

文章编号 1004-924X(2018)07-1578-10

涡轮叶片三维叶尖间隙光纤检测系统

张小栋*, 吴冰, 谢思莹

(西安交通大学 现代设计及转子轴承系统教育部重点实验室, 陕西 西安 710049)

摘要: 航空发动机涡轮叶片叶尖间隙呈三维变化特点, 传统光纤式叶尖间隙检测系统的测量结果受维间耦合影响精度差, 信息源单一。本文利用一种沿直角等腰三角排布的三路双圈同轴式光纤传感基元组成的传感探头, 通过 BP 神经网络解耦方法, 实现了从传感器输出到叶尖端面径向间隙、轴向倾角和周向倾角三维参量的解耦。设计加工三维测量光纤传感器和后续调理电路并对检测系统进行了静、动态实验验证。实验结果表明: 该系统径向间隙静态测量的最大误差为 $47\ \mu\text{m}$, 标准差为 $10\ \mu\text{m}$, 轴向和周向倾角的静态测量最大误差分别为 0.49° 和 2.32° , 标准差分别为 0.13° 和 0.36° 。系统具有良好的重复性和可靠性, 径向间隙的动态测量标准差小于 $18\ \mu\text{m}$, 轴向和周向倾角的动态测量标准差小 0.2° 和 0.5° , 能够满足航空发动机涡轮叶片叶尖间隙三维参量快速实时检测的需求。

关键词: 光纤传感; 航空发动机; 三维叶尖间隙; 神经网络; 检测系统

中图分类号: TN253; TH741 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20182607.1578

Optical fiber measurement system for 3-D variation of turbine blade tip clearance

ZHANG Xiao-dong*, WU Bing, XIE Si-ying

(Key Laboratory for Modern Design & Rotor-Bearing System of Ministry of Education,
Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

* Corresponding author, E-mail: acmt@mail.xjtu.edu.cn

Abstract: Turbine blade tip clearance varies in a three-dimensional (3-D) direction in an aero-engine. The traditional fiber-optic sensor can only measure the radial clearance, and the results are affected by the interdimensional coupling effect. In this paper, a sensor array consisting of three of the two-circle coaxial fiber bundles, arranged along the isosceles triangle layout, was used to realize the decoupling of blade tip clearance 3-D parameters. These parameters included radial clearance, axial deviation angle, and circumferential deviation angle from the sensor outputs, leveraging a BP neural network method. A special fiber-optic sensor array and signal conditioning circuit were developed, and the experimental tests for static and dynamic properties of the measurement system were performed. Experimental results indicate that the maximum error of radial clearance static measurement is $47\ \mu\text{m}$ with a standard deviation of $10\ \mu\text{m}$. The maximum error of axial and circumferential deviation angle static measurements are 0.49° and 2.32° with standard deviations of 0.13° and 0.36° , respectively; the measurement system performed well in terms of repeatability and reliability. The dynamic

收稿日期: 2017-12-14; 修订日期: 2018-02-10.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 51575436)

measurement standard deviation of radial clearance is less than $18 \mu\text{m}$ with axial and circumferential deviation angles of less than 0.2° and 0.5° , respectively. This satisfies the demand of real-time detection of blade tip clearance 3-D parameters of turbine blades of an aero-engine.

Key words: fiber-optic sensing; aero-engine; 3-D tip clearance; neural network; measurement system

1 引言

航空发动机涡轮是将空气动能和高温内能转换为飞行动能的关键部件,其核心零件是负责完成功能转换的涡轮转子叶片。在发动机运行中,叶片除承受高速旋转的离心载荷外,还受到热应力、气动载荷以及转子振动等产生的交变应力影响。据统计,在发动机零部件失效事件中,转子叶片占到70%以上^[1],因此对叶片健康状态的监测尤为重要。由于航空发动机内部环境条件复杂,涡轮内部的高温、高污染环境限制了对发动机叶片运行状态的精密监测,目前对于叶片状态的监测以叶尖间隙变化检测为主。

近年来,国内外学者提出了多种叶尖间隙的检测方法。陈玉涛等人通过CCD光学影像测量方法实现了发动机装配过程中叶尖间隙的在线测量^[2]。天津大学王凯、段发阶等人利用大频差双频激光测距实现了发动机运行中叶片叶尖间隙的测定^[3]。R. Rzakowski等人利用叶尖定时和叶尖间隙测量结果来分析预测转子中段轴承的失效^[4]。反射式光纤传感器具有环境适应性强、抗电磁干扰、耐腐蚀、耐高温、灵敏度高、测量精度高等优点^[5-6],非常适合应用于叶尖间隙的测量。贾丙辉采用光纤传感器实现了燃气轮机叶尖间隙的动态测量^[7]。José Miguel Gil-García等人已成功将双圈同轴式光纤传感器应用于发动机地面试车台叶片叶尖间隙的检测^[8],但面对叶尖端面出现的三维空间变化特性,该类传感器存在测量结果不准确^[9],测量信息源单一等问题。目前,针对叶片三维信息的测量方法主要以三坐标测量机为系统平台,通过非接触式激光扫描测头对叶片轮廓进行扫描测量^[10],因航空发动机系统结构复杂,该类方法不适用于机载测量。

本文在以往叶尖一维间隙光纤检测方法的基础上提出叶片叶尖间隙三维参量的检测方案,设计一种由三束双圈同轴式光纤传感基元构成的传感探头并开发了后续的信号调理电路,消除单一

传感器测量中维间耦合对径向间隙测量结果的影响,实现对叶尖径向间隙、轴向倾角和周向倾角三维参量的检测,获取更多叶片状态信息,为实现叶尖间隙状态的实时监测,快速、全面、准确地识别航空发动机叶片的故障行为提供了可行方案。

