

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2513898

# 基于 V 型电容探头的轴向位移下篦齿叶顶间隙测量方法 \*

李发富<sup>1</sup>, 段发阶<sup>1</sup>, 郭光辉<sup>2</sup>, 滕光蓉<sup>2</sup>, 刘美茹<sup>2</sup>

(1. 天津大学精密测试技术及仪器全国重点实验室 天津 300072; 2. 中国航发四川燃气涡轮研究院 绵阳 621000)

**摘要:**带冠涡轮叶片在热变形、气动载荷等作用下产生的轴向位移会导致电容传感器偏离标定位置,严重降低其篦齿叶顶间隙的测量精度。针对这一问题,提出了一种基于 V 型电容探头的叶顶间隙与轴向位移同步测量方法。首先,通过理论分析揭示了传统圆形芯极电容传感器因对称结构无法识别轴向位移方向的根本缺陷,并推导了轴向位移对叶顶间隙测量误差的非线性影响模型。在此基础上,设计了一种 V 型芯极电容探头,通过其传感信号的电压峰峰值( $V_{pp}$ )与特征波形面积( $S_{cw}$ )参数分离轴向位移与叶顶间隙的耦合效应。其次,建立了  $V_{pp}$  和  $S_{cw}$  与轴向位移、叶顶间隙的二元多项式映射模型,结合自适应滤波和三阶正弦拟合算法,实现了轴向位移和叶顶间隙的精确提取。最后,搭建了篦齿动态实验台,在轴向位移±1 mm、叶顶间隙 0.5~1.5 mm 范围完成了二维标定与验证实验。实验结果表明:叶顶间隙测量精度优于 8 μm,较传统电容法提升 96.8%;轴向位移测量精度为 21.6 μm,且同步实现了位移方向辨识。此外,与传统圆形芯极探头对比实验显示,叶顶间隙测量误差由 0.25 mm 降至 8 μm,验证了所提方法的有效性。该方法为轴向位移工况下的带冠叶片动态间隙监测提供了可靠解决方案,对航空发动机智能运维与主动间隙控制技术发展具有重要工程意义。

**关键词:**叶顶间隙;轴向位移;带冠涡轮叶片;篦齿;电容传感器

中图分类号: TH69 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 460. 40

## Measurement method for labyrinth tip clearance under axial displacement based on a V-shaped capacitive probe

Li Fafu<sup>1</sup>, Duan Fajie<sup>1</sup>, Guo Guanghui<sup>2</sup>, Teng Guangrong<sup>2</sup>, Liu Meiru<sup>2</sup>

(1. State Key Lab of Measuring Technology and Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072, China;  
2. AECC Sichuan Gas Turbine Establishment, Mianyang 621000, China)

**Abstract:** Thermal deformation and aerodynamic loads cause axial displacement of shrouded turbine blades, resulting in capacitive sensors deviating from their calibrated positions and thus substantially diminishing the accuracy of labyrinth tip clearance measurements. To tackle this challenge, this study introduces a synchronous measurement method for blade tip clearance and axial displacement using a V-shaped capacitive probe. Initially, theoretical analysis highlights the inherent limitation of traditional circular-core capacitive sensors in detecting the direction of axial displacement due to their symmetrical design, and a nonlinear model is developed to quantify the measurement error induced by axial displacement on blade tip clearance. Subsequently, a V-shaped core capacitive probe is proposed to decouple axial displacement effects from tip clearance measurements by leveraging characteristic waveform parameters such as peak-to-peak voltage ( $V_{pp}$ ) and waveform area ( $S_{cw}$ ). A binary polynomial mapping model is established to associate these parameters with blade tip clearance and axial displacement values. By integrating adaptive filtering and a third-order sinusoidal fitting algorithm, accurate extraction of both parameters is achieved. A dynamic experimental platform is built, and two-dimensional calibration and validation are performed within axial displacement ranges of ±1 mm and tip clearance from 0.5 to 1.5 mm. The results demonstrate that the blade tip clearance measurement achieves an accuracy better than 8 μm—an improvement of 96.8% compared to traditional capacitive methods—

收稿日期:2025-04-08 Received Date: 2025-04-08

\* 基金项目:国家自然科学基金项目(U2241265, 92360306)、国家科技重大专项(J2022-V-0005-0031)、中国航发四川燃气涡轮研究院外委课题项目(GJCZ-0202-2024-0006)、天津市全国重点实验室重大专项(24ZXZSS00290)资助

while axial displacement is measured with an accuracy of 21.6  $\mu\text{m}$ , including directional identification. Comparative tests with conventional circular-core probes reveal a reduction in tip clearance measurement error under axial displacement from 0.25 mm to 8  $\mu\text{m}$ , validating the effectiveness of the proposed approach. This method offers a robust solution for real-time monitoring of shrouded blade tip clearance under axial displacement, providing significant engineering benefits for intelligent engine operation and active clearance control development.

