

一种抗端面倾斜度干扰的多光纤束双圈 同轴型叶尖间隙传感器

江 盟 赵福豪

(海军工程大学动力工程学院 武汉 430033)

摘 要: 针对光纤式叶尖间隙传感器测量精度受端面倾斜度影响较大的问题,本研究在双圈同轴型光纤传感器的结构基础上设计了一种改进型、抗端面倾斜度干扰的多光纤束光纤传感器。通过将双圈同轴型光纤束探头的内圈 6 根接收光纤分为两路对称分布的接收光纤束,在传统双圈同轴型光纤传感器测量内外圈接收光强之比 R_1 作为单一输出特征参量的基础上,新增了内圈双路光强比 R_2 作为另一独立的输出特征参量。采用光学 Zemax 仿真计算验证了改进型两个输出特征参量(R_1 , R_2)与端面倾角 β 、叶尖间隙 z 之间的关联性,并通过构建双参数解耦模型实现了根据给定输出特征参量同步反演叶尖间隙 z 与倾角 β 。结果表明:当 β 在 $0^\circ \sim 10^\circ$ 范围内变化时,基于三光纤束传感器输出特征参量解耦得到的叶尖间隙计算值在 1.0~2.5 mm 范围内误差小于 3%,证明了改进型光纤传感器在复杂工况下的可靠性和测量精度。

关键词: 叶尖间隙;端面倾斜度;光纤传感器;多光纤束;双参数解耦

中图分类号: TN06 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.40

A tilt-insensitive dual-ring coaxial multi-fiber bundle based blade tip clearance sensor

Jiang Meng Zhao Fuhao

(College of Power Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: To address the significant impact of end-face tilt on the measurement accuracy of fiber-optic blade tip clearance sensors, this study presents an enhanced multi-fiber bundle sensor with improved tilt insensitivity, based on the structure of a dual-ring coaxial fiber-optic sensor. The key innovation involves dividing the six receiving fibers in the inner ring of the dual-ring coaxial probe into two symmetrically distributed receiving fiber bundles. This modification introduces a second independent output characteristic parameter, the ratio of light intensities R_2 between the two inner-ring bundles, supplementing the traditional single output parameter R_1 , which is the ratio of light intensities between the outer and inner rings. Optical simulations with the software Zemax were conducted to verify the relationships between the two enhanced output characteristic parameters (R_1 , R_2), the end-face tilt angle β , and the blade tip clearance z . A dual-parameter decoupling model was subsequently developed to simultaneously invert both the clearance z and tilt angle β based on the measured output parameters. The results demonstrate that when β varies within $0^\circ \sim 10^\circ$, the calculated blade tip clearance derived from decoupling the sensor's output parameters exhibits an error of less than 3% over the measurement range of 1.0~2.5 mm, confirming the reliability and measurement accuracy of the enhanced fiber-optic sensor under complex operating conditions.

Keywords: tip clearance; end-face tilt; optical-fiber sensor; multi-fiber bundle; dual-parameter decoupling

0 引 言

转子运行状态对于燃气涡轮、汽轮机等大型旋转机械的运行安全性与经济性具有重要的影响^[1]。转子运行过

程中叶片切向振动频率、幅值和叶尖间隙变化等参数可用作转子运行状态诊断的依据^[2-3]。叶尖间隙定义为转子叶片尖端与压气机机匣之间的轴向距离,该参数作为影响压气机气动性能和转子动力学稳定性的关键参数,其大小直

接影响压气机的效率、喘振裕度和可靠性^[4]。根据现代高性能发动机转子叶尖间隙的主动控制需求,叶尖间隙测量系统的精度必须达到其变化范围的 1%,即当叶尖间隙在 1~3 mm 范围内波动时传感器的测量精度至少要达到 10~30 μm ^[5]。因此,开发叶尖间隙高精度在线测量技术能够有效推动转子运行状态监测技术的发展,也是进行大型旋转机械转子健康管理和故障诊断的关键组成部分^[6]。

