

带冠叶片振动形变与叶顶间隙解耦测量方法研究

包 晗¹, 竺晓程¹, 张 引², 欧阳华¹, 杨 阳³, 丁运良³

(1. 上海交通大学机械与动力工程学院, 上海 200240; 2. 上海交大航空发动机科技有限公司, 上海 200120;
3. 上海电气电站设备有限公司上海汽轮机厂, 上海 200240)

摘 要: 针对旋转叶轮机带冠叶片的轴向振动与叶顶间隙高精度同步测量需求, 基于对测量模型的理论分析提出一种差分式双传感器排布的解耦测量方案, 并通过进一步标定信号模量与物理参数间的三维多项式映射关系, 实现针对带冠叶片的轴向振动位移与叶顶间隙的高精度反演。实验结果表明: 当单周期采样点数达 50 点时, 轴向振动位移与叶顶间隙预测值的决定系数分别达到 0.995 和 0.988, 均方根误差分别为 0.064 和 0.058 mm; 该测量方法通过分离信号间所包含的差模与共模特征有效解决了带冠叶片轴向振动与叶顶间隙解耦提取难题, 并验证了差分式双传感器方案在实际测量中的可行性与精度优势, 为带冠叶片健康监测提供了可靠技术手段。

关 键 词: 带冠叶片; 电涡流传感器; 解耦测量; 叶顶间隙; 轴向振动位移

中图分类号: V232.4 文献标识码: A DOI: 10.16146/j.cnki.rndlgc.2026.02.012

[引用本文格式] 包 晗, 竺晓程, 张 引, 欧阳华, 杨 阳, 丁运良. 带冠叶片振动形变与叶顶间隙解耦测量方法研究[J]. 热能动力工程, 2026, 41(2): 106-113. BAO Han, ZHU Xiaocheng, ZHANG Yin, OUYANG Hua, YANG Yang, DING Yunliang. Decoupling measurement method of vibration deformation and tip clearance in shrouded blades[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2026, 41(2): 106-113.

Decoupling Measurement Method of Vibration Deformation and Tip Clearance in Shrouded Blades

BAO Han¹, ZHU Xiaocheng¹, ZHANG Yin², OUYANG Hua¹, YANG Yang³, DING Yunliang³

(1. School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, China, Post Code: 200240;
2. Aero Engine Technology Co., Ltd., Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, China, Post Code: 200120;
3. Shanghai Electric Power Generation Equipment Co., Ltd. Turbine Plant, Shanghai, China, Post Code: 200240)

Abstract: Based on the need for high-precision synchronous measurement of axial vibration and tip clearance in shrouded blades of rotating turbomachinery, a decoupling measurement scheme was proposed using a differential dual-sensor arrangement, derived from theoretical analysis of the measurement model. By further calibrating the three-dimensional polynomial mapping relationship between signal modulus and physical parameters, high-precision inversion of axial vibration displacement and tip clearance of shrouded blades was achieved. Experimental results show that when the number of sampling points per cycle reaches 50, the coefficients of determination for the predicted axial vibration displacement and tip clearance reach 0.995 and 0.988, respectively, with root mean square errors (RMSE) of 0.064 and 0.058 mm. This method effectively resolves the challenge of decoupling axial vibration and tip clearance in shrouded blades by separating the differential and common-mode features embedded in the signals, demonstrating the feasibility and accuracy advantages of the differential dual-sensor scheme in practical measurements, thereby providing a reliable technical approach for health monitoring of shrouded blades.

Key words: shrouded blades; eddy current sensor; decoupling measurement; blade tip clearance (BTC); axial vibration displacement

引 言

作为现代能源系统中的核心动力设备,汽轮机是电力系统稳定运行的重要组成部分。叶片作为直接与高温高压蒸汽相互作用的做功元件,其工作稳定性决定整机的运行安全和能量转换效率^[1-2],叶片振动行为准确识别与评估成为汽轮机故障预警与寿命管理的重要课题。

随着汽轮机机组功率提高,低压末级叶片由于尺寸不断增加,易受蒸汽激励和复杂应力耦合作用影响,成为整机中结构故障与疲劳失效的高发区域^[3]。末级叶片常采用的带冠结构使得其在振动特征上与自由叶片存在明显差异,主要表现为轴向位移(Axial Displacement, AD)^[4-5]。同时在离心力和热膨胀作用下,叶顶间隙(Blade Tip Clearance, BTC)呈动态变化,因此 AD 与 BTC 变化作为评估叶片工作状态与汽轮机安全性的核心参数,其实时测量对于保障机组稳定运行和故障早期预警具有重要工程应用价值。

目前针对旋转叶片测量研究多集中于自由叶片,振动测量方法分为接触式与非接触式。应变片法作为典型接触式测量方法,多用于实验室静态测量,实际应用存在干扰转子动平衡、安装复杂等问题^[6];叶尖定时方法(BTT 法)^[7]以其非接触和全周监测的优势,成为了自由叶片振动监测领域不可替代的主流技术。然而其固有的欠采样问题和数据分析的复杂性,仍是该技术不断发展和优化的核心方向。叶尖间隙测量早期主要采用火花放电探针与光纤法^[7]展开,但受高温、油污与湿蒸汽环境影响,工程适用性受限,近年来电涡流与电容传感器逐渐成为主导方法。