**Keywords:** blade tip clearance; axial displacement; shrouded turbine blades; labyrinth seals; capacitive sensors

## 0 引言

带冠涡轮叶片是航空发动机、汽轮机、燃气轮机等重大旋转设备的核心部件,其通过叶冠结构显著提升了气动效率并抑制了叶片振动问题<sup>[1-2]</sup>。叶冠表面封严篦齿的设计进一步降低了气体泄漏(二次损失)<sup>[3]</sup>,但篦齿端面至机匣内壁的径向距离,即叶顶间隙(blade tip clearance,BTC)的动态变化直接影响涡轮效率与运行安全<sup>[4-5]</sup>。研究表明,BTC 过大会导致气动效率下降<sup>[6]</sup>,而 BTC 过小则会引发叶顶与机匣的碰撞风险<sup>[7]</sup>。因此,BTC 的实时高精度测量成为发动机状态监测与智能运维的关键技术<sup>[8]</sup>。

现有 BTC 测量方法中,电容法因简单、可靠、易于安装和维护、耐高温和宽带宽等优势成为主流方案<sup>[8]</sup>。然而,带冠叶片在安装偏差、热变形、气动载荷等作用下产生的轴向位移(axial displacement,AD)会导致电容传感器偏离标定位置,造成严重 BTC 测量误差<sup>[9]</sup>。传统圆形芯极电容传感器因对称结构无法识别 AD 方向,测量过程中需预设 AD 为 0,严重制约了实际工程应用的可靠性<sup>[10]</sup>。近年来,国内外学者针对 AD 与 BTC 同步测量问题提出了部分改进方案:Kwapisz 等<sup>[11]</sup>通过多位置微波传感器校准补偿 AD,但需复杂的现场标定流程;Borovik 等<sup>[12]</sup>利用涡流传感器聚类分析实现多参数测量,但需多探头协同且精度受限;薛志飞等<sup>[13-14]</sup>将电容传感器芯极设计成矩形以抑制 AD 的影响,效果有限且无法测量 AD。李发富等<sup>[5]</sup>提出基于频谱的 AD 与 BTC 同步检测方法,但频谱泄漏会严重影响测量精度。此外,Mohamed 等<sup>[15-17]</sup>基于叶尖定时技术研究了 AD 对叶片振动的影响,但未涉及 BTC 测量。上述方法普遍存在精度不足、复杂度高或适应性差等缺陷,难以满足带冠叶片动态监测的严苛需求。

针对上述瓶颈,提出一种基于 V 型芯极电容探头的 BTC 与 AD 同步测量方法,核心创新在于:1)设计了 V 型芯极结构,通过特征波形参数峰峰值(peak-to-peak voltage, $V_{pp}$ )与特征波形面积(characteristic waveform area, $S_{cw}$ )分离 AD 与 BTC 的耦合效应;2)建立二元多项式标定模型,突破传统单变量线性标定的局限性;3)结合自适应滤波与三阶正弦拟合算法,将 BTC 测量精度提升至

8  $\mu\text{m}$ (AD 为  $\pm 1 \text{ mm}$  时)。提出的方法不仅突破了传统电容传感器因 AD 导致的测量失效问题,还实现了 AD 与 BTC 的同步高精度测量,为带冠涡轮叶片动态监测与智能运维提供了新的技术手段。

文章首先介绍了新技术的原理和方法,包括问题描述、测量原理、探头参数优化和信号处理方法。其次,介绍了实验装置,进行了标定和各项验证并进行了结果展示。最后,总结了本文的主要工作、创新点和展望。

