

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2614852

基于动态校正与相位累积的旋转叶片叶端 间隙超半波长微波测量*

沈清澜, 解骏杰, 陈赛赛, 韩丽玲, 樊 薇
(江苏大学机械工程学院 镇江 212013)

摘 要:微波法是实现旋转叶片叶端间隙(BTC)高精度测量的关键手段。然而,在 120 GHz 微波测量系统中,硬件缺陷与杂波反射等引入的幅值调制、直流偏移以及幅值-相位不平衡干扰会导致回波信号畸变失真;同时,传统静态校正方法难以适配动态工况,一体化校正与测量难;此外,基于相位差的测距方法受射频信号半波长限制,量程有限。针对上述问题,提出了一种面向旋转工况的信号校正与超半波长 BTC 测量方法。首先,提出了基于稳健分段拟合与近邻数量 K(K-NN)参数估计的动态校正方法(SFK),可在叶片旋转过程中在线补偿失真,提高动态间隙测量精度。其次,针对超半波长测量中的相位折叠与跳变难题,构建基于棣莫弗公式的相位累积修正策略,通过对 BTC 区间信号进行相位对齐与精细补偿,实现超半波长范围的连续位移解调,突破传统解调的量程限制。实验结果表明,在所提 SFK 方法与超半波长 BTC 测量一体化处理框架下,以激光传感器测量结果为参考,微波 BTC 测量在矩形叶片与曲面叶片下的平均绝对误差分别为 1.611 和 1.563 μm ,最大重复性误差分别为 0.623 和 0.481 μm ;在 5 mm 超半波长连续测量实验中,3 次重复实验下 12 个叶片的平均解调线性度达到 99.932%。结果验证了所提方法在动态叶端间隙测量中的高精度与鲁棒性,并对不同形貌叶片具有良好的适用性。

关键词: 叶端间隙;微波测量;SFK 动态校正;相位修正;位移解调

中图分类号: TH711 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

Microwave measurement of rotating BTC beyond the half-wavelength using dynamic calibration and phase accumulation

Shen Qinglan, Xie Junjie, Chen Saisai, Han Liling, Fan Wei

(School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: Microwave technology serves as a pivotal technique for achieving high-precision measurement of rotating blade tip clearance (BTC). However, in 120 GHz microwave measurement systems, amplitude modulation, DC offsets, and amplitude-phase imbalance introduced by hardware imperfections and clutter reflections cause distortion of echo signals; Moreover, conventional static calibration methods are difficult to adapt to dynamic operating conditions, making integrated calibration and measurement challenging; Furthermore, phase-difference-based ranging methods are limited by the half-wavelength constraint of radio-frequency signals, resulting in a restricted measurement range. To address these issues, a signal calibration and beyond-half-wavelength BTC measurement method for rotating conditions is proposed. A dynamic calibration method based on robust segmented fitting and K-nearest-neighbor (K-NN) parameter estimation is developed to compensate signal distortions online during blade rotation. Second, to overcome the problem of phase wrapping and jumping in beyond-half-wavelength measurements, a phase accumulation correction strategy based on De Moivre's formula is proposed, enabling continuous displacement demodulation beyond the half-wavelength limit through phase alignment and fine compensation of BTC interval signals. Experimental results show that, with laser sensor measurements as references, the average absolute errors of microwave BTC measurement are 1.611 and 1.563 μm for rectangular and curved blades, respectively, and the maximum repeatability errors are 0.623 and 0.481 μm . In a 5 mm beyond-half-wavelength continuous measurement experiment, the average demodulation linearity of 12 blades reaches 99.932%. The results demonstrate the

收稿日期:2026-01-13 Received Date: 2026-01-13

* 基金项目:国家自然科学基金(52375100)、江苏省自然科学基金优秀青年基金(BK20240156)、江苏省双创团队(JSSCTD202448)项目资助

accuracy and robustness of the proposed method for dynamic BTC measurement.

Keywords: blade tip clearance; microwave measurement; SFK dynamic calibration; phase correction; displacement demodulation

0 引 言

叶尖间隙(blade tip clearance, BTC)是旋转叶片状态监测与性能评估的重要参数,近年来相关测量技术持续发展,并在动态测量与复杂工况适应性方面取得了较多进展^[1-3]。基于相位差的微波测距法^[4]能够将回波相位变化映射为位移信息,从而实现对叶尖间隙的高精度解调。然而,受硬件缺陷和环境杂波反射等因素影响, I/Q 信号存在直流偏置^[5-6]和幅相不平衡^[7-8],严重影响相位估计偏差与位移解调误差。另一方面,转速波动、叶片端面形貌差异以及测量姿态变化会使静态标定参数在动态环境中失配^[9],使“先标定、后测量”的传统流程难以保证在线测量的准确性与一致性;此外,相位差测距法固有的无模糊测距范围限制使其量程通常受限于射频信号半波长^[10],若间隙变化超过半波长,相位折叠到 $(-\pi, \pi)$ 区间产生相位包裹,导致位移连续解调失效。上述问题使得高速旋转与复杂扰动条件下高精度 BTC 在线测量极具挑战性。

针对 I/Q 信号不平衡校正,现有研究大多在静态信号采集条件下完成标定并提升测量精度^[11-13]。例如,杨季三等^[14]搭建模拟叶尖位移测量实验台,以 0.1 mm 的间距采样获取静态信号,并结合频谱分析与遗传算法优化误差参数,提高传感器的线性度和测距精度。Li 等^[15]利用叶片静止而微波传感器运动的方式采集基带信号,分别采用差分 Hilbert 变换、分段椭圆拟合等方法校正幅相不平衡与直流偏移。Chen 等^[16]在静态采集框架下兼顾衰减非线性等因素,结合微波传感器与叶片间的相对运动获取信号,使用分段椭圆校正与核密度估计方法解决了 I/Q 信号不平衡、非线性衰减等问题。樊薇等^[17]将静态校正参数迁移到旋转叶片测量中,实现了静态校正与动态测量的流程闭环。尽管上述方法在测量条件相对稳定的受控实验下具有良好效果,但其共同特征是依赖静态或准静态数据获取;校正参数在动态旋转工况中可能随转速、姿态与叶片端面形貌变化而漂移,从而产生不可忽略的失配误差,难以实现校正与测量一体化。因此,亟需开发一种能够在叶片动态旋转过程中直接完成 I/Q 信号在线校正的高精度方法,以提升 BTC 测量的稳定性与工程适用性。

