niu G, Duan F, Liu Z, et al. A High-Accuracy Non-Contact Online Measurement Method of the Rotor-Stator Axial Gap Based on the Microwave Heterodyne Structure [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2021, 150: 107320.

[19] 杨季三,徐贵力,董文德,等. 微波叶尖间隙传感器信号校准研究[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(10): 193-201.

[20] 牛广越,段发阶,周琦. 基于微波相位差测距的叶尖间隙动态测量方法[J]. 航空学报, 2022, 73(9): 194-212.

[21] Ren Y, Hao L, Peng Z, et al. Fast Algorithm of Single Frequency-Swept Interferometry for the Dynamic Axial Clearance Measurement of High-Speed Rotating Machinery[J]. Optics Express, 2023, 31(3): 4253-4267.

[22] Bao R, Duan F, Fu X, et al. Frequency-Scanning Interferometry for Axial Clearance of Rotating Machinery Based on Speed Synchronization and Extended Kalman Filter[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2023, 164: 107515.

[23] Shao B, Zhang W, Zhang P, et al. Dynamic Clearance Measurement Using Fiber-Optic Frequency-Swept and Frequency-Fixed Interferometry [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2020, 32(20): 1331-1334.

[24] Ren Y L, Zhang P, Shao B, et al. Correlation-Changed-EMD Algorithm for Single Frequency-Sweep Interferometry Signal of High-Speed Rotating Structure Clearance Measurement [J]. IEEE Sensors Journal, 2023, 23(23): 29366-29375.

[25] Liu H, Zhang W, Shao B, et al. Algorithm of Doppler Error Suppression in Frequency-Swept Interferometry for the Dynamic Axial Clearance Measurement of High-Speed Rotating Machinery [J]. Optics Express, 2021, 29(26): 42471-42484.

[26] 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.

[27] Shang Y, Lin J, Yang L, et al. Precision Improvement in Frequency Scanning Interferometry Based on Suppression of the Magnification Effect[J]. Optics Express, 2020, 28(4): 5822-5834.

[28] Duan F, Li X, Bao R, et al. High Precision Dynamic Measurement Method for Axial Clearance Based on Time Division Multiplexing with Dispersive Interferometry[J]. Optics Express, 2023, 31(17): 28549-28563.

[29] Gao H, Jiang Y, Cui Y, et al. Investigation on the Thermo-Optic Coefficient of Silica Fiber within a Wide Temperature Range[J]. Journal of Lightwave Technology, 2018, 36(24): 5881-5886.

[30] Palik E D. Handbook of Optical Constants of Solids[M]. San Diego, CA, USA: Academic Press, 1997: 115-261.

[31] Fan W, Li Y, Tsui K L, et al. A Noise Resistant Correlation Method for Period Detection of Noisy Signals[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2018, 66(10): 2700-2710.

[32] Yamada T. High-Accuracy Estimations of Frequency, Amplitude, and Phase with a Modified DFT for Asynchronous Sampling[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2013, 62(6): 1428-1435.

余珍鑫(1997—),男,2019 年于天津大学获得学士学位,现为天津大学博士研究生。主要研究方向为激光及光电测试技术、光纤传感技术,yuzhenxin@tju.edu.cn;

段发阶(1968—),男,分别在 1989、1992、1994 年于天津大学获得学士学位、硕士学位和博士学位,现为天津大学教授,主要研究方向为激光及光电测试技术、重大装备在线检测与健康监测、光纤传感技术、自动控制技术、计算机视觉检测技术,fjduan@tju.edu.cn。