## 1 模型和方法

### 1.1 问题描述

本节主要分析带冠叶片发生 AD 时对 BTC 测量的影响。

如图 1(a)所示,带冠叶片主要由叶片、叶冠、以及篦齿组成。其 BTC 实际上是篦齿端面到机匣内壁的径向距离。测量时,带冠叶片整体绕轴旋转,篦齿端面扫过电容传感器形成电容器,其容值通过调理、采集模块转换为电压量,通过该电压量的峰峰值  $V_{pp}$  即可得到带冠叶片的 BTC,其中  $V_{pp}$  和 BTC 的关系系数通过标定获取。

由于轴向载荷、装配误差、热应力等综合因素,BTC 测量过程会发生 AD,篦齿和传感器的结构参数和相对位置关系如图 1(b)所示,根据平行平板电容原理, $V_{pp}$  和 BTC 的关系可以表示为:

$$\lambda \varepsilon \left( \frac{\int_{-w_1/2+ad}^{w_2-w_1/2+ad} \sqrt{R_c^2 - y^2} dy}{btc} - \frac{\int_{-w_1/2+ad}^{w_1/2+ad} \sqrt{R_c^2 - y^2} dy}{btc + h} \right) \quad (1)$$

式中: $\lambda$  是调理模块放大倍数; $\varepsilon$  是介电常数; $w_2, w_1$  是篦齿厚度; $h$  是篦齿凹槽深度(凹槽存在于带冠叶片整圈篦齿的对称位置,扫过传感器时能产生类似自由叶片那样的高信噪比信号,本研究称这些位置为“类自由叶片”,对应的信号波形成为特征波形); $R_c$  是电容传感器芯极半径; $ad$  是 AD 的值; $btc$  是 BTC 的值。除了  $ad$  和  $btc$ ,其他都是常量。可见,AD 通过改变平板电容有效面积影响了 BTC 的测量精度,而带冠叶片的篦齿轴向纤薄,有效面积对 AD 非常敏感,导致 AD 对其 BTC 测量影响更甚。

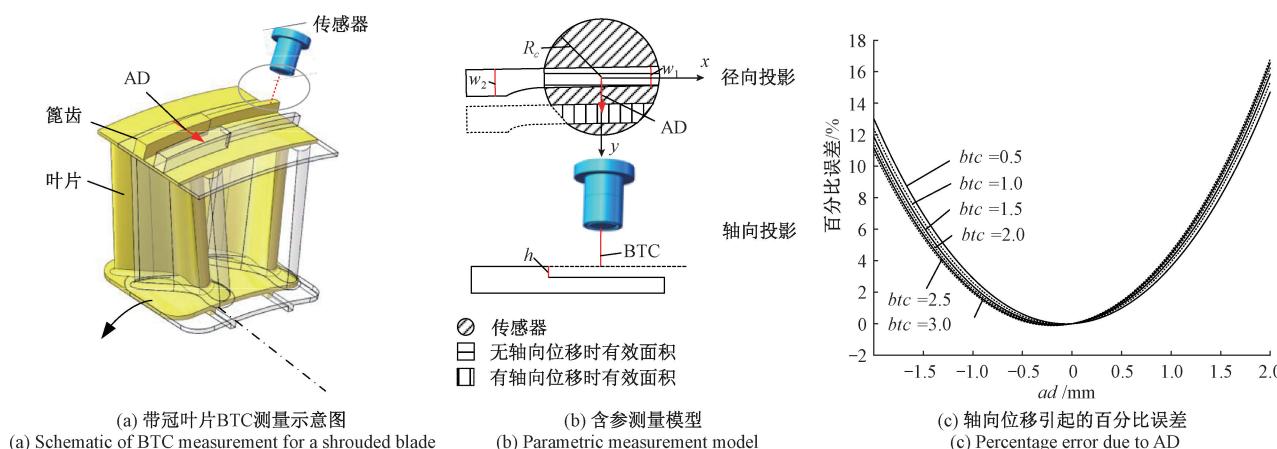


图1 圆形芯极探头 BTC 测量模型及误差

Fig. 1 Measurement model and error analysis of circular core probe BTC

为了量化这一误差,令  $ad=0$  时表示  $V_{pp}$  和 BTC 的标定关系式。则 AD 引起  $V_{pp}$  的百分比误差  $E_p$  为:

$$E_p = \frac{V_{pp}|_{ad} - V_{pp}|_{ad=0}}{V_{pp}|_{ad=0}} \times 100\% \quad (2)$$