2 三维参量光纤检测原理及系统构成

2.1 叶尖间隙三维参量光纤检测原理

目前的研究主要针对航空发动机叶片一维间隙的测量,忽略了叶片叶尖端面作为一个空间平面所具有的三维特性^[11]。除一维径向间隙变化外,叶片在外力作用下同时出现沿其他两维方向的变化(见图1),包括叶尖表面的轴向偏转倾角 α 和周向滑移倾角 β ^[12]。

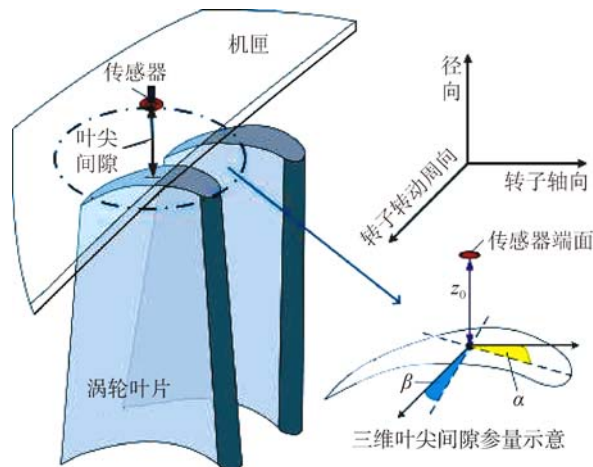


图1 涡轮叶片叶尖间隙的三维变化示意图

Fig. 1 Three-dimensional variation of clearance of turbine blade tip

采用双圈同轴式光纤传感器对涡轮叶片叶尖一维径向间隙的测量技术已较为成熟,但对于叶尖端面同时出现径向位移、轴向倾角和周向倾角三维参量变化时的测量研究却较少。当叶尖端面相对于传感器端面同时存在径向位移、轴向倾角和周向倾角变化时,双圈同轴式光传感器输出的调制函数可表示为^[13]:

$$M(z, \alpha, \beta) = \frac{I_{r2}}{I_{r1}} = \frac{\sum_{i=7}^{12} \rho K \exp(-\sum_i \eta_i r_i) \cdot S_i \varphi_{s_i}(r, z)}{\sum_{i=1}^6 \rho K \exp(-\sum_i \eta_i r_i) \cdot S_i \varphi_{s_i}(r, z)} \quad (1)$$

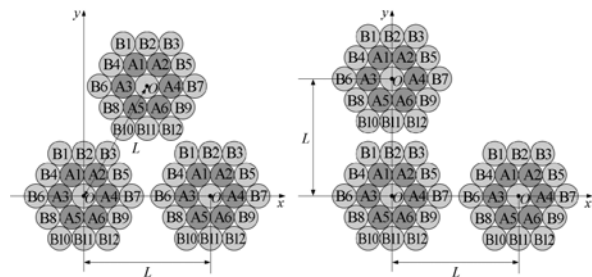
式中： ρ 为反射率； K 为接收光纤光功率损耗系数； $\exp(-\sum_i \eta_i r_i)$ 为接收光纤附加弯曲损耗； S_i 为第 i 支光纤虚像面上光斑覆盖的有效面积； $\varphi_{s_i}(r, z)$ 为第 i 支光纤虚像面接收的平均光强； r 为纤端光场中某点到入射光锥轴的半径。忽略传感器光纤的制造工艺差异，则式(1)可简化为：

$$M(z_0, \alpha, \beta) = \frac{I_{r2}}{I_{r1}} = \frac{\sum_{i=7}^{12} S_i \varphi_{s_i}(r, z)}{\sum_{i=1}^6 S_i \varphi_{s_i}(r, z)} \quad (2)$$

双圈同轴式结构通过双光路补偿消除了光功率波动、光纤损耗等引起的测量误差，因此传感器输出值变化仅与径向位移、轴向和周向倾角的变化有关，即 $M=f(z, \alpha, \beta)$ 。对于确定的叶尖端面三维参量，其传感器输出值唯一，式(2)中仅含有未知参量 z, α 和 β ，理论上采用三组不共线排列的光纤传感器输出值即可实现三维参量的求解。

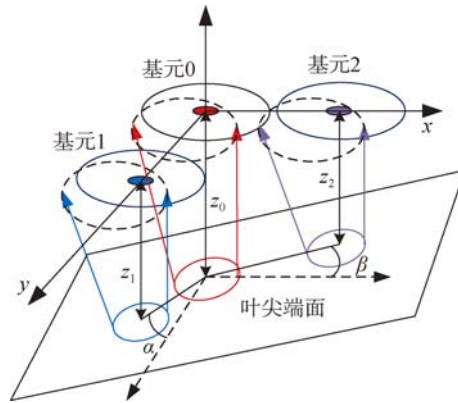
2.2 光纤传感器设计

依据双圈同轴式光纤传感器的三维空间输出特性，本文设计了由三路双圈同轴式光纤传感基元沿等腰直角三角排布和等边直角三角排布的两类探头结构(图 2(a))，并选择了基元间相互耦合程度最小的等腰直角三角排布探头结构，本文设计了一种沿等腰直角三角排布的由三路双圈同轴式光纤传感基元组成的传感探头结构(图 2(b))，实现对叶尖端面三维参量的测量。



(a)两种探头结构示意图

(a) Two types of fiber sensor array



(b)等腰直角三角基元结构检测模型

(b) Detection model of isosceles right triangle sensor array

图 2 光纤传感探头结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of fiber sensor arrays