在动态 BTC 提取与位移解调方面,相位差测距法同样面临量程与连续性挑战,位移有效解调受限于半波长范围,且易受到临界相位突变的影响^[18-19]。针对半波长内间隙区域提取问题,牛广越等^[20]采用尺度调整、相关匹配、多项式拟合相融合实现半波长内 BTC 有效提取;Chen 等^[16]提出幅度-相位半波长提取方法,结合信号振

幅能量与相位临界突变信息,实现半波长范围内的动态位移信息恢复;樊薇等^[17]提出基于棣莫弗定理与幅-相信息融合策略,克服了临界相位突变干扰,实现了在任意半波长范围内的 BTC 提取。然而,实际测量中,转子轴向振动、工况扰动会导致旋转过程中叶端间隙跨越半波长,相位包裹引发模糊测距。现有研究无法克服该问题,从而无法实现连续解调。

为解决上述问题,本文提出一种一体化在线动态校正与超半波长 BTC 测量方法。首先,针对静态校正在动态工况中的适配问题,提出稳健分段拟合与 K-NN 参数估计的动态校正方法(segmented fitting and K-NN, SFK)。该方法利用叶片旋转过程中的动态数据构建校正样本,通过分段边界提取与椭圆拟合获得拟合参数矩阵,依据 K-NN 密度估计实现拟合参数自适应选择,从而在线估计并补偿直流偏置与幅相不平衡。针对间隙变化超过半波长导致的相位包裹,提出基于棣莫弗公式的相位累积修正策略。围绕 BTC 区间相位差的周期一致性进行对齐与平移补偿,在跨周期间实现相位连续累积,获得同一叶片连续旋转过程中的超半波长间隙变化,实现连续位移解调并拓展测量量程。随后,利用矩形叶片和曲面叶片的在线动态校正实验与动态间隙提取验证所提方法的有效性和鲁棒性。

1 基于 SFK 的不平衡参数稳健估计

在叶片动态旋转工况下, I/Q 基带信号存在幅值衰减、幅相不平衡与直流偏移现象;此外,受叶片振动与噪声杂波等动态扰动, I/Q 信号轨迹图存在局部偏离与离群点。此时,基于传统静态数据的全局椭圆拟合估计方法对异常样本敏感,易导致不平衡参数估计波动,从而影响后续相位解调与间隙测量精度。

为此,本文提出一种基于 SFK 的 I/Q 不平衡参数两阶段校正方法,流程如图 1 所示。

阶段 1:对动态 I/Q 信号进行分段处理,并提取段内凸包边界点构建局部稳健的几何约束,减弱瞬态扰动与杂波点对椭圆拟合的影响;

阶段 2:将各分段得到的椭圆系数视为参数样本,采用基于 K-NN 密度估计的可信度加权与加权中位数融合,对分段参数进行稳健估计,从而抑制异常分段对全局估计结果的拉偏,获得稳定的不平衡参数估计。

1.1 I/Q 不平衡参数建模

在所构建的 BTC 微波测量系统中,发射端发射连续波照射到叶片端面并产生回波,回波信号经接收链路与

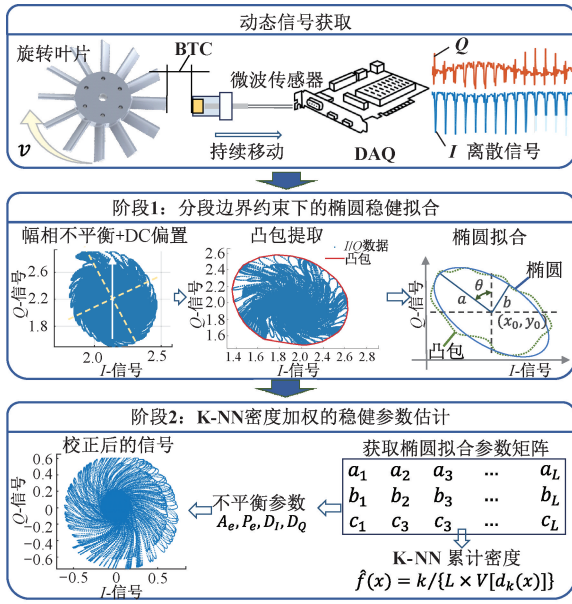


图1 SFK 不平衡参数稳健估计流程

Fig. 1 Flowchart of robust estimation for SFK imbalance parameters

本振在混频器中解调后得到同相与正交通道基带信号 $I(t)$ 、 $Q(t)$ 。理想状态下的两路 $I_0(t)$ 与 $Q_0(t)$ 信号幅值相等且相位差为 90° ，其数学模型可表示为：

$$\begin{cases} I_0(t) = A \cos(\omega_0 t + \varphi_0) \\ Q_0(t) = A \sin(\omega_0 t + \varphi_0) \end{cases} \quad (1)$$

式中： A 为幅值； ω_0 为角频率； φ_0 为初始相位。点集 $(I_0(t), Q_0(t))$ 在坐标系构成以原点为圆心、半径为 A 的圆形轨迹，为相位解调与叶尖间隙计算提供无偏输入。

然而，实际测量受通道相位延迟、混频器正交非理想以及噪声/杂波反射等影响，实际 I/Q 信号存在直流偏置与幅值不平衡，导致其轨迹由圆退化为偏心椭圆，从而引入系统性相位估计误差并降低 BTC 解调精度。设 A_e 为幅值不平衡 ($A_e = A_0/A_I$)， P_e 为相位偏差， D_I 和 D_Q 分别为 I/Q 通道直流偏置，则实际 I/Q 信号：

$$I(t) = A_I \cos\left[\frac{4\pi}{\lambda}x(t) + \varphi_0\right] + D_I \quad (2)$$

$$Q(t) = A_Q \sin\left[\frac{4\pi}{\lambda}x(t) + \varphi_0 + P_e\right] + D_Q \quad (3)$$

式中： λ 为载波波长； $x(t)$ 为叶端与传感器间的间隙。

1.2 分段稳健边界建模

为获取叶片动态旋转及噪声扰动下的稳定几何约束，采用分段处理结合凸包边界提取的策略，对 I/Q 轨迹进行稳健建模。其核心思想为在滑动窗口内对局部 I/Q 点集提取外轮廓，用边界点参与后续拟合，从而降低非均匀采样、瞬态扰动与噪声对拟合参数的影响。