根据式(1)、(2)对 AD 引起的误差进行数值仿真分析,篦齿和传感器相关参数如表 1 所示,  $btc$  范围为 0.5~3 mm。结果如图 1(c)所示。

表 1 相关参数  
Table 1 Related parameters

参数	值	参数	值
$\lambda$	1	$\varepsilon$	1 F/m
$w_2$	1.6 mm	$w_1$	0.8 mm
$h$	1.5 mm	$R_c$	4 mm

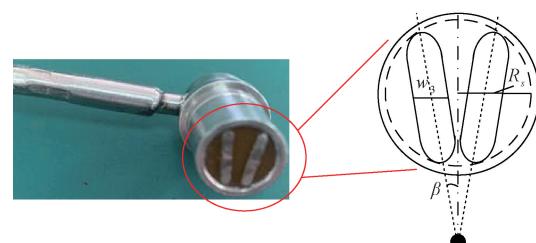
可以得到的结论为:综合考虑两个方向,BTC 和 AD 越大,引起的误差越大, $\pm 1$  mm  $ad$  下误差大约为 4%,而当  $ad$  增加到  $\pm 2$  mm,误差将快速增加到 16% 左右。不同方向等大的  $ad$  引起的误差不完全一致,和标定位置选取有关。并且,实际测量过程中同一大小的误差是无法确定叶片 AD 的方向的,这一致命的缺陷导致传统电容结构无法解决 AD 条件下的 BTC 测量问题。

## 1.2 传感器结构及最优化参数

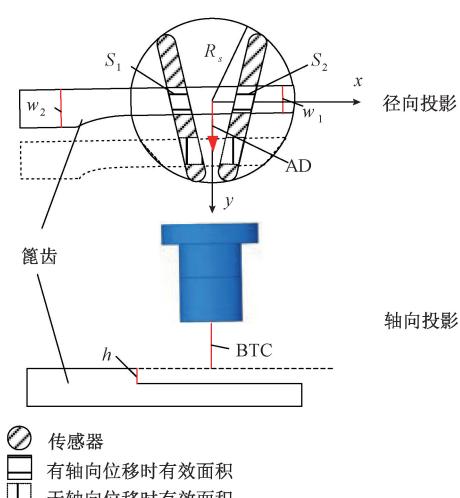
1.1 节的描述说明 AD 对 BTC 测量的影响本质上是 AD 导致电容传感器偏离标定位置,使得传感器和篦齿有效面积发生了改变。为了克服这一问题并同时实现 AD 的测量,提出了一种结构新颖的 V 型电容传感器,主要由 V 型芯极、内垫环和外壳组成,与传统圆形芯极电容探头最大的不同之处就在于芯极呈现一定夹角的 V 型,其结构和相关参数如图 2(a)所示。直观上,提出

的新型探针的有效面积不会像传统电容探针那样因带冠叶片的 AD 而改变,保证了 BTC 测量精度,同时,转子 AD 引起 V 型芯极两部分有效面积的距离发生线性变化,并且能通过变化的正负识别 AD 的方向。后续会说明如何解算。

V 型芯极电容探针在存在 AD 时的探测模型如图 2(b)所示,与 1.1 节类似,由双平板电容公式和叠加



(a) V型电容探头及参数  
(a) V-shaped capacitive probe and parameters



(b) V型探头BTC测量模型  
(b) BTC measurement model of the V-shaped probe

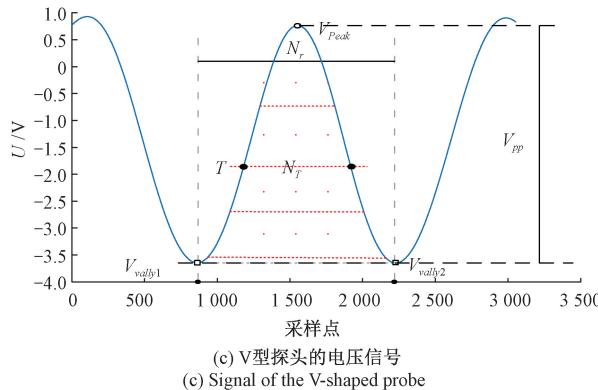


图 2 V型电容探头 BTC 测量模型及输出电压信号

Fig. 2 Measurement model of the V-shaped capacitive probe and its output voltage signal