目前,应用较为广泛的叶尖间隙测量方法包括放电探针法、电涡流法、微波测量法、电容测量法和光纤传感器等^[7-8]。其中,光纤传感器因具有结构简单、尺寸小、质量轻、抗电磁高温干扰等优点在大型旋转机械转子叶尖间隙测量领域被广泛研究^[9]。为应对复杂恶劣的大型旋转机械内部工作环境,满足精确测量叶尖间隙实时变化的要求,光纤传感器在大型旋转机械转子叶片叶尖间隙测量领域的应用最主要的 3 个挑战是抗干扰性、高灵敏度和低检测限^[10]。抗干扰性要求光纤传感器在转子叶片的复杂环境中必须排除光源波动、传输损耗、叶片表面反射率变化及烟雾等环境因素的干扰,建立测量信号与叶尖间隙的可靠关联^[11]。针对光纤式叶尖间隙传感器的抗干扰性问题, García 等^[12-13]提出基于一种双圈同轴型光纤传感器实现叶尖间隙测量方法,通过建立双圈探测器接收信号电压之比与叶尖间隙的关联,有效降低了光源波动和叶片表面反射率等干扰因素的影响,并将研制的传感器成功应用于发动机试车台检测。贾丙辉团队^[14]采用双圈同轴型光纤传感器进行了叶尖间隙静态测量实验及模拟烟雾干扰实验,研究表明探头安装角度、烟雾环境对 1~3 mm 范围内接收光强比对叶尖间隙变化的响应灵敏度具有显著影响。针对一维叶尖间隙信号故障信息不完整问题,张小栋团队^[15]进一步提出了航空发动机三维叶尖间隙概念,进一步拓展了转子运行状态健康监测与故障诊断的信号载体。杨盛德等^[16]基于数值计算研究发现随着反射面倾角的增大,耦合入双圈同轴型光纤传感器内、外圈的反射光强比值出现差异,进而引起较大的叶尖间隙测量误差。产生这一误差的主要原因是基于传统型光纤束探头结构无法建立叶尖间隙三维光学输出特性与叶尖间隙的可靠关联,轴向倾角与周向倾角的变化均会造成接收光强之比的变化,对接收光强之比与叶尖间隙的关联性具有显著影响^[17]。当周向倾角在 0°~5° 范围内变化时,双圈同轴型光纤传感器测量 2.0~3.5 mm 范围内的叶尖间隙,测量误差最大达到 282 μm 。针对上述问题,张小栋等^[15]针对涡轮叶片设计了一种采用三路双圈同轴型光纤束探头的三维叶尖间隙光纤检测系统,并通过 BP 神经网络解耦算法实现了对径向间隙、轴向倾角和周向倾角三维参量的解耦。目前三维叶尖间隙光纤检测系统均存在光纤检测系统结构复杂、光学标定难度大等问题,因此亟需开发一种结构简单、可靠性高的改进型光纤传感器及数据解耦方法,保证转子叶片叶尖间隙在端面倾斜度变化时仍然具有较高的可靠性和测量精度。

围绕上述目标,本研究基于传统的双圈同轴型光纤传感器结构提出了一种抗端面倾斜度干扰的多光纤束改进型光纤传感器。通过对内圈接收光纤束布局的优化设计和信号处理,改进型光纤传感器输出特性与叶尖间隙、端面倾斜度均具有可靠关联。在此基础上,结合双参数解耦算法实现叶尖间隙与端面倾斜度变化二维参量的同步反演,从而降低端面倾斜度变化对光纤叶尖间隙传感器测量精度的影响。

1 光纤式叶尖间隙传感器工作原理

1.1 光纤式叶尖间隙传感器系统组成

传统双圈同轴型光纤传感器通过实时监测反射光强信号实现对叶尖间隙的测量,其结构组成主要包括:激光器、光纤、光电探测器(photoelectric detector, PD)及示波器等,如图 1 所示。

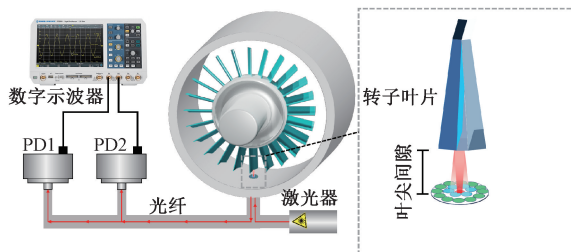


图 1 双圈同轴型光纤传感器叶尖间隙测量系统

Fig. 1 The measurement system of a dual-ring coaxial optic-fiber tip-clearance sensor

1.2 光纤式叶尖间隙传感器测量原理

假设入射光纤纤端光强分布为高斯光束和均匀光束的混合,则其场强分布表达式为:

$$\varphi(r, z) = \frac{K_0 I_0}{\pi R^2(z)} \cdot \exp\left[-\frac{r^2}{R^2(z)}\right] \quad (1)$$

式中: K_0 为光波在入射光纤中的损耗; I_0 为光源耦合到光纤的光强,单位为 cd; z 为光纤端面与反射面垂直距离,单位为 μm ; r 为光纤端面光场中某一点到入射光锥的半径,单位为 μm ; $R(z)$ 为光场分布等效半径^[17],单位为 μm 。根据光纤纤端场强分布,第 i 支接收光纤($i=1, 2, \dots, 18$)端面的接收光强为:

$$I_i(r, z) = \rho \iint_{S_i} K \varphi(r, z) \exp(-\sum_i \eta_i r_i) ds \quad (2)$$

式中: ρ 为镜面反射率; K 为接收光纤功率损耗系数; $\exp(-\sum_i \eta_i r_i)$ 为接收光纤弯曲附加损耗; S_i 为第 i 支虚像面的光斑覆盖有效面积,通常根据光纤端面面积进行确定。假设光纤虚像面光强均匀分布,则式(2)简化为:

$$I_i(r, z) = \rho K S_i \varphi_{si}(r, z) \exp(-\sum_i \eta_i r_i) \quad (3)$$

式中: φ_{si} 为第 i 支光纤虚像面接收平均光强。

双圈同轴型光纤传感器的输出信号为外圈光纤接收光强总和与内圈之比。在接收光纤端面区域对光强分布函数

进行积分,可得内、外圈接收光纤接收光强总和分别为:

$$I_{r1} = \sum_{i=1}^6 \rho K \exp(-\sum_i \eta_i r_i) S_i \varphi_{si}(r, z) \quad (4)$$

$$I_{r2} = \sum_{i=7}^{18} \rho K \exp(-\sum_i \eta_i r_i) S_i \varphi_{si}(r, z) \quad (5)$$