本文采用基于极角排序的扫描方式实现凸包提取：

对任意3点 $P_u(x_u, y_u)$ 、 $P_v(x_v, y_v)$ 、 $P_w(x_w, y_w)$ ，利用叉积符号判断点 P_w 相对于 $P_u P_v$ 的位置，剔除边界内部点，获得凸包边界点序列：

$$\ell_{uvw} = \text{cross}(P_u P_v, P_u P_w) \quad (4)$$

同时，以起始点 $P_0(x_0, y_0)$ 为基准计算各点极角并排序：

$$\theta_u = \text{atan2}(y_u - y_0, x_u - x_0), \theta_u \in (-\pi, \pi] \quad (5)$$

式中： $\text{cross}(\alpha, \beta)$ 表示二维向量叉积的标量结果，叉积 ℓ_{uvw} 用于判断点 P_w 相对于 $P_u P_v$ 的位置； $\text{atan2}(\cdot)$ 为反正切操作，返回点与 x 轴的夹角。

对离散 I/Q 信号 $I[j]$ 、 $Q[j]$ ($j = 1, 2, \dots, N$) 进行分段处理。采用滑动窗口方式将整体信号划分为 L 段，第 i 段信号记为 (I_i, Q_i) ，其表达式为：

$$\begin{cases} I_i[s] = I[s + (i-1)h] \\ Q_i[s] = Q[s + (i-1)h] \end{cases} \quad (6)$$

式中： $s = 1, 2, \dots, n$ ， n 为每段固定采样点数； $i = 1, 2, \dots, L$ ； h 为滑动步长；则分段总数为 $L = (N - n)/h + 1$ 。

为兼顾局部拟合稳定性与动态变化跟踪能力，定义基础分段长度为 $n_0 = 2\pi f_s/\omega_0$ ，其中 f_s 为采样频率， ω_0 为 I/Q 信号等效角频率。在滑台匀速运动实验条件下，由式(2)和(3)可得 $\omega_0 = 4\pi v/\lambda$ 。其中， v 为滑台运动速度， λ 为波长。因此， n_0 表示一个周期对应的采样点数。各分段提取的凸包边界点作为椭圆拟合的有效数据集，过程示意如图2所示。

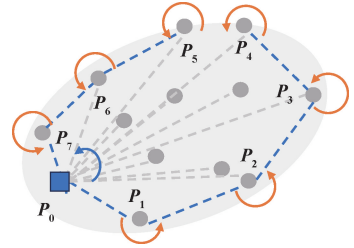


图2 稳健边界建模原理

Fig. 2 Diagram of robust boundary modeling

在第 i 个分段内， I/Q 轨迹可由一般椭圆曲线描述：

$$I_{i,s}^2 + a_i I_{i,s} Q_{i,s} + b_i Q_{i,s}^2 + c_i I_{i,s} + d_i Q_{i,s} + e_i = 0 \quad (7)$$

其中， $s = 1, 2, \dots, n$ ； $i = 1, 2, \dots, L$ ；椭圆拟合系数向量记为 $\mathbf{X}_i = [a_i, b_i, c_i, d_i, e_i]^T$ ；将分段数据展开为矩阵形式，构造设计矩阵 $\mathbf{M}_i$ 和目标向量 $\mathbf{G}_i$ ：

$$\begin{cases} \mathbf{M}_i = \begin{bmatrix} I_{i,1} Q_{i,1} & Q_{i,1}^2 & I_{i,1} & Q_{i,1} & 1 \\ I_{i,2} Q_{i,2} & Q_{i,2}^2 & I_{i,2} & Q_{i,2} & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ I_{i,n} Q_{i,n} & Q_{i,n}^2 & I_{i,n} & Q_{i,n} & 1 \end{bmatrix} \\ \mathbf{G}_i = - \begin{bmatrix} I_{i,1}^2 \\ I_{i,2}^2 \\ \vdots \\ I_{i,n}^2 \end{bmatrix}^T \end{cases} \quad (8)$$

基于正则化最小二乘求解分段椭圆拟合参数:

$$(\mathbf{M}_i^T \mathbf{M}_i) \mathbf{X}_i = \mathbf{M}_i^T \mathbf{G}_i \quad (9)$$

$$\mathbf{X}_i = (\mathbf{M}_i^T \mathbf{M}_i + \mathbf{I})^{-1} \mathbf{M}_i^T \mathbf{G}_i \quad (10)$$

其中, $\mathbf{M}_i^T$ 表示 $\mathbf{M}_i$ 的转置; $(\cdot)^{-1}$ 表示矩阵的逆; $\mathbf{I}$ 为单位矩阵; 通过该过程, 可以获得第 i 个分段椭圆拟合参数 $\mathbf{X}_i = [a_i, b_i, c_i, d_i, e_i]^T$ 。

1.3 稳健椭圆拟合参数估计

考虑到转子轻微振动、端面散射差异及噪声扰动使拟合参数呈现随机波动与少量异常值, 故采用 K-NN 密度估计^[21-22]对参数样本的局部可信度进行度量。

对任一椭圆拟合系数, 设其在 L 个分段中形成样本集合 $\{\mathbf{x}_i\}_{i=1}^L$ 。对任意样本点 x , 记其到第 k 个最近邻的距离为 $d_k(x)$, 则 K-NN 密度估计为:

$$\hat{f}(x) = \frac{k}{L \cdot V(d_k(x))} \quad (11)$$

$$V(d_k(x)) = C_d \cdot (d_k(x))^d \quad (12)$$

其中, $V(d_k(x))$ 是以 x 为中心、半径为 $d_k(x)$ 的邻域体积; C_d 是与维度 d 相关的常数。近邻数 k 用于控制局部邻域范围, 其取值影响密度估计的平滑程度及对局部样本分布特征的敏感性。

样本局部密度 $\hat{f}(x_i)$ 可视为可信度权重:

$$\begin{cases} w_i = \hat{f}(x_i) \\ \bar{w}_i = \frac{w_i}{\sum_{j=1}^L w_j} \end{cases} \quad (13)$$

式中: w_i 表示样本 x_i 的局部密度权重; $\bar{w}_i$ 为归一化权重。

将样本按数值从小到大排序, 得到顺序统计量 $x_{(1)} \leq x_{(2)} \leq \dots \leq x_{(L)}$, 设 $\pi(\cdot)$ 为对应的排序索引置换, 使得 $x_{(i)} = x_{\pi(i)}$, 则排序后样本对应的权重定义为