原理可得采集的 V 型探头调理电压信号  $U$  可表示为:

$$U = U_{S_1} + U_{S_2} = \frac{\lambda \varepsilon_0 \varepsilon_r S_1}{d_1} + \frac{\lambda \varepsilon_0 \varepsilon_r S_2}{d_2} \quad (3)$$

式中:  $\lambda$  是调理模块放大倍数;  $\varepsilon_0$ 、 $\varepsilon_r$  是真空介电常数和相对介电常数;  $S_1$  和  $S_2$  表示 V 型探头和篦齿间的两块有效面积;  $d_1, d_2$  是有效面积  $S_1$  和  $S_2$  对应的径向间隙, 等于  $btc$  或  $btc+h$ , 其中  $h$  是篦齿凹槽深度。

则  $V_{pp}$  可表示为:

$$V_{pp} = 2\lambda \varepsilon_0 \varepsilon_r \left( \frac{w_2 w_3}{btc} - \frac{w_1 w_3}{btc+h} \right) \quad (4)$$

式中:  $w_1, w_2$  是篦齿厚度,  $w_3$  是 V 型芯极宽度, 均为常数。可见  $V_{pp}$  的大小和  $ad$  无关, 且  $btc$  与  $V_{pp}$  一一对应, 通过标定二者关系曲线即可经由  $V_{pp}$  实现 BTC 的测量。

另一方面, AD 引起 V 型芯极有效面积  $S_1$  和  $S_2$  间的周向距离变化为:

$$d_s = 2\tan(\beta)ad + d_0 \quad (5)$$

式中:  $d_0$  是标定位置  $S_1$  和  $S_2$  间的周向距离; 同时,  $d_s$  也可以表示为篦齿扫过 V 型芯极有效面积  $S_1$  和  $S_2$  的距离, 即:

$$d_s = \frac{\omega_t R N_r}{f_s} \quad (6)$$

式中:  $R$  是篦齿半径;  $N_r$  是篦齿接近和远离传感器使得电压信号为阈值  $T$  所对应的采样点数(如图 2(c) 中  $N_r$  所示);  $f_s$  是采样率;  $\omega_t$  表示对应的未知瞬时角速度, 可用相邻两个篦齿的平均角速度代替, 可表示为:

$$\omega_t = \frac{\gamma}{t} = \frac{\gamma f_s}{N_r} \quad (7)$$

式中:  $N_r$  表示篦齿接近和远离传感器时电压信号左右两个波谷间的采样点数(如图 2(c) 中  $N_r$  所示), 因谷值间真实角度未知, 因此式(7)中乘了角度系数  $\gamma$ 。

联立式(5)~(7)可得:

$$ad = \frac{R}{2\tan\beta} \frac{N_r}{f_s} - \Delta_0 + \delta = \frac{R\gamma}{2\tan\beta} \frac{N_r}{N_r} - \Delta_0 + \delta \quad (8)$$

式中:  $\Delta_0 = d_0/(2\tan\beta)$  表示无 AD 时的偏置常量;  $\delta$  表示整个测量过程引入的噪声总和。式(8)表明通过获取  $N_r/N_r$  即可实现 AD 的测量, 同时考虑到噪声的随机性, 因此对整个特征波形区域内所有  $T$  对应的  $N_r$  进行积分消噪, 以提高测量 AD 的准确性和稳定性。

$$ad = k_a \sum \frac{N_r}{N_r} - \Delta_0 = k_a S_{cw} - \Delta_0 \quad (9)$$

式中: 积分项  $\sum N_r$  表示电压信号在  $N_r$  内的面积, 将  $\sum N_r/N_r$  定义为  $S_{cw}$ ;  $k_a$  表示式(9)中的总常数系数。 $k_a$  和  $\Delta_0$  都可以通过校准来确定。