在传感探头中，光纤基元 0 与基元 1 沿轴向排布，基元 0 与基元 2 沿周向排布。各基元端面相对于叶尖端面具有相同的轴向倾角 α 和周向倾角 β 。各基元端面中心处距离叶尖端面的距离分别为 z_0, z_1 和 z_2 ，由于各基元间距已知为 L ，通过各基元与叶尖端面距离可间接得到叶尖端面的轴向倾角值和周向倾角值，由此可以得到方程组：

$$\begin{cases} M_0(z_0, \alpha, \beta) = \frac{\sum_{i=7}^{12} S_i \varphi_{s_i}(r, z_0)}{\sum_{i=1}^6 S_i \varphi_{s_i}(r, z_0)} \\ M_1(z_1, \alpha, \beta) = \frac{\sum_{i=7}^{12} S_i \varphi_{s_i}(r, z_1)}{\sum_{i=1}^6 S_i \varphi_{s_i}(r, z_1)} \\ M_2(z_2, \alpha, \beta) = \frac{\sum_{i=7}^{12} S_i \varphi_{s_i}(r, z_2)}{\sum_{i=1}^6 S_i \varphi_{s_i}(r, z_2)} \\ \tan \alpha = \frac{z_0 - z_1}{L} \\ \tan \beta = \frac{z_0 - z_2}{L} \end{cases} \quad (3)$$

由式(2)可知，该传感器的输出函数 $M(z, \alpha, \beta)$ 为高阶非线性函数，采用一般数学方法无法直接得出式(3)方程组的解，而数值计算方法需要大量迭代运算不适合应用于在线测量。目前，有不少研究者采用神经网络技术实现对非线性传感器的建模和标定，结果证明相对于传统的求解标定

系数矩阵的方法,神经网络具有一定的优越性,能有效提高传感器的测量精度,解决了传感器解耦困难的问题^[14-15]。因此本文采用 BP 神经网络,利用其学习泛化能力逼近传感器输出与叶尖间隙三维参量之间的高维非线性映射关系,实现三维参量的测量。

按照上述设计实现的光纤传感器实物如图 3 所示,传感器选用数值孔径为 0.22,芯层/包层比为 1:1.04,纤芯半径为 150 μm 的石英光纤。兼顾探头尺寸限制和角度测量精度各基元间距 L 选取为 2 mm,将探头整体外径缩小至 5 mm。光纤束外部采用金属铠装管隔离保护,光纤接口采用 FC 型标准螺纹接口以保证光耦合效率。

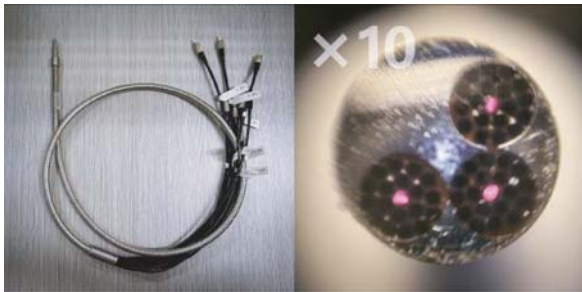
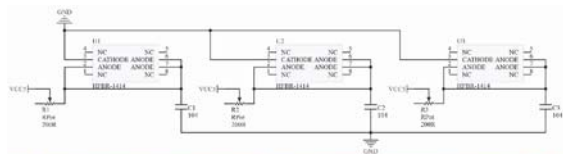


图 3 光纤传感器实物和传感探头端面
Fig. 3 Photo of fiber sensor and probe end face

2.3 系统前置电路设计

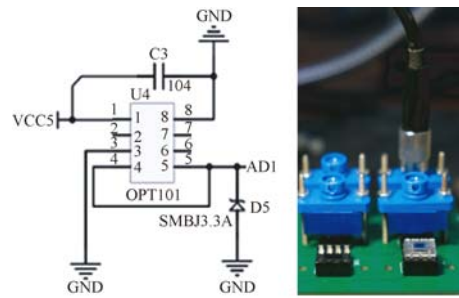
检测系统前置电路主要由电源模块、光源模块、光电转换模块和数据采集模块构成。系统采用 5 V 标准直流电源供电,光源部分采用 3 个独立的 HFBR-1424 光纤发射器作为三路传感基元的入射光源,该光纤发射器的工作波长为 820 nm,具有光耦合效率高、能耗低且工作稳定的特点。光源电路如图 4(a)所示,通过调节精密电位器 R,由光功率计标准三路光源光功率,使三路光源功率保持一致。

作为前置电路的核心部分,光电转换模块的主要功能是将反映叶尖间隙三维参量变化的接收光纤光强信号变选为电压信号。系统的光电转换模块选用 TI 公司的 OPT101 光电转换芯片,该芯片的最佳响应波长为 850 nm,与光源波长相匹配,响应带宽为 14 kHz,能够满足高速运转叶片的测量带宽需求,其输出电压为 0.007 5 ~ 3.7 V,输出电压与接收光功率呈线性关系。由于芯片内部将光电二极管和跨阻抗放大器集成,无需外接信号放大电路,有效避免了因离散设计引起的噪声和寄生电容影响。光电转换芯片的外围电路如图 4(b)所示。



(a) 光纤光源

(a) Optical source



(b) 光电转换芯片

(b) Photodiode

图 4 涡轮叶片三维叶尖间隙光纤检测系统的部分电路和实物图

Fig. 4 Partial circuit and its photo of optical fiber measurement system for 3-D variation of turbine blade tip clearance

系统数据采集模块主要完成传感器六路接收光纤信号和鉴相信号的采集。本文采用 NI-6210 型数据采集卡,该采集卡的分辨率为 16 位,最高采样频率为 250 k/s,系统共占用 7 个通道,每通道的采样频率最高为 35 k/s,能够满足最高 10 000 r/min 转速下的叶尖间隙三维参量测量的带宽需求。按照上述设计实现的检测系统总体构成如图 5 所示。