$\bar{w}_{(i)} = \bar{w}_{\pi(i)}$, 据此构造加权累积分布函数:

$$T_a(x) = \sum_{i: x_{(i)} \leq x} \bar{w}_{(i)} \quad (14)$$

为提取稳健的椭圆拟合参数估计值, 本文采用密度加权中位数, 即使累计权重首次达到 0.5 的样本点:

$$x_m = x_{(j^*)}, j^* = \min\{j: T_a(x_{(j)}) \geq 0.5\} \quad (15)$$

式中: x_m 即拟合参数的稳健估计值。

此后, 将所有分段椭圆拟合参数集合 $\{\mathbf{X}_i\}_{i=1}^L$ 视为参数样本, 对各系数分别执行上述稳健估计过程, 得到拟合系数 $\tilde{a}, \tilde{b}, \tilde{c}, \tilde{d}$ 和 $\tilde{e}$ 。再依据 EC 校正方法^[11]将椭圆系数映射为 I/Q 不平衡参数 $\hat{U} = (A_e, P_e, D_I, D_Q)$, 得到:

$$A_e = \sqrt{1/\tilde{b}} \quad (16)$$

$$P_e = -\sin^{-1}(\tilde{a}/2\sqrt{\tilde{b}}) \quad (17)$$

$$D_I = \frac{\tilde{a}\tilde{d} - 2\tilde{b}\tilde{c}}{4\tilde{b} - \tilde{a}^2} \quad (18)$$

$$D_Q = \frac{\tilde{a}\tilde{c} - 2\tilde{d}}{4\tilde{b} - \tilde{a}^2} \quad (19)$$

2 旋转工况下 BTC 测量

2.1 基于校正 I/Q 信号的 BTC 测量

按所提方法估计参数 $\hat{U}$ 后, 对信号 I/Q 进行校正:

$$\begin{bmatrix} I_c(t) \\ Q_c(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_e & 0 \\ -A_e \tan(P_e) & \sec(P_e) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} I(t) - D_I \\ Q(t) - D_Q \end{bmatrix} \quad (20)$$

其中, $I_c(t)$ 、 $Q_c(t)$ 为校正后的同相与正交信号。对校正后的轨迹进行反正切相位解调, 得间隙位移为:

$$x(t) = \frac{\lambda}{4\pi} \text{unwrap}[\text{atan2}(Q_c(t), I_c(t))] \quad (21)$$

式中: $\text{unwrap}[\cdot]$ 为平移相位角操作。

2.2 超半波长 BTC 连续解调

相位差测距法量程受限于半波长, 当同一叶片在相邻周期的间隙变化超过半波长时, 相位将折叠到 $(-\pi, \pi)$ 范围并出现跳变, 如图 3 所示, 导致基于式 (21) 的解调失效。

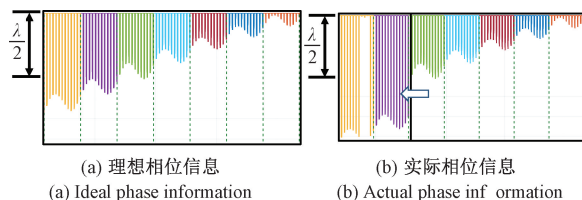


图3 相位跳变现象分析

Fig. 3 Analysis of the phase jump phenomenon

为此, 本文提出基于棣莫弗定理的相位累积修正方法, 对校正后的信号构造复信号:

$$z(t) = I_c(t) + jQ_c(t) = \xi(t) e^{j(\phi_d(t) + \phi_0)} \quad (22)$$

其中, $\xi(t)$ 为包络幅值; $\phi_d(t)$ 为与间隙 $x(t)$ 对应的动态相位项; ϕ_0 为初始相位。对复信号施加相位旋转:

$$z'(t) = z(t) e^{-j\Delta\phi} \quad (23)$$

式 (23) 将信号整体相位平移 $\Delta\phi$, 从而实现不同周期期间 BTC 区域相位对齐, $\Delta\phi$ 对应的等效位移平移量为:

$$\Delta x = (\lambda/4\pi) \cdot \Delta\phi \quad (24)$$

通过对各周期 BTC 片段施加相位平移, 将跨周期相位跳变转化为可累积的位移增量, 从而实现超半波长连续解调。首先对各 BTC 片段进行粗相位对齐: 在提取到的 BTC 区域内, 计算其代表相位记为 ϕ_p , 并设定目标对齐相位 ϕ_{ref} 。其中, ϕ_{ref} 为粗相位对齐阶段采用的固定参

考相位,仅引起整体相位基准平移,不改变相位差累积相对变化。本实验取 $\phi_{\text{ref}} = 0\text{rad}$, 则有:

$$\Delta\phi_p = \phi_p - \phi_{\text{ref}}, \phi_p = \text{atan2}(\text{Im}\{z_p\}, \text{Re}\{z_p\}) \quad (25)$$

对第 p 个 BTC 片段,在前一步已校正复信号的基础上,旋转 $e^{-j\Delta\phi_p}$ 完成初步对齐。该过程采用递推更新方式粗相位对齐,避免原始相位跳变误差传至后续片段。随后针对同一叶片跨多个周期的 BTC 曲线,采用相关匹配估计残余位移偏移量并进行精细修正,从而实现超半波长范围内的连续 BTC 变化重构,如算法 1 所示。

3 试验验证

3.1 试验系统搭建与配置

为验证所提方法的有效性,搭建 120 GHz 微波测量试验系统,如图 4 所示,由旋转叶片、三维微控平台、电控位移滑台、控制器、信号采集卡以及激光位移传感器构成。旋转叶片由电机驱动实现转动,通过 ADC 数据采集系统获取 I/Q 信号,采样频率为 100 kHz。通过电控滑台实现传感器沿径向匀速移动,以获取矩形叶片与曲面叶片在不同间隙下的动态回波数据。