### 1.3 V型探头参数优化

1.2 节利用平行平板理论建立了 V 型探头测量 BTC 的数学模型。这为 V 型电容传感器的优化设计提供了理论依据, 为传感器标定奠定了基础。V 型探头涉及的参数有探头半径  $R_s$ 、夹角  $\beta$  和芯极厚度  $w_3$ , 其中  $R_s$  的值保持和  $R_c$  一致, 仅需要优化夹角  $\beta$  和芯极厚度  $w_3$ 。V 型芯极是对称的, 可以以其中一半来分析, 分析时忽略 V 型探头芯极的加工圆角, 则参数优化模型如图 3 所示。其中半径  $R_s$  的圆代表 V 型探头尺寸, 直线  $l$  与圆的两交点组成的线段  $AB$  即为 V 型芯极上边界,  $l$  与  $x$  轴和  $y$  轴的交点坐标分别是  $a$  和  $b$ , 根据间隙测量需求和 1.2 节的推导, 优化的目标函数是最大化  $V_{pp}$ 、 $S_{cw}$  以及 AD 的测量范围, 对应到图 3, 则参数优化的过程可以描述为: 在  $(-\infty, -R)$  内移动  $a$ ,  $(0, R)$  内移动  $b$ , 使得  $y_A (\propto w_3, V_{pp})$ 、 $x_{AB} (\propto AD \text{ 测量范围})$  以及  $\tan\beta (\propto S_{cw})$  尽可能大, 显然这是一个约束优化问题, 抽象成数学表达为:

$$\begin{aligned} & \max(\alpha_1 \tan\beta + \alpha_2 y_A + \alpha_3 x_{AB}) \\ \text{st. } & \begin{cases} \sqrt{R_s^2 - x^2} = -\frac{b}{a}x + b \\ a < -R_s \\ 0 < b \leq R_s \end{cases} \end{aligned} \quad (10)$$

式中:  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$  代表目标函数的权重参数, 取  $\alpha_1 = 2R_s$ ,

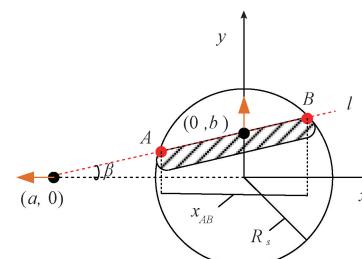


图 3 探头参数优化模型

Fig. 3 Probe parameter optimization model

$\alpha_2=4, \alpha_3=1$  来控制 3 个目标的函数值范围相当。可以通过序列最小二乘规划算法 (sequential least squares programming, SLSQP) 算法求解该约束优化问题, 最后转化为夹角  $\beta$  和芯极厚度  $w_3$  的值, 结果如表 2 所示。

表 2 优化的探头参数

Table 2 Optimized probe parameters

参数	值
$w_3$	1 mm
$\beta$	15°
$R_s$	4 mm

#### 1.4 V型探头真实信号处理算法

借助 Maxwell16 软件仿真  $ad = [-1 : 0.2 : 2] \text{ mm}$ 、 $btc = [0.5 : 0.5 : 2] \text{ mm}$  条件下 V 型探头测量带冠叶片的过程, 其中带冠叶片篦齿和探头的参数由表 1 和 2 给出。相关结果如图 4(a)~(d) 所示。可以发现, 由于边缘效应等非线性因素的影响,  $V_{pp}, S_{cw}$  都和  $btc, ad$  存在非线性关系。非线性产生了 1 对多的关系, 单一的  $V_{pp}$  无法测量  $btc$  且单一的  $S_{cw}$  也无法测量  $ad$ , 但  $(V_{pp}, S_{cw})$  的二维点唯一确定了  $btc$  和  $ad$ 。