假设每支光纤输出光线在镜面的反射率 ρ 、光纤功率损耗系数 K 、光斑覆盖有效面积 S_i 和弯曲损耗 $\exp(-\sum_i \eta_i r_i)$ 相等,将外圈接收光纤接收光强之和与内圈接收光强之和进行比相除,可得双圈同轴光纤传感器的输出特性调制函数:

$$R_1 = \frac{I_{r2}}{I_{r1}} = \frac{\sum_{i=7}^{18} \varphi_{si}(r, z)}{\sum_{i=1}^6 \varphi_{si}(r, z)} \quad (6)$$

根据上述理论可知,双圈同轴型叶尖间隙光纤传感器的输出特性主要由被测距离 z 和各支接收光纤虚像面光斑有效覆盖面积内的平均场强 $\varphi_{si}(r, z)$ 决定。根据场强分布计算公式, $\varphi_{si}(r, z)$ 是由叶尖间隙三维几何参数(z, α, β)共同调制的变量,其中 α, β 分别为叶尖表面轴向夹角与周向夹角。传统测量方法在固定的叶尖表面三维条件下标定输出信号 R_1 与叶尖间隙 z 的关系,基于标定的经验关系,即可将实际测量的输出信号反演为叶尖间隙实时值。

假设压气机在运行过程中,叶尖表面同时呈现径向间隙 z 与周向夹角 β 二维空间变化特征,则光线反射路径相应产生一定的偏移并改变接受光纤虚像面的平均场强和光斑有效覆盖面积,如图 2 所示。

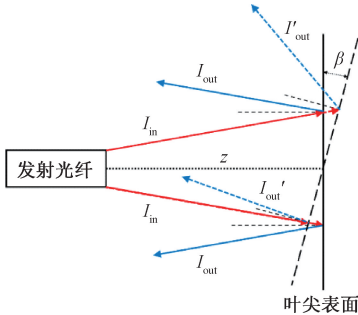


图 2 光纤式叶尖间隙传感器的二维测量平面

Fig. 2 Two-dimensional measurement plane of the optic-fiber tip-clearance sensor

类似地,接收光纤的端面倾斜角度的存在同样会使双圈同轴型光纤传感器的接收光强分布出现显著偏差,导致上述标定的经验关系失效,这是传统双圈同轴传感器测量误差的主要来源之一^[10]。

1.3 改进型多光纤束传感器

1) 光纤束探头结构

根据双圈同轴型光纤传感器输出特性与端面倾斜度之间的关联,本研究基于双圈同轴型光纤传感器系统结构,提出一种改进型多光纤束光纤传感器。该传感器光纤束探头布局如图 3 所示。入射光线、内圈与外圈接收光纤为同轴

型排列;其中,内圈的 6 根接收光纤对称分为两路。

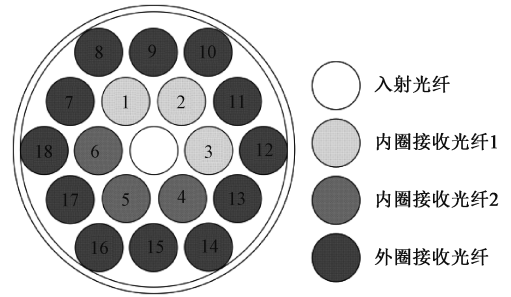


图 3 传感器光纤束探头

Fig. 3 The optic-fiber bundle probe of the sensor

与内外圈接收光强总和之比 R_1 类似的,将内圈两路光强之比 R_2 的定义式为内圈第 1 路接收光纤光强总和 I_{r11} 与第 2 路的总和 I_{r12} 之比,表达式为:

$$R_2 = \frac{I_{r11}}{I_{r12}} = \frac{\sum_{i=1}^3 \varphi_{si}(r, z)}{\sum_{i=4}^6 \varphi_{si}(r, z)} \quad (7)$$

根据式(7)可知, R_2 同样是叶尖表面二维参量调制的变量。由于内圈两路光纤不属于同轴分布,内圈两路光强之比 R_2 与内外圈接收光强之比 R_1 相互独立,进一步拓展了光纤传感器获取的叶尖表面三维参量变化信息。

2) 双参数解耦方法

在此基础上,本研究提出采用双参数解耦算法实现根据两个输出特征参量(R_1, R_2)解算叶尖间隙二维变化参量(z, β),同时利用 R_1 和 R_2 所包含的关于 z 和 β 的互补信息,通过数学优化自动补偿倾斜干扰。双参数解耦算法的流程为:

(1) 构建联合数学模型。基于理论计算或者实验测试得到不同二维参量(z, β)下的输出特征参量(R_1, R_2)数据样本,建立以叶尖间隙 z 和端面倾斜度 β 为自变量、接收光强之比 R_1 和 R_2 为因变量的双参数联合数学模型:

$$\begin{cases} R_1 = f(z, \beta) \\ R_2 = g(z, \beta) \end{cases} \quad (8)$$

式中: f 和 g 分别为使用 Scattered Interpolant 创建的 R_1 (外圈/内圈光强比)和 R_2 (内圈双路光强比)的二元插值函数。本研究采用光学仿真软件 Zemax 实现对改进型光纤传感器输出特性的模拟计算,并获取构建上述联合数据模型所需的数据样本,具体建模和计算方法在第 2 节介绍。