针对带冠叶片轴向位移以及叶顶间隙的测量手段较为有限,且不同结构叶冠对应的信号特征差异显著。对于叶冠具有突出耦合结构的叶片^[8],可引入平凸透镜结构的光纤传感器^[9]或校正电涡流传感器^[10-11]通过识别阻尼围带咬合特征到达时刻实现轴向位移测量。天津大学团队开发了频响带宽高达 250 kHz 的电涡流传感器实现末级叶片高频振动响应测量^[12-13]。针对边缘规则的带冠叶片,该团队

提出了基于感应面积变化的变面积电涡流法^[14]。然而上述文献未直接给出叶顶间隙测量的方法。天津大学团队后续研究利用叶冠接缝处导电率与磁导率突变形成的空间调制效应实现了带冠叶片 BTC 的电涡流测量^[15-16]。薛志飞等人^[17]设计了矩形芯极电容传感器用于叶顶间隙测量,但未考虑轴向位移的影响。

综上所述,现有研究虽分别发展了针对带冠叶片轴向位移与叶顶间隙的多种测量方法,但均仅能响应单一物理量变化,迄今仍缺乏一种能够同步测量轴向位移与叶顶间隙的有效手段。本研究提出差分式电涡流传感器测量方案,通过双传感器信号协同分析实现带冠叶片轴向位移与叶顶间隙的同步解耦测量,能够更好地应用到带冠叶片的健康状态监测应用场景中。

1 带冠叶片振动位移与叶顶间隙同步解耦测量方案

电涡流传感器是一种基于电磁感应原理的非接触式位移测量装置。在传感器工作过程中,传感器探头线圈中通过高频交流电流 \dot{I}_1 从而产生交变磁场 \dot{H}_1 。当被测导电对象进入线圈磁场覆盖区域时,被测对象表面感应产生的涡流 \dot{I}_2 会在被测体内部形成与原磁场方向相反的二次磁场 \dot{H}_2 ,与线圈原有的磁场相互耦合改变线圈的总磁场分布,从而影响传感器探头线圈的阻抗,电涡流传感器工作原理如图 1 所示。

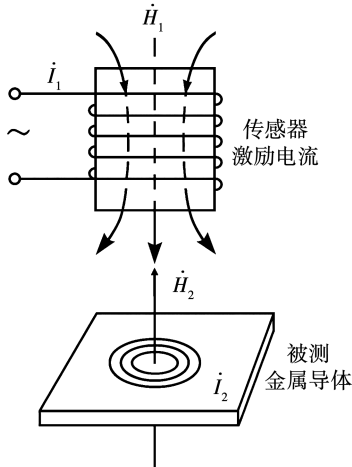


图 1 电涡流传感器工作原理

Fig. 1 Working principle of eddy current sensors

探头线圈受感应电流影响下的等效阻抗 Z 可以表示为:

$$Z = f(I, \rho, \mu, s, \omega, d) \tag{1}$$

式中: I —被测导体的励磁电流幅值; ω —电流频率; μ —磁导率; ρ —被测导体电阻率; s —线圈与被测体的相对面积; d —线圈与被测体的距离。

在带冠叶片测量场景下, 由于叶片主要受轴向的振动变形, 以及沿叶片径向方向由于离心力和热膨胀产生的拉伸的影响, 分别引起传感器感应面积以及测量距离的变化。因此, 电涡流传感器探头线圈阻抗是关于轴向位移和叶顶间隙的函数:

$$Z = f(x, c) \tag{2}$$

式中: x —带冠叶片在叶轮机械运行过程中产生的轴向振动位移; c —叶冠到机匣之间的叶顶间隙。

图2为差分式同步测量传感器排布方案。定义坐标系下 x 轴为叶冠周向运动方向, y 轴为轴向位移方向, z 轴为叶顶间隙变化方向。为实现对轴向位移和叶顶间隙的测量, 在机匣位于叶冠的上、下边缘 y 轴不同坐标处布置两支电涡流传感器 S_1 和 S_2 。

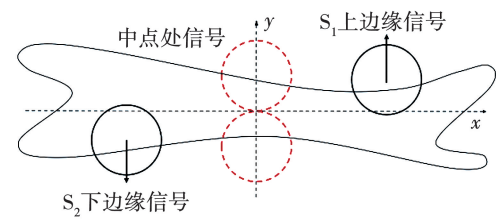
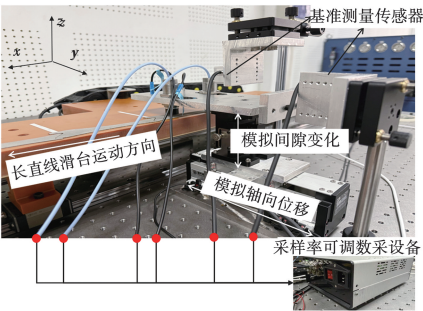