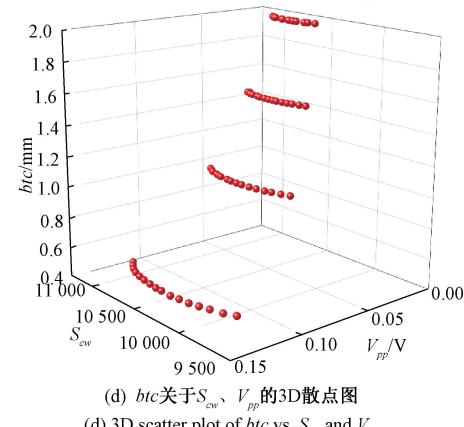
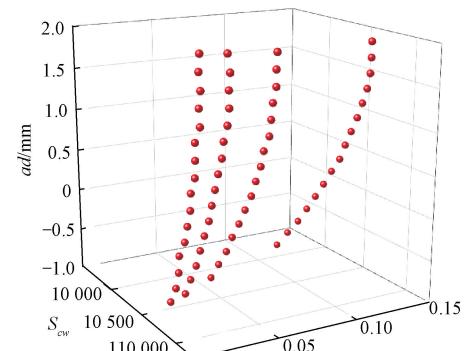
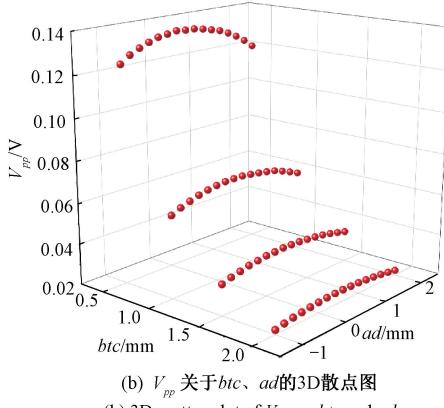
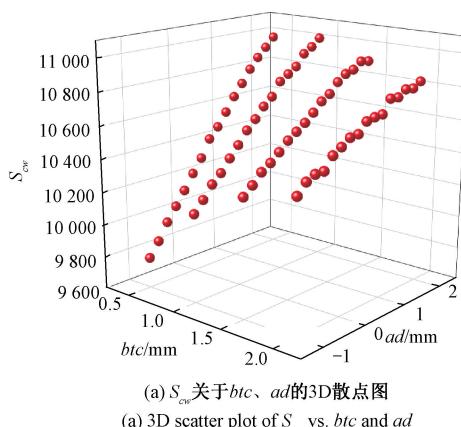


图 4 V型探头测量带冠叶片仿真结果

Fig. 4 Simulation results of shrouded blade measurements using the V-shaped probe

因此,  $btc, ad$  都可以表示成  $V_{pp}$  和  $S_{cw}$  的二元函数:

$$ad = f^1(V_{pp}, S_{cw}) \quad (11)$$

$$btc = f^2(V_{pp}, S_{cw}) \quad (12)$$

通过多项式对  $f^1, f^2$  拟合即可通过  $(V_{pp}, S_{cw})$  实现 BTC、AD 的测量。

真实采样的信号波形蕴含了从探头至采集模块的高频噪声, 呈现出与篦齿数目相关的周期性, 且被类自由叶片数目个特征波形所调制。本研究采用的篦齿盘有 4 个类自由叶片, 就像是等角度安装了 4 个转速同步器 (once per revolution, OPR), 相邻特征波形差 90°, 其中采样点数为  $N_s$ , 则转子转速  $\omega$  可表示为:

$$\omega = \frac{\pi f_s}{2N_s} \quad (13)$$

设置信号的低通截至频率:

$$f_c = n\omega \quad (14)$$

即可实现不同转速下的采样信号自适应滤波降噪。

其中  $n=60$  表示篦齿数目。

为了更加准确获取  $V_{pp}, S_{cw}$  等参数, 考虑对滤波后

的特征波形进行拟合, 拟合波形样式和阶数是人工参数需要设定。根据式(1), 并且注意到有效面积  $S_1$  和  $S_2$  是周期的, 不同阶数的正弦和( $\sin 1$  to  $\sin 10$ )函数被用作拟合函数, 不同阶数的多项式(poly1 to poly10)函数用来对比。平均均方根误差值(root mean square error, RMSE)和复杂度(阶数)作为波形拟合好坏的评价标准。100个周期的仿真数据的拟合误差结果如图5所示, 正弦和函数能更快让拟合RMSE值收敛至0附近。综合考虑拟合误差和复杂度, 三阶正弦和( $\sin 3$ )被视为最优拟合曲线。

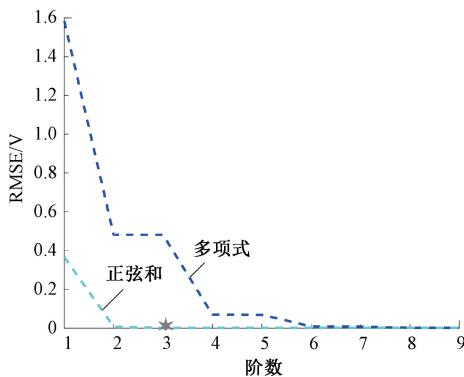


图 5 信号拟合评价曲线

Fig. 5 Signal fitting evaluation curve

通过对拟合曲线寻峰很容易得到  $V_{Peak}$ 、 $V_{vally1}$ 、 $V_{vally2}$ , 以及  $V_{vally1}$ 、 $V_{vally2}$  的索引, 则有:

$$V_{pp} = V_{Peak} - (V_{vally1} + V_{vally2})/2 \quad (15)$$

$$N_r = \arg(V_{vally2}) - \arg(V_{vally1}) \quad (16)$$

式中:  $\arg(\cdot)$  表示取索引。

$S_{cw}$  可以表示为:

$$S_{cw} = \frac{1}{N_r} \int_{\arg(V_{vally1})}^{\arg(V_{vally2})} f_{\sin 3} dt \quad (17)$$