(2) 采用有约束非线性优化实现参数反演。在构建联合数学模型的基础上,根据实际测量的叶尖表面二维参数范围进行如下约束:

$$\begin{aligned} & \min_{\beta, z} [(f(z, \beta) - R_1^{\text{means}})^2 + (g(z, \beta) - R_2^{\text{means}})^2] \\ & \text{s. t. } \begin{cases} 0^\circ \leq \beta \leq 15^\circ \\ 1.0 \text{ mm} \leq z \leq 2.4 \text{ mm} \end{cases} \end{aligned} \quad (9)$$

式中: R_1^{means} 和 R_2^{means} 为光纤传感器实际测量值。其中,根

据压机转子叶片叶尖表面二维参量常见变化范围限制 z 与 β 取值范围。选用序列二次规划法 (sequential quadratic programming, SQP) 算法进行优化, 选取约束范围的中间值作为初始值, 最大迭代次数为 1 000, 收敛容差为 10^{-8} 。

(3) 根据实际测量的输出参量代入联合数学模型, 并在上述条件约束下, 求解非线性方程组式 (8), 得到叶尖二维参量 (z, β) 最优解组合。

2 Zemax 仿真建模与仿真计算

Ansys Zemax 综合光学设计软件是一款专业的光学、照明和激光系统设计工具, 可进行结构、热、光能的仿真、优化和公差分析, 广泛应用于照明、成像系统、激光系统以及漫射光的设计中。本研究通过 Zemax 光学仿真设计软件建立双圈同轴型光纤传感器的几何光学模型, 模型包含入射光纤、内圈接收光纤、外圈接收光纤、光纤发射的入射光线、叶尖反射的反射光线, 如图 4 所示。

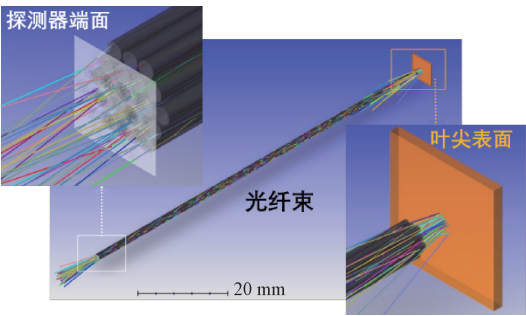


图 4 光纤传感器的光学模型

Fig. 4 The optical model of the optic-fiber sensor

光源设置为高斯分布光束, 波长 λ 为 820 nm, 功率设定为参考值 1 W。在假设叶片表面粗糙度均匀且恒定的条件下, 光纤传感器各支接收光纤光强在反射过程中的损耗系数相等, 不影响输出信号 R_1 与 R_2 的大小; 另一方面, 根据现有研究, 叶片表面粗糙度增加导致的漫反射现象一定程度上可能会造成光纤式叶尖间隙传感器零点漂移, 但不会改变输出信号与叶尖表面三维参量的关联性及其总体趋势, 因此本研究将反射面模型设置为镜面反射以简化模型。探测器设置为非相干辐照度探测器, 记录接收端面的光强空间分布和总功率。

双圈同轴型光纤传感器由内圈纤芯、外圈纤芯和共轴包层构成, 其几何布局基于同轴嵌套设计, 采用非序列光线追迹模式构建模型, 分层圆柱体建模, 通过嵌套圆柱体定义内圈纤芯、外圈纤芯及包层, 设置各层折射率、直径和轴向长度^[17]。光纤模型的具体参数如表 1 所示。

图 5 为端面平行 ($\beta=0^\circ$)、叶尖间隙 z 为 1.0 mm 条件下的传感器接收光纤非相干辐照度 (incoherent irradiance) 分布情况。仿真计算结果直观显示了对应工况下反射光斑在接收端面的非相干辐照度二维分布情况, 并提供了对应

表 1 光纤模型参数

Table 1 The parameters of the optic-fiber model

项目	材料	折射率	半径/ μm	数值孔径
入射光纤纤芯	BAF2	1.474	100	0.217
入射光纤包层	F_SILICA	1.458	150	0.217
接收光纤纤芯	BAF2	1.474	100	0.344
接收光纤包层	CAF2	1.434	150	0.344