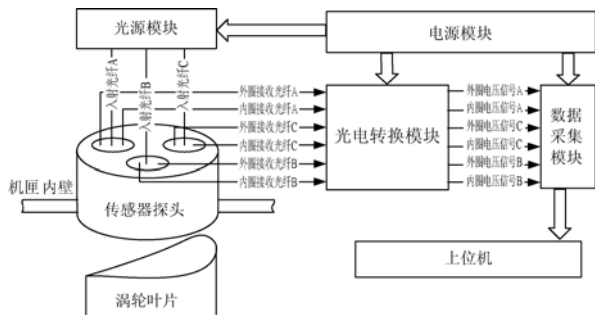


图 5 涡轮叶片三维叶尖间隙光纤检测系统构成示意图
Fig. 5 Framework of measuring system for 3-D variation of turbine blade tip clearance

3 检测系统静态测量实验

3.1 静态标定实验系统构成

为了验证叶尖间隙三维参量检测系统,实现传感器三维参量的解耦,验证检测系统的测量精度,本文搭建了叶尖间隙三维参量光纤传感检测的静态标定实验系统。如图 6 所示,静态标定实验系统主要包括:三维参量静态标定平台、光纤传感探头、信号调理电路、数据采集卡、电源模块和上位机。

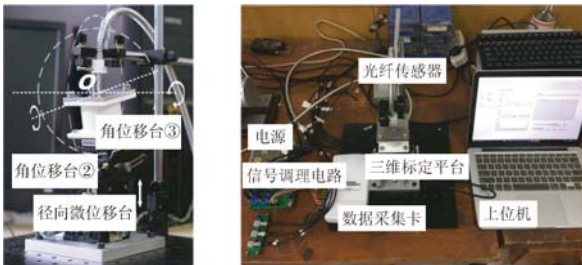


图 6 三维标定平台和静态标定实验系统

Fig. 6 Static calibration platform of 3-D parameters and experiment system of static calibration

为模拟叶片叶尖端面的三维变化,实现传感器输入输出标定,本文设计了满足径向位移、轴向倾角和周向倾角三维参量独立变化的高精度三维参量静态标定平台(图 6)。通过径向微位移台可实现反射表面的径向位移,其位移精度为 $10\ \mu\text{m}$,量程为 $5\ \text{mm}$ 。反射表面的轴向倾角和周向倾角的变化由角位移台②和③实现,角度变化范围为 $\pm 10^\circ$,精度为 0.1° ,两个角位移台的回转中心在 O 点处重合,实现了该点处径向位移、轴向倾角和周向倾角三维参量的独立变化。

3.2 传感器神经网络标定解耦

在传感器静态标定实验中,选定径向位移 z 的量程为 $2\ 000\sim 3\ 500\ \mu\text{m}$,取样间隔为 $100\ \mu\text{m}$,轴向倾角 α 和周向倾角 β 的量程为 $-5^\circ\sim +5^\circ$,取样间隔为 1° 。通过标定实验得到 $16\times 11\times 11$ 个不同位置点的传感器输出结果,构成神经网络训练原始样本,传感器三个基元在不同三维参量位置点的输出值如图 7 所示。

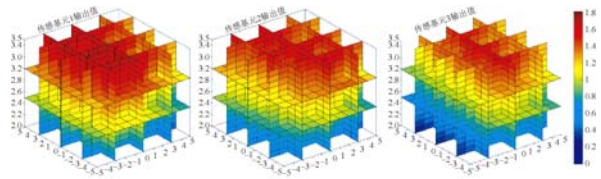


图 7 不同三维参量下各传感基元输出值

Fig. 7 Output value of every sensor unit in different positions

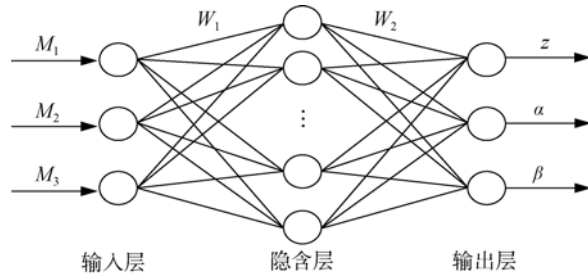


图 8 传感器输入输出网络拓扑结构

Fig. 8 Network topology of inputs and outputs of sensors

通过构建 3 层结构的 BP 神经网络模型来逼近传感器三维输入向量与三维参量输出向量之间的映射关系,网络的拓扑结构如图 8 所示。该网络输入和输出层的单元数均为 3:网络输入为传感器三路输出信号组成的向量 (M_1, M_2, M_3) ,输出层为标定参数所组成的向量 (z, α, β) 。隐含层节点通过多次实验在保证训练精度和降低训练时间的前提下选择为 10 个单元,分别使用 Sigmoid 函数和线性函数作为隐含层和输出层的激活函数。随机选取原始数据 1 936 个标定样本中的 60% 作为训练样本,20% 样本作为验证样本,剩余 20% 作为测试样本。采用收敛速度最快,均方误差最小的 Levenberg-Marquardt 算法对网络进行训练,训练效果如图 9 所示。