图2 差分式同步测量传感器排布方案

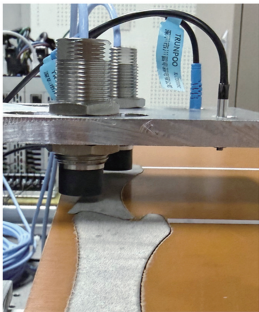
Fig. 2 Differential synchronous measurement sensor layout scheme

基于传感器排布方案, 搭建了用于模拟周向叶冠运动情况的长直线实验台架, 搭载某型号汽轮机末级叶冠等比例测量件进行平移运动, 通过电涡流传感器获取目标测量信号。

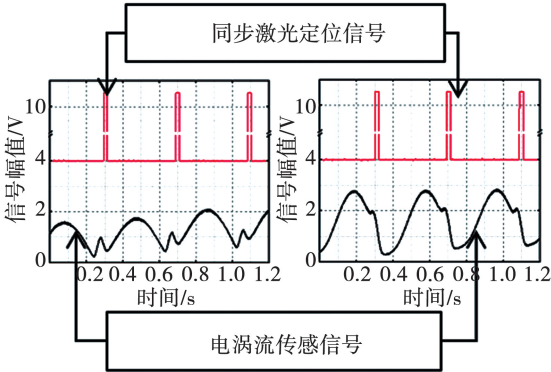
图3(a)展示了用于方法可行性验证与标定曲线拟合的三维运动模拟实验台架。实验核心采用两个直径为 18 mm 的电涡流传感器 S_1 、 S_2 , 其探头中心在周向与轴向的安装间距分别为 75 和 28 mm。实验目标为最大宽度约为 41 mm, 中点宽度约为 19 mm 的某型号等比叶冠试件, 传感器探头与试件表面的初始垂直距离约为 0.8 mm。以叶冠的几何中心和探头初始安装间距状态定义空间坐标系的零点, 电涡流传感器探头 S_1 与 S_2 在 y 、 z 轴上的坐标分别为 $(\pm 14 \text{ mm}, 0 \text{ mm})$ 。



(a) 实验台架整体结构



(b) 探头测点示意图



(c) 原始测量信号

图3 模拟实验台架结构

Fig. 3 Structural framework of simulated test bench

实验运行时, 通过长直线滑台驱动叶冠试件沿 x 轴往复运动, 以模拟其周向扫过传感器时的真实工况; 同时利用高精度微位移调整装置控制传感器在 y 轴与 z 轴方向上的坐标, 以此模拟 AD 与 BTC 的动态变化。为精确拆分信号周期并识别叶冠耦合区域的到达时刻, 本方案在电涡流传感器探头圆心的延长线上增设了一个光纤定位传感器, 如图 3(c) 所示。在测量基准方面, 采用高精度激光传感器的读数作为 AD 与 BTC 的基准真值。最终所有传感器的测量信号由同步数据采集设备统一记录, 以供后续分析。

以 1 000 Hz 的频率对叶冠测量件以 300 mm/s 线速度运动下的边缘曲线进行采样, S_1 与 S_2 在空间坐标系中不同位置处测量信号如图 4 所示。