像素内接收光强大小, 为光纤传感器输出特性数值分析提供了基础。

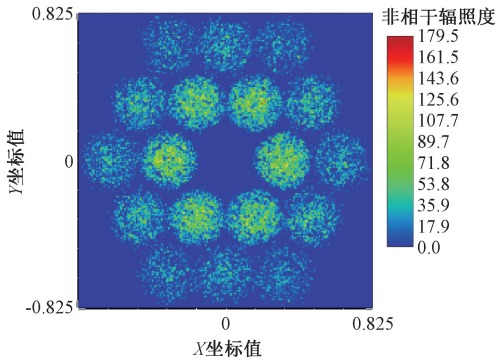


图 5 传感器光学输出特性

Fig. 5 The output optical characteristics of the sensor

3 改进型光纤传感器输出特性

3.1 不同端面倾斜度下传感器的输出特性

利用 Zemax 进行仿真获得的不同端面倾斜度下传感器输出特性的非相干辐照度分布图像 (以 $z=2.0$ mm 为例), 如图 6 所示。

根据计算结果, 在叶尖间隙 z 取 1.0~2.4 mm 时, 非相干辐照度探测器图像的变化均呈现辐射中心定向偏移趋势。随着反射面倾角增大, 耦合入内、外圈各根接收光纤的光强出现了差异, 进而引起传感器输出特性的变化。在叶尖间隙 z 为 2.0 mm 时, 随着端面倾斜度 β 从 0° 增加至 10° ; 内外圈接收光纤接收的光强辐照度均由均匀向不均匀发展, 其辐射中心从图像中心, 逐渐向 Y 轴正方向偏移。

3.2 传感器输出信号与叶尖间隙的关联性

基于上述传感器模型与计算方法, 本研究获得了叶尖间隙 1.0~2.4 mm、端面倾斜度 $0^\circ\sim10^\circ$ 时改进型光纤传感器输出特征参数 R_1 和 R_2 与叶尖间隙 z 、端面倾斜度 β 的关系。根据计算结果可知, 在约束的二维参量 (z, β) 范围内, R_1 和 R_2 与 z, β 均具有明显的单值关联特征, 如图 7 所示。另一方面, 相比另一输出量 R_1, R_2 对同一范围内二维参量变化的响应更为显著, 尤其是对端面倾斜度 β 的变化响应幅度约比 R_1 大一个量级。

由此可知, 改进型传感器引入的输出信号 R_2 能够更有效地区分二维参量的变化, 为进一步提升叶尖间隙测量

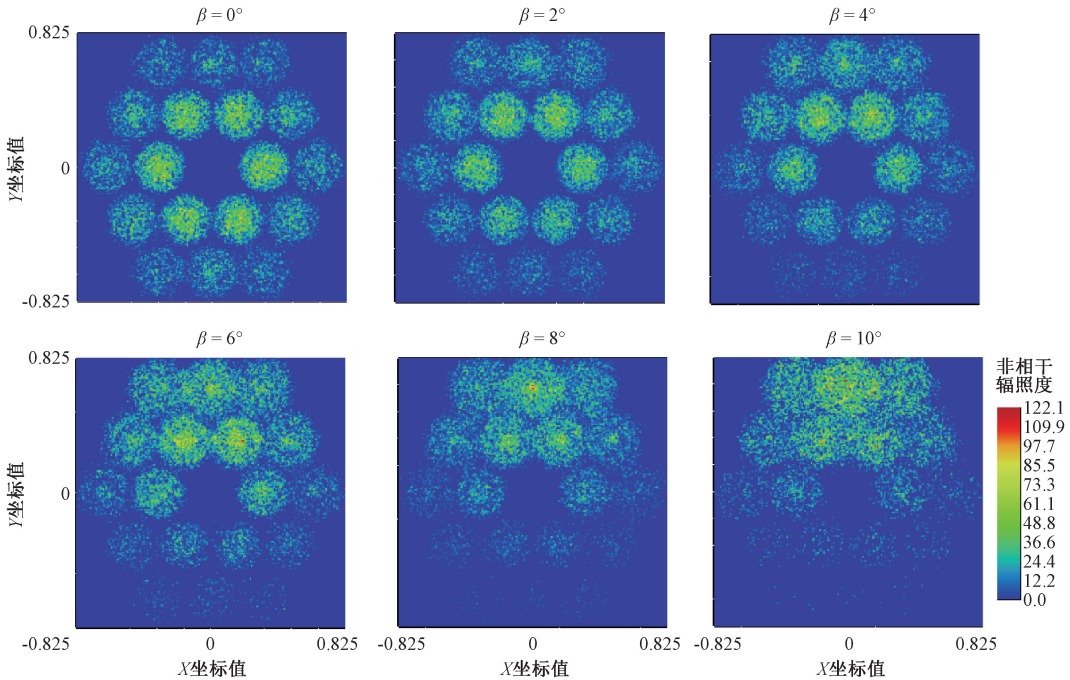
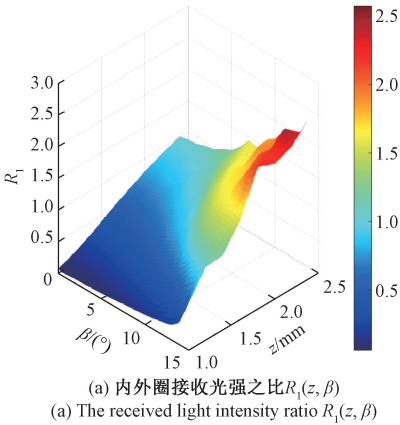
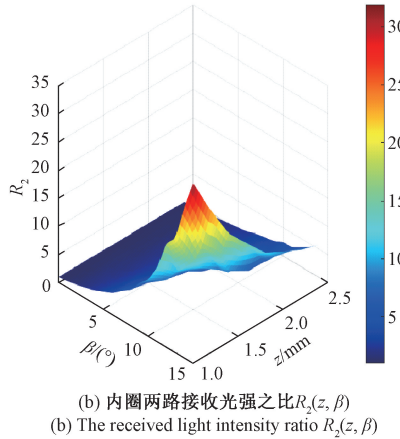