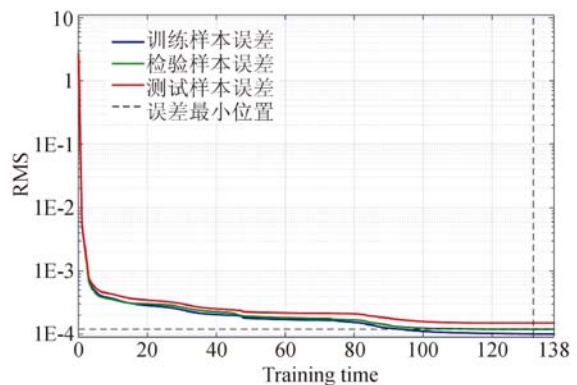


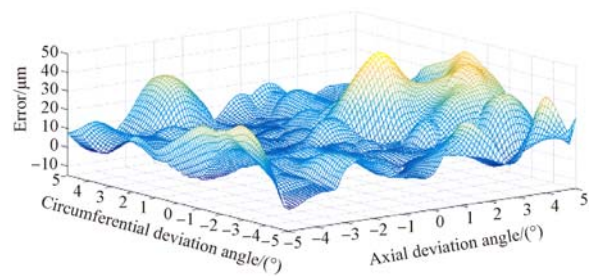
图 9 网络训练误差曲线

Fig. 9 Network training error curve

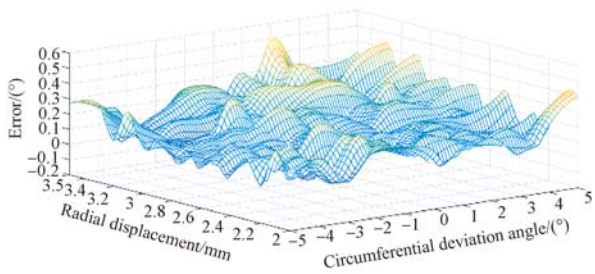
当网络训练 138 次时,网络收敛,最大均方根误差为 1.056×10^{-4} ,拟合结果的相关系数为 99.97%。

3.3 系统静态测量误差

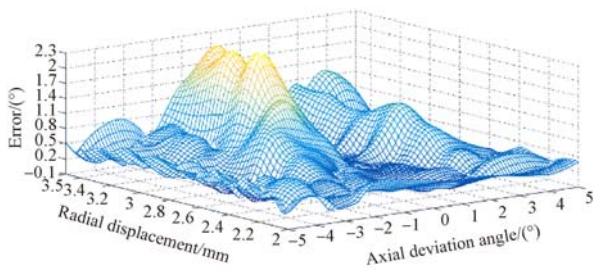
使用新的测试样本对训练所得到的传感器网络模型进行测量误差分析。图 10 给出了传感器测量范围内径向位移、轴向倾角和周向倾角的测量误差分布。通过对测试样本的误差分析,采用 BP 神经网络解耦方法的径向位移测量的最大误差为 $47 \mu\text{m}$,标准差为 $10 \mu\text{m}$;轴向倾角测量的最大误差为 0.49° ,标准差为 0.13° ;周向倾角测量的最大误差为 2.32° ,标准差为 0.36° 。若缩小标定过程中量程范围内的取样间隔,适当增加训练样本数量,可进一步提高系统的检测精度。



(a) 径向间隙误差
(a) Radial clearance error



(b) 轴向倾角误差
(b) Axial angle error



(c) 周向倾角误差
(c) Circumferential angle error
图 10 传感器测量误差分布

Fig. 10 Distribution of sensor measurement errors

在以往使用单一光纤传感器测量叶尖径向间隙时,测量结果会受到叶尖端面其它二维变化的影响,即当叶片端面出现倾角时,测量精度降低。图 11 为在不同叶尖端面周向倾角下,采用单一光纤传感器测量和采用三维传感探头利用网络解耦得到的径向位移测量误差对比。当叶尖端面倾角为 0° 时,采用单一传感器测量径向间隙精度较高,测量误差小于 $26 \mu\text{m}$ 。但当倾角增大时其径向位移测量误差逐渐增大,当倾角为 5° 时测量误差可达 $282 \mu\text{m}$ 。而采用三维传感探头神经网络解耦方法的径向位移测量精度不受叶尖端面倾角变化的维间耦合影响,在不同倾角下其径向间隙的测量误差均保持在 $28 \mu\text{m}$ 以下。

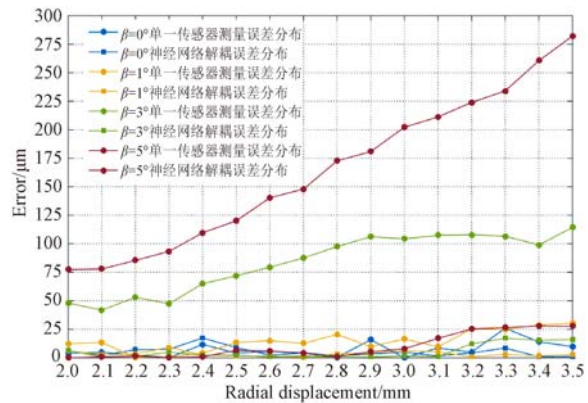


图 11 径向间隙测量误差对比

Fig. 11 Contrast of measurement error of radial clearance

由图 11 可以看出,通过 BP 神经网络不仅能很好地逼近传感器输出值与三维参量之间的高维非线性映射关系,而且能够提高传感器的解耦精度,消除叶尖端面倾角变化对径向间隙测量结果的影响。该方法的径向间隙测量误差与影像测量和微波测量等方法^[16-17]的叶尖径向间隙测量误差相接近,同时实现了后者无法实现的叶尖端面轴向倾角和周向倾角的测量,并消除了光纤传感器在测量叶尖径向间隙时叶尖端面倾角变化引起的测量误差。