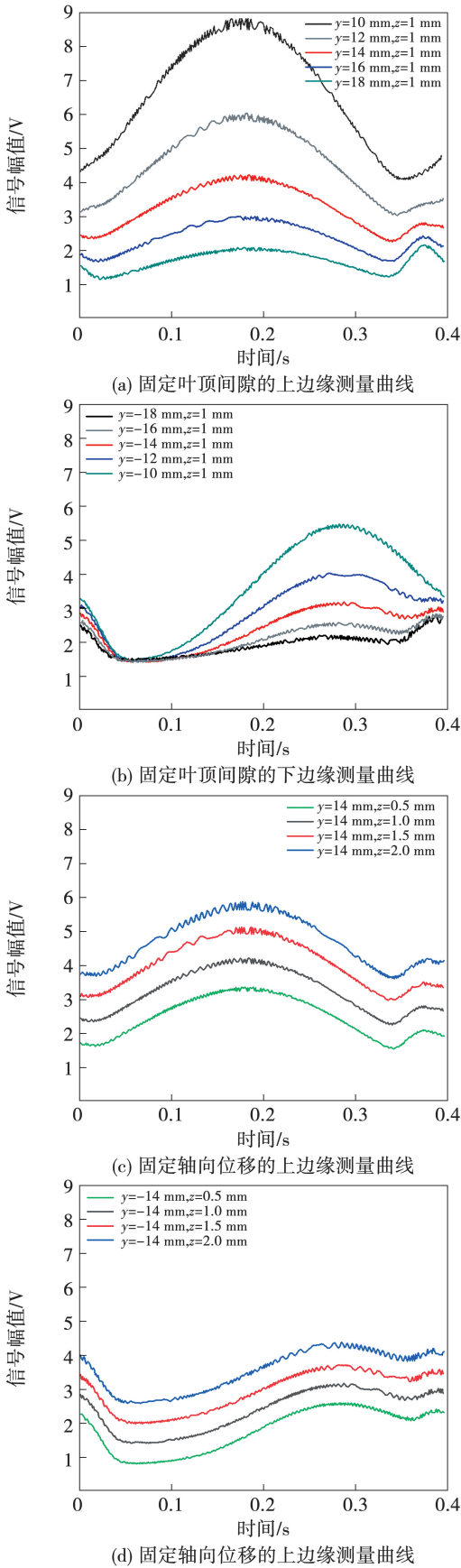


图4 不同实验条件下电涡流传感器测量曲线

Fig.4 Measurement curves of eddy current sensors under various test conditions

从图中可以直观地发现,叶冠上 S_1 和下边缘 S_2 的测量信号与叶片的轴向位移及叶顶间隙分别表现出的差模(相反)与共模(相同)变化趋势。据此可通过构造一个综合的信号模量来表征这一混合敏感特性,进而实现从复合信号中解耦并反演单个工作参数。

2 数据处理算法

基于传感器 S_1 和 S_2 的采集信号,图5给出本研究所提出的同步解耦测量方案的信号处理流程。

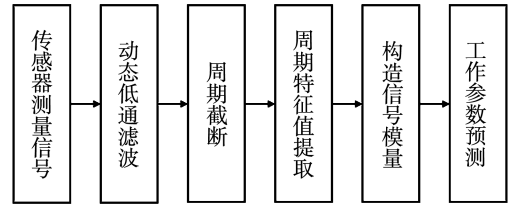


图5 测量方法信号流程图

Fig.5 Flowchart of measurement method signal

2.1 信号单周期特征值提取方法

首先需要通过动态低通滤波的方法获得信号对应叶片特征值量。在理想情况下叶冠上、下边缘的两支电涡流传感器 S_1 、 S_2 输出的离散信号可表示为:

$$f_{S_i}[n] = F_{S_i}[n] + r_{S_i}[n], \quad i = 1, 2 \quad (3)$$

式中: $r_{S_i}[n]$ —由叶冠边缘形状所引起的信号变化; $F_{S_i}[n]$ —信号 $f_{S_i}[n]$ 动态低通滤波后的直流分量。

信号处理过程采用的 n 阶离散时间低通滤波器一般差分方程为:

$$F_{S_i}[n] = \sum_{k=0}^M b_k \cdot f_{S_i}[n-k] - \sum_{k=1}^N a_k \cdot F_{S_i}[n-k] \quad (4)$$

式中: b_k 、 a_k —滤波器的分子与分母设计系数; M —前馈项阶数; N —滤波器设计阶数。

对原始连续时域信号的 n 阶低通滤波处理后,考虑到传感器输出在叶冠周期性通过时呈现准周期性特征,选取滤波后单个周期的中点时刻 t_m 的直流分量作为该周期内的信号特征值:

$$\bar{F}_{S_i} = F_{S_i}(t_m), \quad i = 1, 2 \quad (5)$$

2.2 差分解耦测量算法

为了建立信号与物理参数的定量映射关系,传感器 S_1 、 S_2 的输出直流分量可进一步表示为:

$$\bar{F}_{S_i}(t) = f_0(s_{0,i}, d_{0,i}) + f_1(\Delta s_i, \Delta d), \quad i = 1, 2 \quad (6)$$

式中: $s_{0,i}, d_{0,i}$ —初始测量位置处的感应面积与测量距离; $\Delta s_i, \Delta d$ —工作状态变化所导致的感应面积与测量距离增量; f_0 —初始条件下面积与距离对信号的影响; f_1 —相对初始状态的信号修正函数。

由此根据单个叶冠获得的一组对应的直流特征值可以进一步定义差模量与共模量为:

$$\begin{bmatrix} F_d \\ 2F_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{F}_{S_1} \\ \bar{F}_{S_2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_0(s_{01}, d_{01}) + f_1(\Delta s_1, \Delta d) \\ f_0(s_{02}, d_{02}) + f_1(\Delta s_2, \Delta d) \end{bmatrix} \quad (7)$$

差模量 F_d 主要表征叶冠在 AD 作用下两传感器响应的相对差异,而共模量 F_c 则主要反映 BTC 变化所引起的信号整体偏移。因此对于单个叶冠而言,其 AD 与 BTC 在理想条件下对应着一组唯一的共模量 F_c 和差模量 F_d :

$$(x, c) \leftrightarrow (F_d, F_c) \quad (8)$$

借助实验标定的方法可以确定 (F_d, F_c) 与 (x, c) 之间的函数关系:

$$\begin{bmatrix} x \\ c \end{bmatrix} = G(F_d, F_c) + \varepsilon \quad (9)$$

式中: $G(\cdot)$ —通过实验数据训练得到的非线性映射函数; ε —拟合误差。

采用多项式确定映射关系:

$$\begin{cases} x = \sum_{i=0}^A \sum_{j=0}^B a_{ij} F_d^i F_c^j, \\ c = \sum_{i=0}^P \sum_{j=0}^Q b_{ij} F_d^i F_c^j \end{cases} \quad (10)$$