图 6 不同端面倾斜度下传感器输出的非相干辐照度分布图像

Fig. 6 The output non-coherent irradiance distribution images of the sensor under different tilt angles



(a) 内外圈接收光强之比 $R_1(z, \beta)$
(a) The received light intensity ratio $R_1(z, \beta)$



(b) 内圈两路接收光强之比 $R_2(z, \beta)$
(b) The received light intensity ratio $R_2(z, \beta)$

图 7 输出特性参数 R_1, R_2 与参数 (z, β) 的关系

Fig. 7 The relationship between the output parameters (R_1, R_2) with parameters (z, β)

精度奠定了良好的基础。

1) 内外圈接收光强之比与叶尖间隙的关联

不同端面倾斜度 β 下, 根据光强分布计算获取的光纤传感器的输出特征参量 R_1 随叶尖间隙 z 变化的仿真曲线及其拟合关系如图 8 所示。

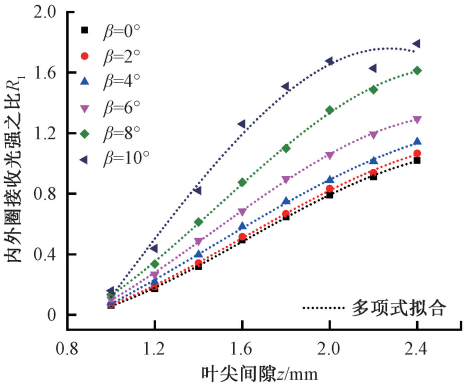


图 8 内外圈接收光强之比 R_1 与叶尖间隙 z 的关系
Fig. 8 The relationship between the received light intensity ratio R_1 and tip clearance z

在同一端面倾斜度下, 双圈同轴型光纤传感器输出特性随压气机叶尖间隙单值递增变化; 随着端面倾斜度从 0° 增加至 10° , R_1 随叶尖间隙 z 变化的幅度逐渐增大。不同端面倾斜度 β 下, 叶尖间隙 z 与输出特征参量 R_1 的关联如表 2 所示, 其中 R^2 为相关系数。显然, 端面倾斜度 β 的变化会导致 R_1 与 z 的关系曲线发生明显的非线性漂移, 且这

种漂移的幅度随 z 的增大而加剧。这表明在存在端面倾斜的实际工况下,若仍采用基于 β 为 0° 假设的单参数 R_1 - z 标定函数作为测量经验公式,将会引入较大的测量误差。

表 2 接收光强之比 R_1 与叶尖间隙 z 的数值关系

Table 2 The mathematical relationship between the received light intensity ratio R_1 and tip clearance z

序号	端面倾斜度	输出特性趋势线	R^2
1	0°	$R_1 = -0.240z^3 + 1.165z^2 - 1.084z + 0.216$	0.999 7
2	2°	$R_1 = -0.213z^3 + 1.030z^2 - 0.844z + 0.092$	0.999 3
3	4°	$R_1 = -0.156z^3 + 0.691z^2 - 0.155z - 0.305$	0.999 2
4	6°	$R_1 = -0.284z^3 + 1.253z^2 - 0.804z - 0.068$	0.999 6
5	8°	$R_1 = -0.399z^3 + 1.779z^2 - 1.339z + 0.085$	0.999 3
6	10°	$R_1 = -0.402z^3 + 1.214z^2 + 0.706z - 1.400$	0.987 4

2)内圈两路接收光强之比与叶尖间隙的关联

基于多光纤束双圈同轴型光纤传感器增加的另一输出特征参量 R_2 与端面倾斜度、叶尖间隙之间的关系如图 9 所示。对于任意固定的叶尖间隙 z ,内圈双路光强比 R_2 与端面倾斜度 β 均存在强正相关性。另一方面,叶尖间隙 z 的大小会影响 R_2 与 β 的关系曲线特征。由此可知,输出特征参量 R_2 与叶尖间隙二维参量变化具有显著和规律的关联,可以作为相对 R_1 独立的输出特征值参与叶尖间隙二维参量(z, β)的解调。

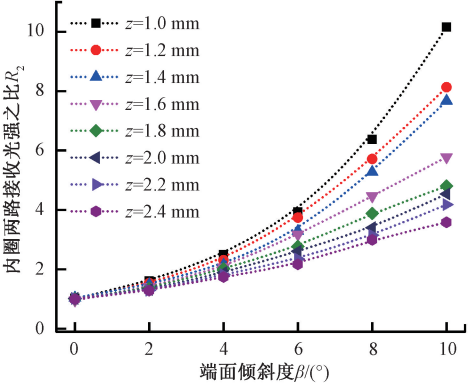


图 9 不同端面倾斜度下传感器的输出参数 R_2

Fig. 9 The output parameter R_2 of the sensor under different tilt angles

3.3 传统型与改进型光纤传感器测量精度的对比

1)传统光纤传感器测量压气机叶尖间隙

传统双圈同轴型光纤传感器在测量压气机叶尖间隙

时,端面倾斜度变化对基于双圈同轴型光纤传感器测量叶尖间隙的误差如图 10 所示。

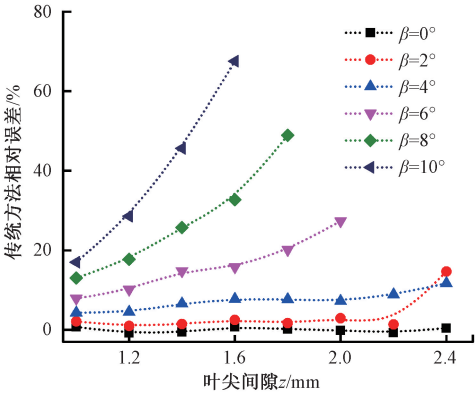


图 10 端面倾斜度对传统传感器测量精度的影响

Fig. 10 The influence of the tilt angle on measuring tip clearance with a traditional sensor