4 检测系统动态性能测试

为了验证系统对动态旋转叶片叶尖间隙三维参量的检测能力,采用模拟叶盘转子试验台对检测系统的动态性能进行验证,实验系统如图 12 所示。

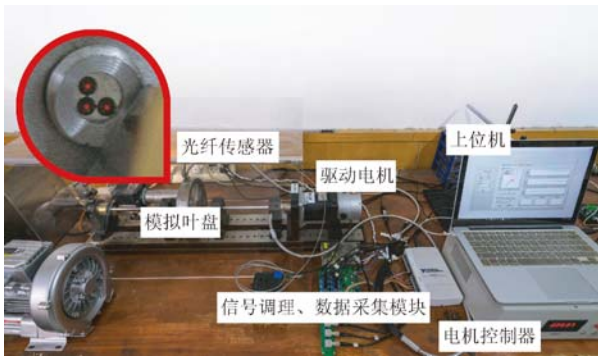


图 12 动态测量实验系统
Fig. 12 Dynamic measurement system

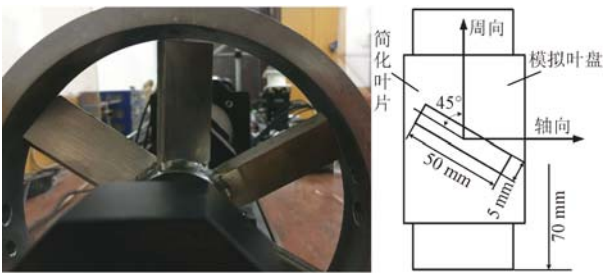
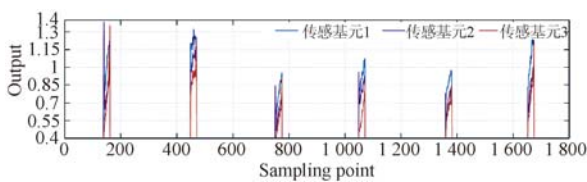


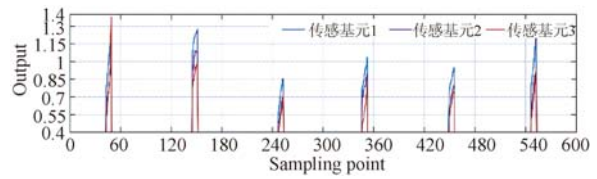
图 13 模拟叶盘和叶尖端面结构示意图
Fig. 13 Schematic of simulative blisk and blade tip surface

实验用模拟叶盘和叶尖端面结构如图 13 所示,叶盘直径为 140 mm,共安装有 6 支叶片,转子两端以滑动轴承支撑。为保证转子系统有较大刚度,将轴承跨度缩小至 140 mm,在实验转速内可有效避免轴承振动对叶尖间隙变化检测结果的影响。模拟叶盘由高速直流调速电机驱动,电机转速为 0~10 000 r/min;光纤传感探头安装于叶盘顶部正上方机匣外壳处,通过调节调整螺纹可改变传感器端面与叶片端面间初始距离。叶盘右侧安装有鉴相传感器,用以将检测信号与叶片旋转周期相匹配。

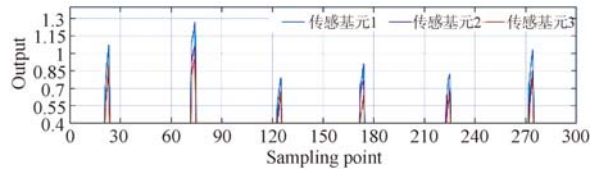
在实验中通过调节转子转速分别测得了 1 000~6 000 r/min 转速内不同转速下各叶片叶尖间隙的三维参量值。图 14 为 1 000,3 000 和 6 000 r/min 3 种不同转速下单个旋转周期内的传感器输出信号和叶尖间隙三维参量的检测结果。



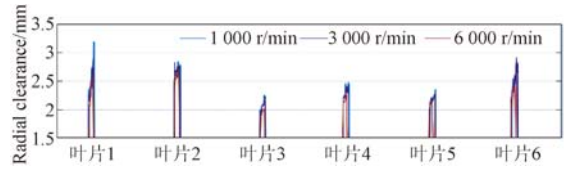
(a)转速为 1 000 r/min 时传感器的输出信号
(a)Output signals of sensors at 1 000 r/min



(b)转速为 3 000 r/min 时传感器的输出信号
(b)Output signals of sensors at 3 000 r/min

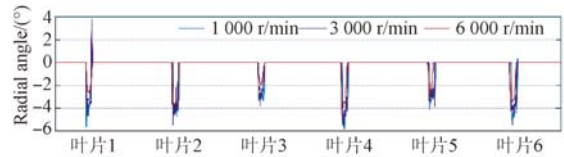


(c)转速为 6 000 r/min 时传感器的输出信号
(c)Output signals of sensors at 6 000 r/min



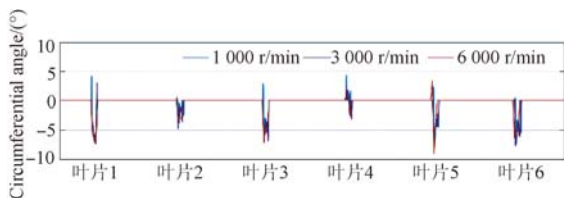
(d)径向间隙测量结果

(d)Measurement results of radial clearance



(e)轴向倾角测量结果

(e)Measurement results of axial angle



(f)周向倾角测量结果

(f)Measurement results of circumferential angle

图 14 传感器输出信号与叶尖间隙三维参量的检测结果
Fig. 14 Output signals of sensors and measurement results of 3-D parameters of blade tip clearance