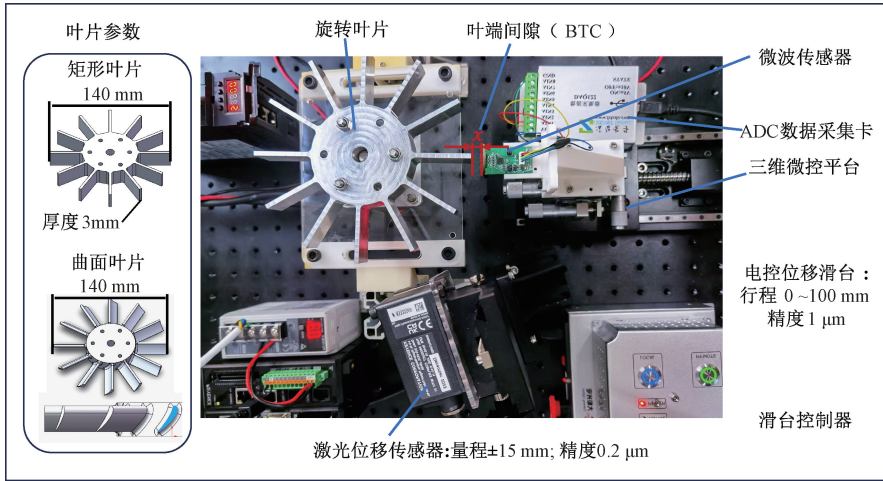


图4 微波测量系统

Fig. 4 Experimental setup of the microwave measurement system

3.2 微波信号动态校正与位移测量

电控滑台以 1.68 mm/s 的恒定速度驱动微波传感器沿径向远离叶片,同时采集信号并进行失真分析。针对矩形叶片和曲面叶片分别开展试验,以验证所提方法对不同端面形貌的适用性。

根据 1.2 节的分段建模策略,经推导实验中分段基础长度 $n_0 = \lambda f_s / 2v$, 其中 $f_s = 100\text{ kHz}$, $v = 1.68\text{ mm/s}$, 窗口长度为 $4n_0$, 步长为 $n_0/4$; 采用 SFK 方法处理动态 I/Q 信

算法 1:超半波长 BTC 连续位移解调

输入:校正后信号 I_c, Q_c ; 波长 λ ; 叶片数 N_b ; 目标叶片 D_x ;

输出:连续位移 X_{final} ;

```

1:  $z(t) = I_c(t) + jQ_c(t)$  //构造复信号
2: Peak_Cell =  $\emptyset$  // 定义 BTC 对齐片段集合
3: For each BTC segment  $k$  do: // Step1 初步相位对齐
4:  $z'_p = z_p \cdot \exp(-j \cdot (\phi_p - \phi_{\text{ref}}))$ 
5: Peak_Cell[ $k$ ] =  $(\lambda/4\pi) \cdot \text{atan2}(\text{Im}\{z'_k\}, \text{Re}\{z'_k\})$ 
6: End For
7:  $\text{Dp}[n] = \text{Peak\_Cell}[D_x + (n-1)N_b]$  //Step2 跨周期修正
8: For  $n = 2$  to  $M$  do:
9:  $\Delta x_{\text{res}}[n] = \text{XCorr}(\text{Dp}[n], \text{Dp}[n-1])$  //互相关算偏移量
10: End For
11:  $X_{\text{cumu}}[1] = 0$  // Step3 累计修正
12:  $X_{\text{cumu}}[n] = X_{\text{cumu}}[n-1] + \Delta x_{\text{res}}[n]$ 
13:  $X_{\text{final}} = \text{concat}(\text{Dp}[n] + X_{\text{cumu}}[n])_{n=1, \dots, M}$  //连续位移
14: return  $X_{\text{final}}$ 

```

号后,分段窗口中最大拟合均方根误差 (root mean square error, RMSE) 为 0.004, 平均 RMSE 为 0.001, 表明该方法在动态条件下具有较好的稳定性。根据式 (7) ~ (10) 可得椭圆拟合参数序列 $\mathbf{X}_i = [a_i, b_i, c_i, d_i, e_i]^T$, 如图 5(a) 所示, 依据式 (16) ~ (19) 将各分段拟合参数映射为不平衡参数序列 $\hat{\mathbf{U}} = (A_e, P_e, D_I, D_Q)$ 序列, 如图 5(b) 所示。受端面反射特性变化与环境噪声影响, 参数存在一定波动, 若采用简单的算术平均值, 极易受异常值的干扰。

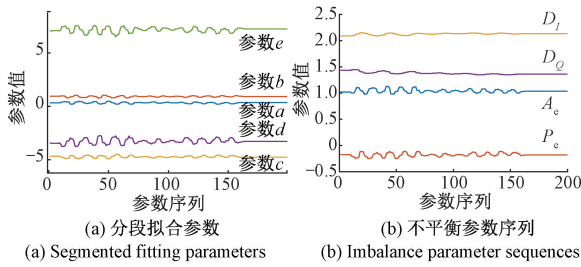


图5 参数序列波动情况

Fig. 5 Fluctuation of the parameter sequence

为获取稳健估计参数,本文采用 K-NN 密度估计对参数序列进行概率密度建模。图6展示了椭圆拟合参数(a, b, c, d, e)的密度分布结果,综合考虑样本数量、样本分布特点以及噪声水平,并结合近邻数稳健性分析,本文取 $k = 50$;经验证当 $k \in [30, 80]$ 时,各参数估计值随 k 变化平缓,说明该方法在一定范围内对 k 不敏感。该策略能够提取参数样本主聚集区的代表值,并抑制少量异常分段的影响。

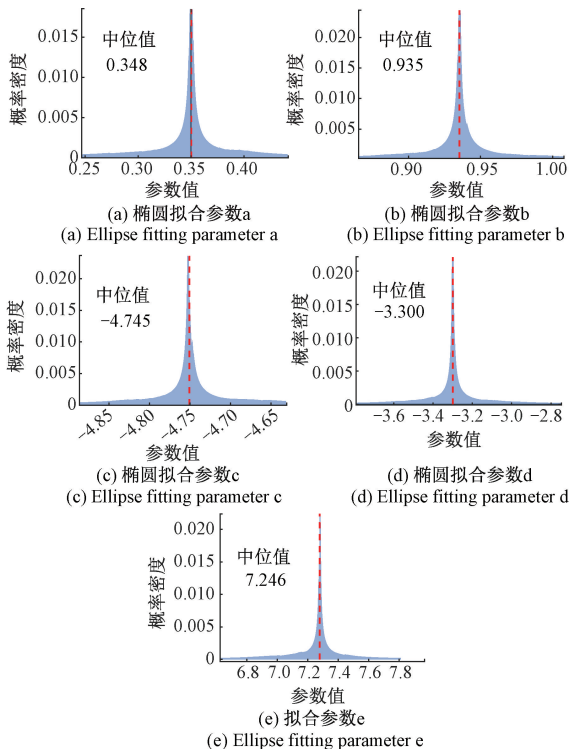
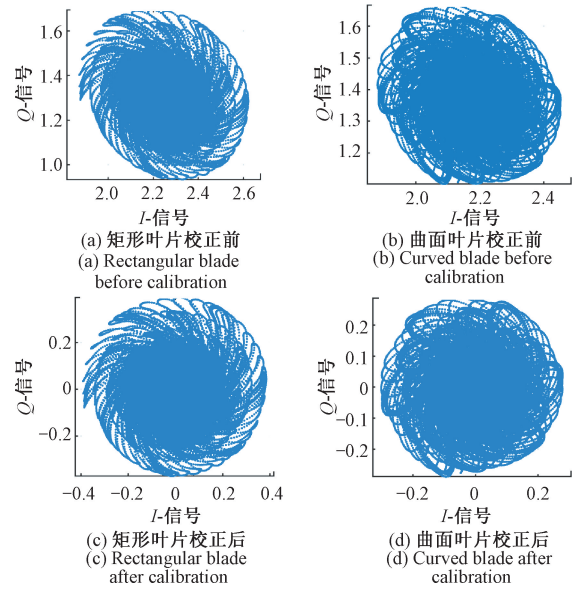