当 β 为 0° 时,叶尖间隙测量误差在 $\pm 0.5\%$ 范围内变化;而当 β 增加时,测量误差随叶尖间隙增大而单值增大;当 β 增加到 10° 时,基于传统光纤传感器测量 $1 \sim 1.6$ mm 范围内的叶尖间隙测量误差达到 $17\% \sim 68\%$ 。传统光纤传感器在端面倾斜度的影响下,其测量误差随叶尖间隙和端面倾斜度的增大而增大。例如,当 $z = 1.6$ mm, $\beta = 2^\circ$ 时误差为 2.51% ;当 $z = 1.8$ mm, $\beta = 8^\circ$ 时误差达到 48.93% 。

当根据改进型光纤传感器测量结果,给定 (R_1, R_2) 输出特征参量组合,例如 $(R_1 = 0.143, R_2 = 3.832)$,基于双参数解耦得到的叶尖间隙二维变化结果为 $(z = 1.052$ mm, $\beta = 5.94^\circ)$,并在三维坐标系中生成可视化曲面图像,解算结果标记为红色五角星,如图 11 所示。

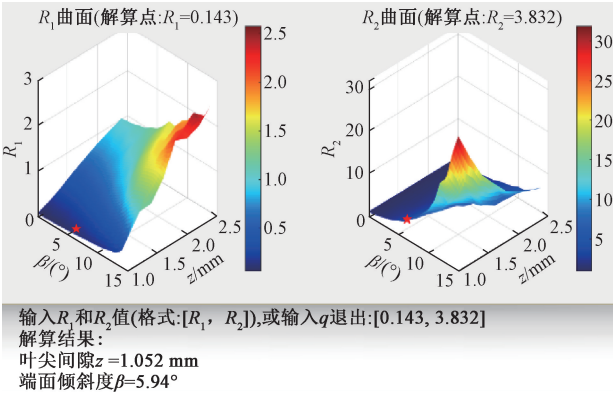


图 11 给定 R_1, R_2 反算的叶尖间隙与端面倾斜度

Fig. 11 The reversed tip clearance and tilt angle of the improved sensor with given R_1 and R_2

2)改进型光纤传感器测量压气机叶尖间隙

相比传统型光纤传感器,改进型光纤传感器的叶尖间隙测量误差显著降低,如表 3 所示。例如,当 $z = 1.540$ mm, $\beta = 2.52^\circ$ 时,误差为 0.32% ; $z = 1.894$ mm, $\beta = 8.13^\circ$ 时误

差为 0.53%。当叶尖间隙 z 在 1.0~2.2 mm 变化时,端面倾斜度 β 在 0°~10°范围内的变化引起的测量误差不超过 3%,即端面倾斜度变化对叶尖间隙的测量得到了有效的控制。经验证对比,改进型光纤传感器对减弱压气机叶

尖端面倾斜度对测量压气机叶尖间隙的影响有着显著效果,测量精度明显提升,并能够同步预测叶尖端面倾斜度的变化,能为燃气轮机压气机健康监测与故障排除提供更为充实可靠的数据支撑。

表 3 叶尖间隙与端面倾斜度的误差分析
Table 3 Error analysis of the reversed tip clearance and tilt angle

序号	输入值	解算结果	实际值	绝对误差	误差/%
1	$R_1=0.143$	$\beta=5.94^\circ$	$\beta_0=5.97^\circ$	$\Delta\beta=0.03^\circ$	0.50
	$R_2=3.832$	$z=1.052\text{ mm}$	$z_0=1.060\text{ mm}$	$\Delta z=0.008\text{ mm}$	0.75
2	$R_1=0.480$	$\beta=2.59^\circ$	$\beta_0=2.52^\circ$	$\Delta\beta=0.07^\circ$	2.78
	$R_2=1.596$	$z=1.545\text{ mm}$	$z_0=1.540\text{ mm}$	$\Delta z=0.005\text{ mm}$	0.32
3	$R_1=1.227$	$\beta=7.98^\circ$	$\beta_0=8.13^\circ$	$\Delta\beta=0.15^\circ$	1.85
	$R_2=3.623$	$z=1.904\text{ mm}$	$z_0=1.894\text{ mm}$	$\Delta z=0.010\text{ mm}$	0.53
4	$R_1=1.643$	$\beta=10.15^\circ$	$\beta_0=10.12^\circ$	$\Delta\beta=0.03^\circ$	0.30
	$R_2=4.367$	$z=2.168\text{ mm}$	$z_0=2.152\text{ mm}$	$\Delta z=0.016\text{ mm}$	0.74