因模拟叶片叶尖间隙三维参量精确值未知,为评价检测系统的动态测量精度和重复性,这里对各转速下叶片的叶尖间隙三维参量进行了 10 次重复测试实验。取叶片中点处的三维参量值,计算得到各叶片叶尖间隙三维参量的平均值和标准差,采用 A 类不确定度评定方法对检测系统的测量不确定度进行评价^[17],其计算公式为:

$$u(x) = \frac{s(x)}{\sqrt{N}} = \frac{\sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_i^N (x_i - \mu)^2}}{\sqrt{N}}. \quad (4)$$

不同转速下各叶片叶尖间隙三维参量的测量平均值、标准差和不确定度分别如表 1、表 2 和表 3 所示。表中 \bar{z} 表示径向间隙测量值的平均值, σ_z 表示径向间隙测量结果的标准差, u_z 为测量结果的不确定度。 $\bar{\alpha}$ 和 $\bar{\beta}$ 分别表示轴向倾角和周向倾角的

测量平均值, σ_α 和 σ_β 分别表示轴向倾角和周向倾角测量结果的标准差, u_α 和 u_β 分别表示对应的测量结果的不确定度。由 10 次测量数据结果分析可知,检测系统动态测量径向间隙的测量标准差小于 18 μm ,测量不确定度在 2.2 μm 左右;轴向倾角测量标准差小于 0.2°,测量不确定度在 0.02°左右,周向倾角测量标准差小于 0.5°,测量不确定度在 0.06°左右,检测系统具有较高的动态测量精度和重复性。

表 1 叶尖径向间隙测量数据

Tab.1 Measured data of tip radial clearance

转速/(r · min ⁻¹)		叶片 1	叶片 2	叶片 3	叶片 4	叶片 5	叶片 6
1 000	\bar{z}/mm	2.543	2.649	2.050	2.279	2.173	2.733
	$\sigma_z/\mu\text{m}$	7.004	6.391	6.453	4.125	4.522	17.556
	$u_z/\mu\text{m}$	2.215	2.021	2.041	1.305	1.430	5.552
3 000	\bar{z}/mm	2.560	2.700	1.955	2.227	2.125	2.382
	$\sigma_z/\mu\text{m}$	15.430	7.980	3.453	6.749	2.288	7.569
	$u_z/\mu\text{m}$	4.879	2.523	1.092	2.134	0.724	2.394
6 000	\bar{z}/mm	2.394	2.669	1.953	2.220	2.103	2.353
	$\sigma_z/\mu\text{m}$	13.689	3.754	6.235	4.595	3.729	4.483
	$u_z/\mu\text{m}$	4.329	1.187	1.972	1.453	1.179	1.418

表 2 叶尖轴向倾角测量数据

Tab.2 Measured data of tip axial angle

(°)

转速/(r · min ⁻¹)		叶片 1	叶片 2	叶片 3	叶片 4	叶片 5	叶片 6
1 000	$\bar{\alpha}$	-3.217	-3.654	-2.735	-4.817	-2.684	-3.679
	σ_α	0.065	0.085	0.037	0.166	0.040	0.028
	u_α	0.020	0.027	0.012	0.052	0.013	0.009
3 000	$\bar{\alpha}$	-2.448	-3.159	-1.987	-4.217	-1.983	-3.450
	σ_α	0.032	0.053	0.021	0.075	0.055	0.044
	u_α	0.010	0.017	0.007	0.024	0.017	0.014
6 000	$\bar{\alpha}$	-2.522	-3.979	-2.045	-3.789	-2.620	-3.367
	σ_α	0.036	0.038	0.023	0.064	0.052	0.025
	u_α	0.011	0.012	0.007	0.020	0.016	0.008

表 3 叶尖周向倾角测量数据

Tab.3 Measured data of tip circumferential angle

(°)

转速/(r · min ⁻¹)		叶片 1	叶片 2	叶片 3	叶片 4	叶片 5	叶片 6
1 000	$\bar{\beta}$	-7.141	-2.684	-4.258	0.301	-3.342	-4.399
	σ_β	0.100	0.086	0.141	0.184	0.493	0.104
	u_β	0.032	0.027	0.045	0.058	0.156	0.033
3 000	$\bar{\beta}$	-7.667	-2.976	-4.901	-0.503	-4.166	-4.696
	σ_β	0.058	0.144	0.106	0.244	0.317	0.103
	u_β	0.018	0.046	0.034	0.077	0.100	0.033
6 000	$\bar{\beta}$	-7.274	-3.074	-4.518	-0.578	-4.862	-4.632
	σ_β	0.082	0.146	0.110	0.313	0.466	0.136
	u_β	0.026	0.046	0.035	0.099	0.147	0.043

5 结 论

针对航空发动机叶片叶尖间隙的三维变化特点,本文设计开发了由三组双圈同轴式光纤传感基元组成的光纤传感探头以及后续调理电路,利用 BP 神经网络解耦实现了叶尖间隙三维参量即径向间隙、轴向偏转倾角和周向滑移倾角的测量,消除了传统光纤式叶尖间隙检测方法中维间耦合对测量结果的影响。通过静态、动态测量实验

验证了检测系统的可行性。实验结果表明,本文设计的叶尖间隙三维参量光纤传感检测系统对叶尖端面径向间隙进行静态测量的最大误差为 $47\ \mu\text{m}$,标准差为 $10\ \mu\text{m}$;轴向和周向倾角静态测量的最大误差分别为 0.49° 和 2.32° ,标准差分别为 0.13° 和 0.36° ;径向间隙动态测量的标准差小于 $18\ \mu\text{m}$,轴向和周向倾角动态测量的标准差小 0.2° 和 0.5° 。该系统能够稳定、准确地检测叶片叶尖间隙三维参量的实时变化。

参考文献:

- [1] 陶春虎,钟培道,王仁智,等. 航空发动机转动部件的失效与预防 [M]. 北京:国防工业出版社,2000. TAO CH H, ZHONG P D, WANG R ZH, *et al.*. *Failure Analysis and Prevention for Rotor in Aero-engine* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2000. (in Chinese)
- [2] 陈玉涛,朱目成,童思容,等. 航空发动机叶尖间隙影像测量系统及其标定 [J]. 应用光学,2013,34(3): 473-478. CHEN Y T, ZHU M CH, TONG S R, *et al.*. Image measuring system and its calibration of aero engine tip clearance [J]. *Journal of Applied Optics*, 2013,34(3): 473-478. (in Chinese)
- [3] 王凯,段发阶,郭浩天,等. 基于大频差双频激光的发动机叶尖间隙测量技术 [J]. 光电子·激光,2013,24(10): 1984-1988. WANG K, DUAN F J, GUO H T, *et al.*. Blade tip clearance measurement using dual frequency laser with large frequency difference [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2013,24(10): 1984-1988. (in Chinese)
- [4] RZADKOWSKI R, ROKICKI E, PIECHOWSKI L, *et al.*. Analysis of middle bearing failure in rotor jet engine using tip-timing and tip-clearance techniques [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2016,76: 213-227.
- [5] 张小栋,谢思莹,牛杭,等. 光纤动态检测技术的研究与进展 [J]. 振动、测试与诊断,2015,35(3): 409-416. ZHANG X D, XIE S Y, NIU H, *et al.*. Research on dynamic measurement technology of fiber optic sensors and their development [J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2015,35(3): 409-416. (in Chinese)
- [6] 张小栋,郭琦,牛杭. 水膜厚度光纤检测系统 [J]. 光学精密工程,2015,23(10): 2747-2754. ZHANG X D, GUO Q, NIU H. Optical fiber measurement system for thickness of water film [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015,23(10): 2747-2754. (in Chinese)
- [7] 贾丙辉,冯勇,贾文华. 双圈同轴式光纤传感器在叶尖间隙测量中的应用 [J]. 激光与光电子学进展,2015,52(10):100603. JIA B H, FENG Y, JIA W H. Application of optical sensor with two-circle reflective coaxial fiber in tip clearance measurement [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015,52(10): 100603. (in Chinese)
- [8] 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*, 2017,17(10): 1-15.
- [9] 马玉真,段发阶,王仲,等. 光纤传感器在叶尖间隙测量中的应用 [J]. 传感技术学报,2007,20(12): 2724-2727. MA Y ZH, DUAN F J, WANG ZH, *et al.*. Application of optical fiber sensor in tip clearance measurement [J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2007,20(12): 2724-2727. (in Chinese)
- [10] 毕超,房建国,宋婷婷,等. 叶片进排气边光学测量系统的实现 [J]. 光学精密工程,2017,25(10): 2744-2751. BI CH, FANG J G, SONG T T, *et al.*. Establish of optical measuring system for blade edges [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017,25(10): 2744-2751. (in Chinese)
- [11] FEI T, ZHANG X D, XIE S Y. Research on variation mechanism of three-dimensional blade tip clearance of aero-engine [C]. *13th International*

- Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence (URAI)*, Xi'an, P. R. China: IEEE, 2016: 1-6.
- [12] XIE S Y, ZHANG X D. Design and modeling of three-dimensional tip-clearance optical probe based on two-circle reflective coaxial fiber bundle [C]. 2016 *IEEE International Conference on Sensors*, Orlando, USA: IEEE, 2016: 1-3.
- [13] 谢思莹, 张小栋. 双圈同轴光纤束传感器三维空间输出特性研究 [J]. *振动、测试与诊断*, 2017, 37(1): 174-180, 207.
XIE S Y, ZHANG X D. Three-dimensional output behavior of displacement sensor of two-circle reflective coaxial fiber bundle [J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2017, 37(1): 174-180, 207. (in Chinese)
- [14] 徐菲. 用于检测三维力的柔性触觉传感器结构及解耦方法研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2011.
XU F. *Structural Design and Decoupling Research of a Novel Three-dimensional Force Flexible Tactile Sensor* [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2011. (in Chinese)
- [15] 李映君, 韩彬彬, 王桂从, 等. 基于径向基函数神经网络的压电式六维力传感器解耦算法 [J]. *光学精密工程*, 2017, 25(5): 1266-1271.
LI Y J, HAN B B, WANG G C, *et al.*. Decoupling algorithms for piezoelectric six-dimensional force sensor based on RBF neural network [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(5): 1266-1271. (in Chinese)
- [16] 吴娅辉, 谢兴娟, 孙浩琳. 微波间隙测量系统研究 [J]. *计测技术*, 2016, 36(6): 37-39, 42.
WU Y H, XIE X J, SUN H L. research on measurement system for blade tip clearance based on microwave [J]. *Metrology & Measurement Technology*, 2016, 36(6): 37-39, 42. (in Chinese)
- [17] 郑臣, 朱目成. 影像测量技术在叶尖间隙测量中的应用 [J]. *应用光学*, 2014, 35(5): 835-840.
ZHEN CH, ZHU M CH. Application of image measuring technology in blade tip clearance measurement [J]. *Journal of Applied Optics*, 2014, 35(5): 835-840. (in Chinese)

作者简介:



张小栋(1967—),男,陕西周至人,教授,博士生导师,1989年、1992年、1996年于西安交通大学分别获得学士、硕士、博士学位,主要从事智能检测诊断与控制技术、智能机器人技术等方面的研究。E-mail: acmt@mail.xjtu.edu.cn



吴冰(1991—),男,新疆阿勒泰人,硕士研究生,2015年于西北农林科技大学获得学士学位,主要从事光纤动态检测方面的研究。E-mail: dr3ven@163.com