图6 椭圆拟合参数的密度分布与估计值提取结果

Fig. 6 Density distributions of ellipse fitting parameters and the extracted estimation results

经过式(20)的校正后, I/Q 轨迹对比如图7所示。原始信号呈现明显直流偏移、幅相不平衡;校正后,不论是矩形叶片还是曲面叶片,其 I/Q 轨迹畸变均得到有效补偿,表明所提 SFK 方法能适应不同叶片端面形貌带来的信号失真,实现动态工况下的在线校正。

图7 校正前后 I/Q 轨迹对比Fig. 7 Comparison of I/Q trajectories before and after calibration

完成动态校正后,采用文献[16]的定位方法进行 BTC 提取,即利用校正信号能量 $I^2 + Q^2$ 的峰值锁定叶尖经过传感器的瞬时位置。图8展示了传感器静止状态下矩形叶片与曲面叶片的位移提取结果。受转子振动及制造公差影响,不同叶片的原始数据呈现明显个体差异,但校正后信号能稳定反映微小间隙变化。

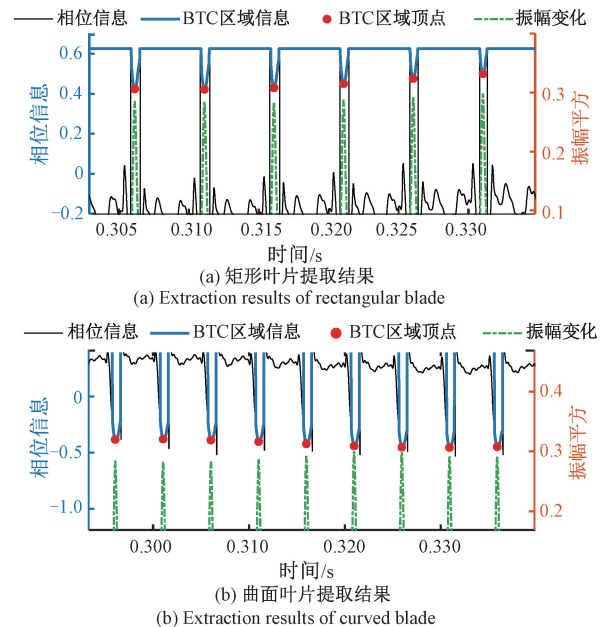


图8 BTC 位移信息提取结果

Fig. 8 BTC displacement information extraction results

为验证所提动态校正方法的精度,将微波测量结果与高精度激光位移传感器测量结果进行了实时对比。以

第一周期内首片叶片的 BTC 为基准,连续记录 3 个旋转周期内所有叶片 BTC 的波动,如图 9 所示。结果表明,微波解调曲线与激光传感器实测位移曲线高度一致;在连续 3 圈动态监测中两者的平均绝对误差为 $1.611\text{ }\mu\text{m}$,最大绝对误差为 $4.77\text{ }\mu\text{m}$,验证了 SFK 动态校正可实现微米级动态测量精度,并显著削弱不平衡参数对位移反演的影响。进一步统计 8 圈测量的重复性误差,其中最大重复性误差为 $0.623\text{ }\mu\text{m}$ 。

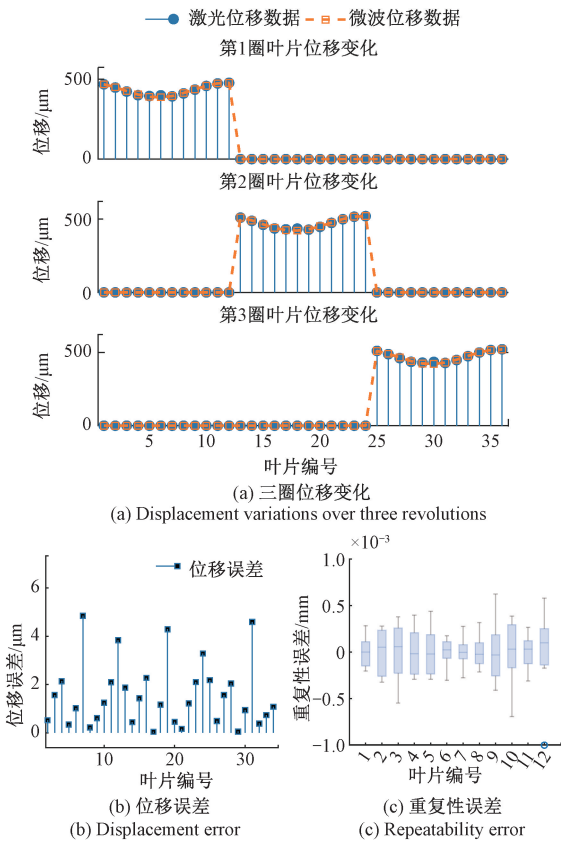


图 9 矩形叶片位移解调

Fig. 9 Displacement demodulation of the rectangular blade

为验证对复杂形貌叶片的适应性,采用相同实验流程对曲面叶片开展实验,结果如图 10 所示。经动态校正后,微波解调位移与激光传感器测量结果仍保持高度一致,平均绝对误差为 $1.563\text{ }\mu\text{m}$,最大绝对误差为 $4.041\text{ }\mu\text{m}$ 。重复性实验表明最大重复性误差仅为 $0.481\text{ }\mu\text{m}$ 。