4 结 论

本文提出的多光纤束双圈同轴型光纤传感器,通过结构设计与解耦算法实现了对转子叶片径向间隙和端面倾斜度二维参量的同步检测。通过对内圈接收光纤分两路对称输出光强信号,获得了与端面倾斜度变化相关的输出特征信号 R_1 。根据光学仿真得到的输出特性分析结果,改进型光纤传感器同步检测的输出特征信号 R_2 与端面倾斜度 β 具有显著的关联性,为主动补偿倾斜度的干扰提供了物理基础。进一步结合双参数解耦算法,在标定数据范围内可以实现二维参量的同步解算,并且在端面倾斜度 0°~10°范围内叶尖间隙的解算误差小于 0.05 mm,相对误差不超过 3%,验证了改进型多光纤束光纤传感器的可靠性和精度。

参考文献

[1] FAHMI A T W K, KASHYZADEH K R, GHORBANI S. A comprehensive review on mechanical failures cause vibration in the gas turbine of combined cycle power plants[J]. Engineering Failure Analysis, 2022, 134: 106094.

[2] 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.

[3] 吴军,陈杨,赵君伟,等.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[J].仪器仪表学报,2023,44(11):13-21.

WU J, CHEN Y, ZHAO J W, et al. Dynamic synchronous measurement method of turbine blade speed and blade tip clearance based on laser self-mixing

principle[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(11): 13-21.

[4] HELLER D, SEVER I A, SCHWINGSHACKL C W. A method for multi-harmonic vibration analysis of turbomachinery blades using Blade Tip-Timing and clearance sensor waveforms and optimization techniques[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2020, 142: 106741.

[5] GUO X L, LIU H X, ZHOU Z H. Improving the blade tip clearance measurement method based on blade tip timing: Accounting for rotor speed variations and non-uniform blade-by-blade tip clearance [J]. Measurement, 2025, 242: 115777.

[6] ZHANG X D, XIONG Y W, HUANG X, et al. Dynamic characteristics analysis of 3D blade tip clearance for turbine blades with typical cracks[J]. International Journal of Aerospace Engineering, 2022(1): 9024739.

[7] 薛志飞,易亮,牛广越,等.基于电容信号均方根的平均叶尖间隙测量方法[J].电子测量与仪器学报,2025, 39(1):80-89.

XUE Z F, YI L, NIU G Y, et al. Based on capacitance signal root mean square average tip clearance measurement method [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2025, 39(1): 80-89.

[8] 段发阶,牛广越,周琦,等.航空发动机叶尖间隙在线测量技术研究综述[J].航空学报,2022, 43(9): 82-108.

DUAN F J, NIU G Y, ZHOU Q, et al. Research review of online tip clearance measurement technology

- for aircraft engines[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2022, 43(9): 82-108.
- [9] 李莹洁, 侯钰龙, 沈三民, 等. 基于圆柱体耦合结构的液漏检测光纤传感器[J]. *电子测量技术*, 2022, 45(22): 19-23.
- LI Y J, HOU Y L, SHEN S M, et al. Optical fiber sensor for liquid leakage detection based on cylindrical coupling structure [J]. *Electronic Measurement Technology*, 2022, 45(22): 19-23.
- [10] GHAFAR A, NIU S, MEHDI M, et al. The design and validation of an intensity-modulated multipoint fiber-optic liquid-level sensor [J]. *Sensors*, 2025, 25(16): 5009.
- [11] 易亮, 薛志飞, 牛广越, 等. 涡轮带冠叶片多通道叶尖间隙测试技术研究[J]. *电子测量技术*, 2024, 47(20): 1-6.
- YI L, XUE Z F, NIU G Y, et al. Research on multi-channel blade tip clearance testing technology for turbine blades with shrouds[J]. *Electronic Measurement Technology*, 2024, 47(20): 1-6.
- [12] GARCIA I, BELOKI J, ZUBIA J, et al. An optical fiber bundle sensor for tip clearance and tip timing measurements in a turbine rig[J]. *Sensors*, 2013, 13(6): 7385-7398.
- [13] GIL-GARCIA 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): 2162.
- [14] 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): 91-97.
- 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): 91-97.
- [15] 张小栋, 吴冰, 谢思莹. 涡轮叶片三维叶尖间隙光纤检测系统[J]. *光学精密工程*, 2018, 26(7): 1578-1587.
- ZHANG X D, WU B, XIE S Y. 3D blade tip clearance fiber-optic detection system for turbine blades [J]. *Optics Precision Engineering*, 2018, 26(7): 1578-1587.
- [16] 杨盛德, 杨训, 刘悄然. 光纤传感器端面结构对反射面形状因子的消除作用分析[J]. *测控技术*, 2020, 39(2): 14-19.
- YANG S D, YANG X, LIU Q R. Analysis of elimination effect of shape factor of reflecting surface by end structure of optical fiber sensor [J]. *Measurement & Control Technology*, 2020, 39(2): 14-19.
- [17] 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.
- 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.

作者简介

江盟(通信作者), 博士, 讲师, 主要研究方向为光学测试技术、光纤式转子叶尖间隙测量技术等。
E-mail: jm6113625@163.com