式中: a_{ij}, b_{ij} —待定系数,可通过优化方法,如最小二乘法确定。

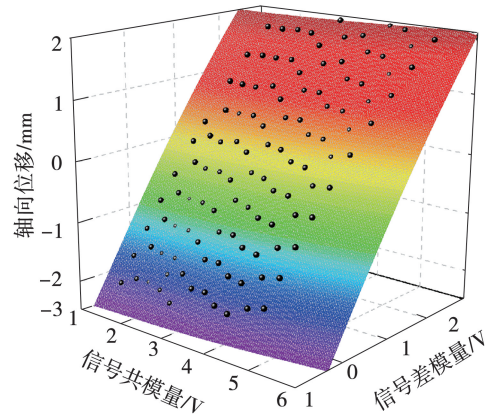
基于标定数据进行估计并最小化误差函数 J 获得最优参数集 $\{a_{ij}, b_{ij}\}$:

$$J = \sum_{k=0}^K \left\| \begin{bmatrix} x_k \\ c_k \end{bmatrix} - G(F_{d,k}, F_{c,k}) \right\| \quad (11)$$

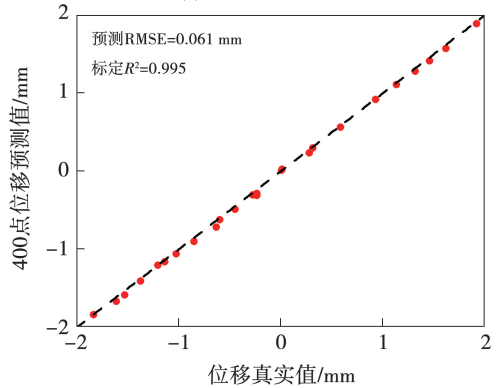
3 实验与结果分析

3.1 振动位移与叶顶间隙标定实验

在图 3 所示的模拟台架上通过标定实验建立 AD、BTC 与信号共模、差模成分之间的关系,便于后续的结果预测。利用一套精密移动机构带动传感器沿 y, z 轴移动实现不同实验条件的改变,通过激光基准传感器精确测量机构相对于初始情况下在 y 轴、 z 轴的坐标变化量,将其用作 AD 和 BTC 的基准参考值。在每个工况下采集数据,并选取信号模量线性度最佳的区域作为理想工作区间,分别对 AD 和 BTC 的实验数据与对应的信号成分进行三维多项式拟合。图 6 和图 7 分别给出在轴向位移 ± 2 mm、叶顶间隙 $0 \sim 2.5$ mm 的标定空间内。电涡流传感器的标定曲线与相关统计结果,其中水平面横坐标为信号的共模、差模量,纵坐标是工作点对应的叶冠 AD 或 BTC 大小。



(a) 轴向位移标定曲面



(b) 轴向位移预测结果

图 6 1 000 Hz 采样率信号轴向位移标定与预测结果

Fig. 6 Calibration and prediction results of axial displacement based on a 1 000 Hz sampling rate signal

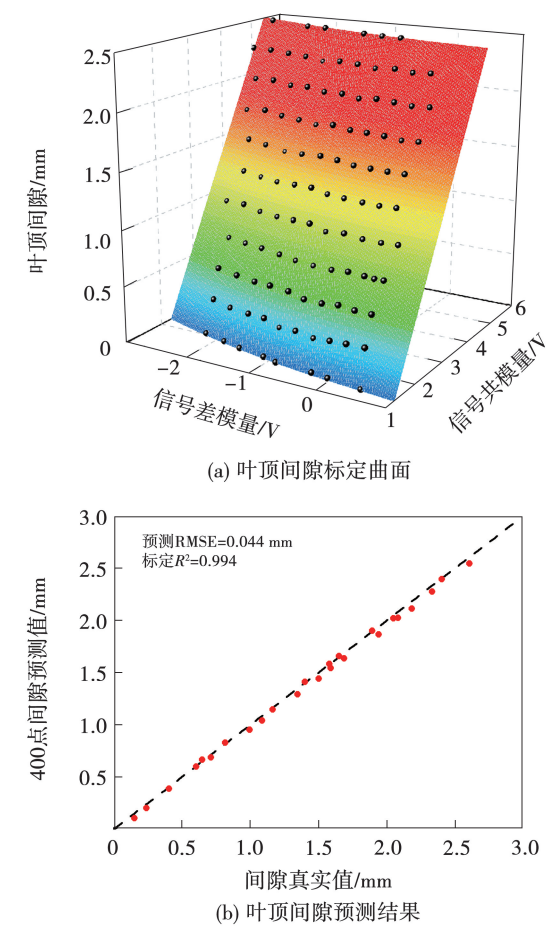


图7 1 000 Hz 采样率信号叶顶间隙标定与预测结果

Fig.7 Calibration and prediction results of blade tip clearance based on a 1 000 Hz sampling rate signal