3.3 超越半波长位移解调验证

为了模拟叶端间隙的大范围动态变化,控制电控滑台驱动微波传感器沿径向后退,在该过程中,由于位移变化超过 $\lambda/2$ 对应的相位区间,直接相位解调会出现相位跳变并导致解调失效。动态校正并使用本文提出的相位累积修正策略,对 12 个叶片的 BTC 区域进行相位对齐与精细补偿,实现动态测量过程中的连续解调。图 11(a)展示了传感器后退过程中 12 个叶片的连续 BTC 变化曲线。结果

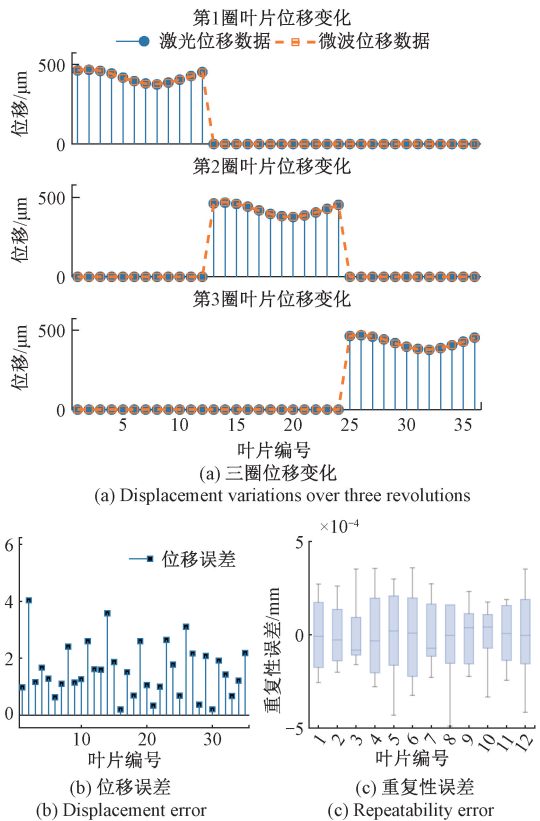
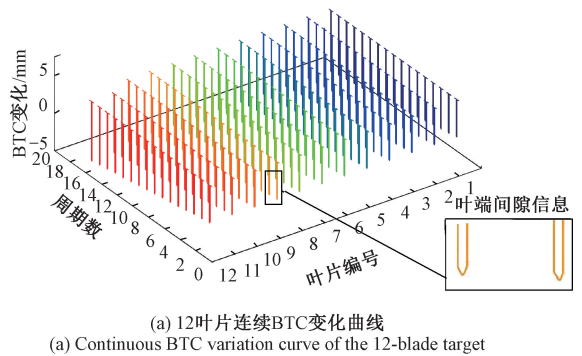


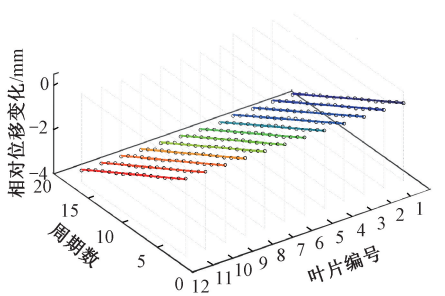
图 10 曲面叶片位移解调

Fig. 10 Displacement demodulation of the curved blade

表明,所提方法能够有效消除相位跳变,在 120 GHz 系统中实现了 5 mm 范围内的平滑连续位移解调。

为进一步评估解调准确性,将 12 个叶片的解调相对位移与滑台实际位移进行对比,如图 11(b)所示,表明解调结果随周期数(即位移增加)呈现较好的线性关系。为排除随机干扰,对 3 次独立重复实验结果进行统计,如表 1 所示,计算得出 12 个叶片在 5 mm 行程内的平均线性度为 99.932% 。其中,数据 3 表现最优,所有叶片的线性度均超过 99.950% 。实验结果验证了所提方法在长行程、超半波长条件下实现 I/Q 校正与 BTC 解调一体化处理的能力,并体现了其在多叶片同步监测场景中的鲁棒性与一致性。





(b) 解调位移线性度分析
(b) Linearity analysis of the demodulated displacement

图 11 超半波长连续位移解调结果

Fig. 11 Continuous displacement demodulation results
beyond the half-wavelength

表 1 3 次独立重复实验下 12 个叶片的位移解调线性度

Table 1 Displacement demodulation linearity for 12 blades
under three independent repeated experiments

(%)			
叶片	实验 1	实验 2	实验 3
B1	99.938	99.943	99.963
B2	99.934	99.946	99.963
B3	99.941	99.920	99.962
B4	99.931	99.836	99.961
B5	99.946	99.784	99.961
B6	99.937	99.772	99.963
B7	99.937	99.814	99.965
B8	99.939	99.862	99.959
B9	99.933	99.924	99.961
B10	99.928	99.936	99.964
B11	99.933	99.934	99.954
B12	99.935	99.932	99.952

4 结 论

本文提出了一种面向动态运行工况的微波叶端间隙动态校正与超半波长连续测量方法,解决了微波 BTC 测量系统中 I/Q 信号直流偏移、幅值-相位不平衡导致的动态校正困难,以及相位差测距法受半波长限制而难以连续解调的问题。通过分段稳健边界建模与 K-NN 密度统计参数估计,实现 I/Q 信号动态不平衡参数的稳健提取与在线补偿;通过基于棣莫弗定理的相位累积修正,解决了位移超过半波长时的相位包裹与跳变问题。实验结果表明:经 SFK 补偿后,微波测量结果与激光位移传感器测量结果的平均绝对误差仅为 $1.611\text{ }\mu\text{m}$,最大重复性误

差为 $0.623\text{ }\mu\text{m}$ 。在 5 mm 连续解调中,全叶片平均解调线性度达到 99.932% ,验证了该方法在多叶片、超半波长动态测量中的鲁棒性与一致性。未来仍需进一步验证该方法在真实发动机转速波动、机械振动等复杂工况下的适应能力,并通过引入振动激励与耦合工况实验,进一步提高方法在叶端间隙稳定测量及间隙-振动协同监测中的工程适用性。