当以1 000 Hz对原始测量信号采样时,单个叶冠通扫周期内有400个采样点。在该采样率条件下多次进行实验,对于带冠叶片的轴向位移和叶顶间隙的标定决定系数可分别达到0.995和0.994,说明多项式拟合结果能够充分学习信号变化趋势中蕴含的物理量信息。进一步的,在验证数据集上进行参数反演实验,预测结果的RMSE分别为0.061 mm和0.044 mm,因此基于标定实验得到的预测结果与基准测量值之间的误差理想。

3.2 不同采样率下测量准确性分析

在实际汽轮机监测中,末级叶片叶尖线速度极高。以转速 $N_r=3\,000\text{ r/min}$,叶片数 $N=90$,叶轮直径4 m计算,传感器输出信号的通过频率 f_b 与周期 T_b 为:

$$f_b = N \times \frac{N_r}{60} = 4\,500\text{ Hz} \tag{12}$$

$$T_b = \frac{1}{f_b} \approx 222\text{ }\mu\text{s} \tag{13}$$

若使用采样率100 kHz的常见数采系统,则在一个信号周期内仅可获取约22个采样点。为定量研究单周期内采样点数对测量准确性的影响,本研究通过数字降采样方法生成并对比了单周期内10, 25和50个采样点的信号,并分别进行了标定实验。由图8可知采样密度显著影响波形保真度。

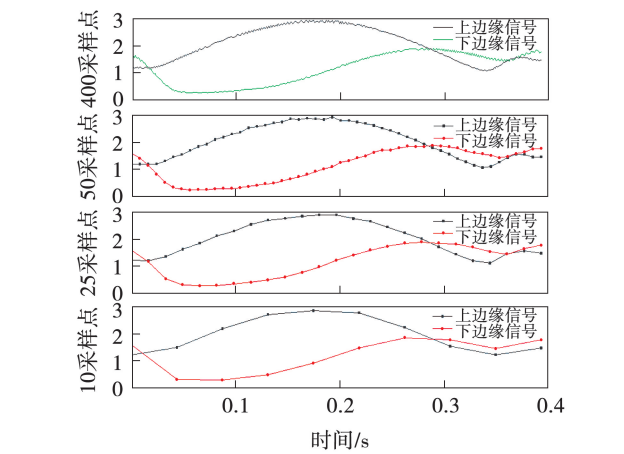


图8 轴向位移-1.8 mm,间隙0.1 mm不同采样点数下测量信号

Fig.8 Measurement signal at different sampling points at axial displacement of -1.8 mm and blade tip clearance of 0.1 mm

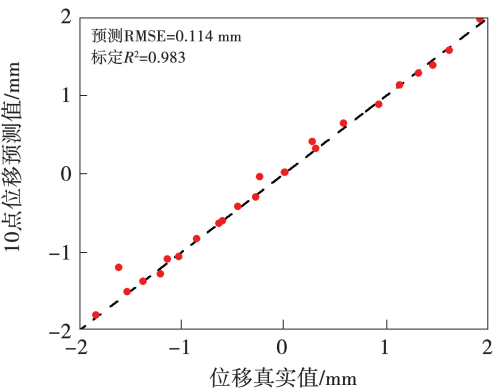
基于降采样信号,表1中给出轴向位移-1.8 mm,间隙0.1 mm下对应的差模量和共模量,以及相对应的预测结果。

表1 轴向位移-1.8 mm,间隙0.1 mm下不同采样点数的信号模量与预测结果

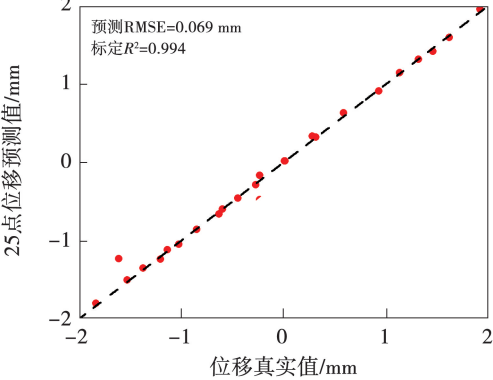
Tab.1 Signal modulus and prediction results at different sampling points at axial displacement of -1.8 mm and blade tip clearance of 0.1 mm

参数	采样点数			
	400	10	25	50
差模量/V	0.891 4	0.773 4	0.847 3	0.862 1
共模量/V	1.601 1	1.568 1	1.589 1	1.598 9
轴向位移预测值/mm	-1.835 1	-1.946 2	-1.892 6	-1.845 1
叶顶间隙预测值/mm	0.115 6	0.001 8	0.057 5	0.093 2

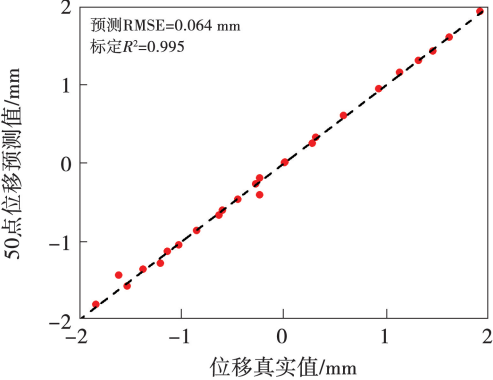
由图9和图10分别展示了不同采样点数下轴向位移和叶顶间隙的参数反演结果。



(a) 10点采样下轴向位移标定和预测结果



(b) 25点采样下轴向位移标定和预测结果

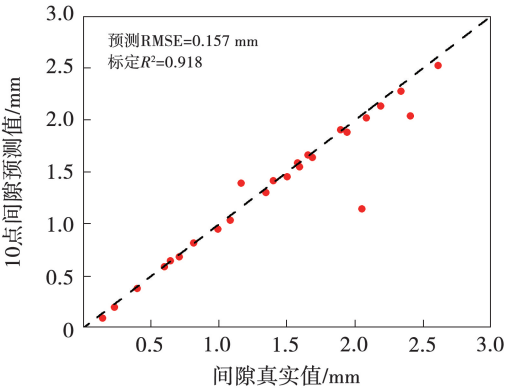


(c) 50点采样下轴向位移标定和预测结果

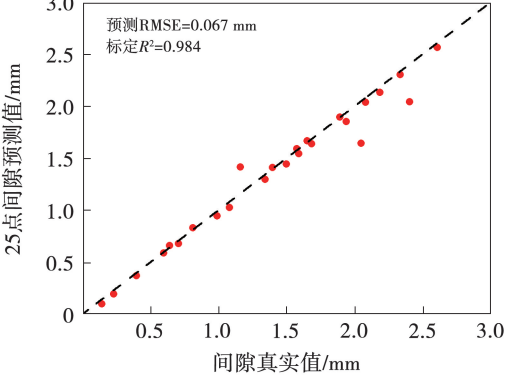
图 9 不同采样率下轴向位移真实值与预测结果

Fig. 9 True values and prediction results of axial displacement at different sampling rates

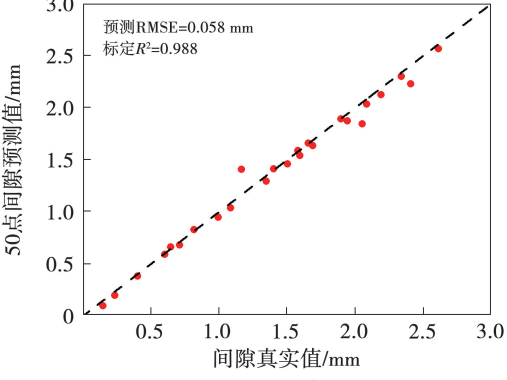
可以明确观察到拟合决定系数随采样点数的增加而显著提升,且测量准确性不断提高。当单个叶冠事件的采样点数达到 50 点时,基于三维多项式标定模型反演得到的振动位移与叶顶间隙值,其与基准值之间的均方根误差与决定系数已显著改善至工程可接受的范围内,进一步增加采样点数精度提升边界效应明显。这表明在采样点数充足的条件下,本研究提出的测量方法能够实现高精度的动态参数提取。



(a) 10点采样下叶顶间隙标定和预测结果



(b) 25点采样下叶顶间隙标定和预测结果



(c) 50点采样下叶顶间隙标定和预测结果

图 10 不同采样率下间隙真实值与预测结果

Fig. 10 True values and prediction results of blade tip clearance at different sampling rates

4 结 论

针对旋转叶轮机带冠叶片轴向振动位移与叶顶间隙实际测量需求,为了提高精度以及可靠性,提出了一种基于差分式双传感器排布的解耦测量方案,形成了数学建模以及传感器测量信号相关分析与处理方法。

(1) 本研究通过建立信号模量与物理参数之间的三维多项式映射关系,并进一步基于标定实验的多

项式拟合结果,在轴向位移 $\pm 2\text{ mm}$ 、叶顶间隙 $0\sim 2.5\text{ mm}$ 范围内实现了对两个目标参数的高精度反演。

(2) 为进一步研究不同采样率下的测量精度,通过对于降采样测量信号的系统分析可知,当单个信号周期内采样点数达到 50 点时,轴向振动位移、叶顶间隙的标定决定系数 R^2 分别可达 0.995 与 0.988 的预测值均方根误差 RMSE 的预测值分别为 0.064 mm 与 0.058 mm。

由上述结论可知,本文提出的同步解耦测量方法有效解决了带冠叶片通扫传感器探头时形变信息的提取难题,为带冠叶片的健康监测提供了可靠的技术手段。

参考文献:

[1] PRZYSOWA R. Blade vibration monitoring in a low-pressure steam turbine[C]//Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air. American Society of Mechanical Engineers,2018,51128;V006T05A025.

[2] ZHAO W,LI Y,XUE M,et al. Vibration analysis for failure detection in low pressure steam turbine blades in nuclear power plant[J]. Engineering Failure Analysis,2018,84:11–24.