参考文献

[1] 李发富,段发阶,易亮,等. 基于频谱的篦齿轴向窜动与叶尖间隙测量方法 [J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(8) : 261-270.
LI F F, DUAN F J, YI L, et al. Measuring method of axial movement and tip clearance of labyrinth seals based on the amplitude spectrum [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(8) : 261-270.
[2] 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.
[3] FAN W, ZHOU T, MAN J N, et al. A consistent-orthogonal correction method for I/Q imbalance with attenuation modulation and multiple reflections using CW Doppler radar [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2025, 74 : 8004909.
[4] 张济龙,段发阶,牛广越. 基于微波传感器的叶尖间隙与叶尖定时测量 [J]. 控制工程, 2019, 26(7) : 1233-1238.
ZHANG J L, DUAN F J, NIU G Y. Blade tip clearance and blade tip timing measurement based on microwave sensors [J]. Control Engineering of China, 2019, 26(7) : 1233-1238.
[5] PARK B K, BORIC-LUBECKE O, LUBECKE V M. Arctangent demodulation with DC offset compensation in quadrature Doppler radar receiver systems [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2007, 55(5) : 1073-1079.
[6] GUAN SH Y, RICE J A, LI CH ZH, et al. Automated DC offset calibration strategy for structural health monitoring based on portable CW radar sensor [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2014,

- 63(12): 3111-3118.
- [7] TRAVERSO S, ARIAUDO M, FIJALKOW I, et al. Decision-directed channel estimation and high I/Q imbalance compensation in OFDM receivers[J]. IEEE Transactions on Communications, 2009, 57(5): 1246-1249.
- [8] XIONG Y Y, CHEN SH Q, DONG X J, et al. Accurate measurement in Doppler radar vital sign detection based on parameterized demodulation[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2017, 65(11): 4483-4492.
- [9] HOLST T A. Analysis of spatial filtering in phase-based microwave measurements of turbine blade tips[D]. Atlanta: Georgia Institute of Technology, 2005.
- [10] 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. A review of online blade tip clearance measurement technologies for aeroengines[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2022, 43(9): 82-108.
- [11] SINGH A, GAO X M, YAVARI E, et al. Data-based quadrature imbalance compensation for a CW Doppler radar system[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2013, 61(4): 1718-1724.
- [12] WEI C J, XIONG Y Y, LI W T, et al. Vibration measurement and analysis of rotary tools using millimeter-wave sensor[J]. IEEE Sensors Journal, 2024, 24(6): 8962-8971.
- [13] TIAN F Z, ZHU H X, SHI Q X, et al. An FFT-based DC offset compensation and I/Q imbalance correction algorithm for bioradar sensors[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2024, 72(3): 1900-1910.
- [14] 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.
- YANG J S, XU G L, DONG W D, et al. Study on the signal calibration of microwave blade tip clearance sensor[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(10): 193-201.
- [15] LI W T, XIONG Y Y, CHEN P F, et al. Simultaneous measurement of blade tip clearance and blade tip timing with microwave sensor[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2024, 73: 8002412.
- [16] CHEN S S, ZHOU T, FAN W, et al. A novel microwave-based dynamic measurement method for blade tip clearance through nonlinear I/Q imbalance correction[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2025, 224: 112138.
- [17] 樊薇, 陈赛赛, 熊玉勇, 等. 基于RD-S校正的叶端整剖面间隙微波测量方法[J]. 航空学报, 2025, 46(16): 142-156.
- FAN W, CHEN S S, XIONG Y Y, et al. Microwave-based blade tip profile clearance measurement through RD-S correction[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2025, 46(16): 142-156.
- [18] SCHERHAUFL M, HAMMER F, PICHLER-SCHEDER M, et al. Radar distance measurement with Viterbi algorithm to resolve phase ambiguity[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2020, 68(9): 3784-3793.
- [19] GUERZONI G, FAGHAND E, VINCENZI L, et al. A novel Doppler-based phase unwrapping algorithm for mmWave MIMO radars and its application to displacement estimation in structural health monitoring[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2025, 235: 112777.
- [20] 牛广越, 段发阶, 周琦, 等. 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, 43(9): 202-220.
- NIU G Y, DUAN F J, ZHOU Q, et al. A dynamic measurement method of blade tip clearance based on microwave phase difference ranging[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2022, 43(9): 202-220.
- [21] TRAN T N, WEHRENS R, BUYDENS L M C. KNN-kernel density-based clustering for high-dimensional multivariate data[J]. Computational Statistics & Data Analysis, 2006, 51(2): 513-525.
- [22] ZHAO P N, LAI L F. Analysis of KNN density estimation[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2022, 68(12): 7971-7995.

作者简介



沈清澜, 2024 年于江苏大学获得学士学位, 现在江苏大学攻读仪器科学与技术硕士学位, 主要研究方向为信号处理和微波传感。

E-mail: 2212403098@stmail. ujs. edu. cn

Shen Qinglan received her B.Sc. degree from Jiangsu University in 2024. She is currently pursuing her

M. Sc. degree in Instrument Science and Technology at Jiangsu University. Her main research interests include microwave sensing and signal processing.



解骏杰, 2025 年于淮安大学获得学士学位, 现在江苏大学攻读仪器仪表工程硕士学位, 主要研究方向为信号处理与微波感知。

E-mail: 2222503012@stmail. ujs. edu. cn

Xie Junjie received his B. Sc. degree from Huai'an University in 2025. He is currently pursuing his M. Sc. degree in Instrument and Meter Engineering at Jiangsu University. His main research interests include signal processing and microwave sensing.



陈赛赛, 2022 年于江苏大学获得学士学位, 现以硕博连读方式于江苏大学攻读仪器科学与技术专业博士学位, 主要研究方向为信号处理、微波传感。

E-mail: 2112503029@stmail. ujs. edu. cn

Chen Saisai received his B. Sc. degree from Jiangsu University in 2022. He is currently pursuing his Ph. D. degree in Instrument Science and Technology through a successive master-doctor program at Jiangsu University. His main research interests include signal processing and microwave sensing.



韩丽玲, 2019 年于合肥工业大学获得博士学位, 现为江苏大学讲师。主要研究方向为微纳驱动与测试、压电驱动器。

E-mail: llhan@ ujs. edu. cn

Han Liling received her Ph. D. degree from Hefei University of Technology in 2019. She is currently a lecturer at Jiangsu University. Her main research interests include micro-nano actuation and testing, and piezoelectric actuators.



樊薇 (通信作者), 2012 年和 2015 年于苏州大学分别获学士和硕士学位, 2018 年于香港城市大学获博士学位。现为江苏大学机械工程学院教授。主要研究方向为信号处理和机械故障诊断。

E-mail: weifan@ ujs. edu. cn

Fan Wei (Corresponding author) received her B. Sc. and M. Sc. degrees both from Soochow University in 2012 and 2015, respectively, and her Ph. D. degree from City University of Hong Kong in 2018. She is currently a professor with the School of Mechanical Engineering, Jiangsu University. Her main research interests include signal processing and machinery fault diagnosis.