[3] 宫啸宇,蒋 楠,戴义平. 深度调峰运行时汽轮机低压叶片的安全性分析[J]. 热能动力工程,2023,38(9):21–29.

GONG Xiaoyu,JIANG Nan,DAI Yiping. Safety analysis of low-pressure turbine blades during deep peak shaving[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power,2023,38(9):21–29.

[4] 靳泽龙,于剑锋,赵俊波,等. 叶片整圈振动特性分析及调频优化[J]. 热能动力工程,2023,38(3):1–6.

JIN Zelong,YU Jianfeng,ZHAO Junbo,et al. Vibration characteristics analysis and frequency modulation optimization of circularly interlocked blade[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power,2023,38(3):1–6.

[5] 康 磊,付兴伟,丁化文,等. 船用透平末级长叶片振动性能研究[J]. 动力学与控制学报,2016,14(3):229–234.

KANG Lei,FU Xingwei,DING Huawen,et al. Study on vibration performance of the last-stage blade on marine turbine[J]. Journal of Dynamics and Control,2016,14(3):229–234.

[6] 欧阳涛. 基于叶尖定时的旋转叶片振动检测及参数辨识技术[D]. 天津:天津大学,2011.

OUYANG Tao. Rotating blade vibration detection and parameters identification technique using blade tip-timing[D]. Tianjin:Tianjin University,2011.

[7] 刘美茹,滕光蓉,肖 潇,等. 基于叶尖定时的航空发动机涡轮叶片振动测量[J]. 航空动力学报,2020,35(9):1954–1963.

LIU Meiru,TENG Guangrong,XIAO Xiao,et al. Vibration measurement of turbine rotor blades of aero-engine based on blade tip-timing [J]. Journal of Aerospace Power, 2020, 35 (9): 1954–1963.

[8] 张佳敏. 基于叶尖定时技术的末级叶片振动特性评估[J]. 热力透平,2020,49(4):276–280.

ZHANG Jiamin. Evaluation of vibration characteristics of last stage blade based on blade tip-timing technology[J]. Thermal Turbine, 2020,49(4):276–280.

[9] YE D,DUAN F,JIANG J,et al. Synchronous vibration measurements for shrouded blades based on fiber optical sensors with lenses in a steam turbine[J]. Sensors,2019,19(11):2501.

[10] KUBÍN Z,MÍSEK T,HLOUS J,et al. Calibration of blade tip-timing sensor for shrouded 40" last stage blade[J]. Mechanical Systems and Signal Processing,2018,108(8):88–98.

[11] DADÁKOVÁ T,KUBÍN Z. Calibration of BTT measurement with respect to sensor position over shrouded LSB[J]. Acta Polytechnica CTU Proceedings,2018,20:29–33.

[12] 邢 琛,段发阶,叶德超,等. 变面积电涡流传感器带冠叶片振动测量[J]. 中国测试,2021,47(2):119–124.

XING Chen,DUAN Fajie,YE Dechao,et al. Vibration measurement of shrouded blade based on variable area eddy current sensor[J]. China Measurement & Test,2021,47(2):119–124.

[13] 叶德超,段发阶,周 琦,等. 基于高频响应电涡流传感器的汽轮机带冠叶片振动测量技术(英文)[J]. 测试科学与仪器,2019,10(4):315–321.

YE Dechao,DUAN Fajie,ZHOU Qi,et al. Vibrations measurements for shrouded blades of steam turbines based on eddy current sensors with high frequency response[J]. Journal of Measurement Science and Instrumentation,2019,10(4):315–321.

[14] 叶德超. 汽轮机带冠叶片振动非接触在线检测方法和技术研究[D]. 天津:天津大学,2021.

YE Dechao. Research on non-contact on-line detection method and technology for vibration of shrouded blades in steam turbines [D]. Tianjin:Tianjin University,2021.

[15] 周 琦,段发阶,叶德超,等. 电涡流式汽轮机自锁叶片叶尖间隙测量研究[J]. 仪表技术与传感器,2020(9):36–40,72.

ZHOU Qi,DUAN Fajie,YE Dechao,et al. Research on tip clearance measurement of steam turbine's interlocked blade based on eddy current sensor [J]. Instrument Technique and Sensor, 2020(9):36–40,72.

[16] 周 琦. 汽轮机末级带冠叶片叶尖间隙测量关键技术研究[D]. 天津:天津大学,2020.

ZHOU Qi. Research on the key technology of tip clearance measurement of last stage shrouded blade of steam turbine[D]. Tianjin:Tianjin University,2020.

[17] 薛志飞,牛广越,易 亮,等. 涡扇发动机涡轮带冠叶片叶尖间隙测试[J]. 中国测试,2023,49(12):16–22.

XUE Zhifei,NIU Guangyue,YI Liang,et al. Research on tip clearance measurement of shrouded turbine blades of turbofan engine[J]. China Measurement & Test,2023,49(12):16–22.