式中:  $f_{\sin 3}$  表示特征波形的最优拟合曲线。

最后, 由于缺乏  $ad$ 、 $btc$  对  $V_{pp}$ 、 $S_{cw}$  显式函数的先验知识, 采用  $V_{pp}$ 、 $S_{cw}$  的二元多项式对  $f^1$ 、 $f^2$  拟合:

$$ad = \sum_{i=0}^{l_1} \sum_{j=0}^{l_1} \tau_1^{ij} V_{pp}^i S_{cw}^j \quad (18)$$

$$btc = \sum_{i=0}^{l_2} \sum_{j=0}^{l_2} \tau_2^{ij} V_{pp}^i S_{cw}^j \quad (19)$$

通过  $ad = [-1:0.1:1]$  mm、 $btc = [0.5:0.1:1.5]$  mm 的仿真数据, 遍历不同阶次的  $V_{pp}$ 、 $S_{cw}$  来确定最合适的拟合阶次。拟合误差和复杂度同样被用作综合评价指标。结果如图6所示, 最终取阶次  $l_1 = l_2 = 4$ 。最后, 通过标定得到多项式系数  $\tau_1^{ij}$ 、 $\tau_2^{ij}$  即可用式(18)、(19)求得  $ad$ 、 $btc$ 。

总之, 整个算法遵循的处理流程如图7所示。

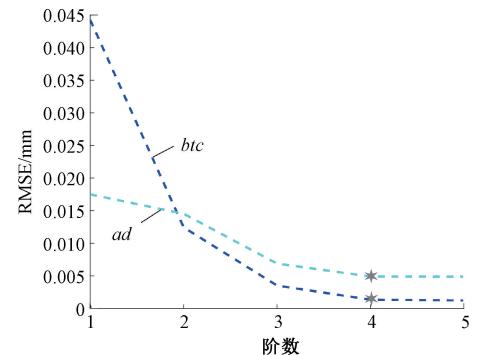


图 6 标定面拟合评价曲线

Fig. 6 Evaluation curve of calibration surface fitting

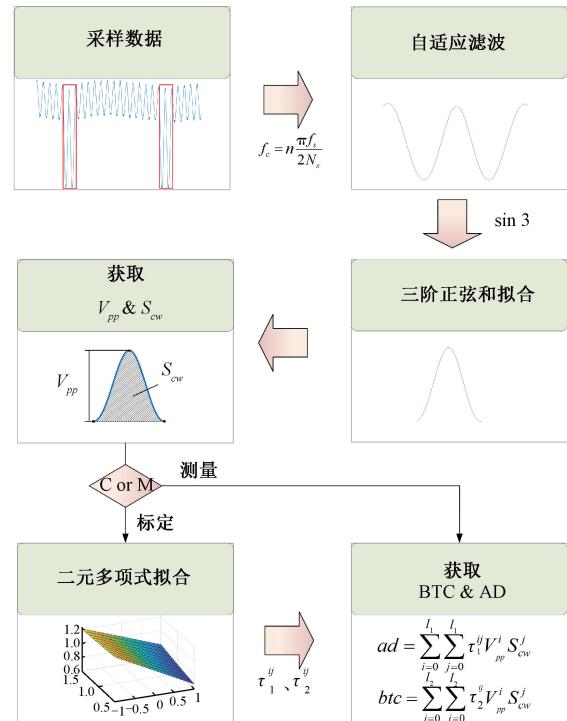


图 7 信号处理算法流程

Fig. 7 Flowchart of the fusion measurement algorithm

## 2 实验和分析

### 2.1 实验装置

为了验证所提出的 V型电容探头和  $V_{pp}$ 、 $S_{cw}$  方法的有效性, 搭建了一个篦齿 BTC 和 AD 测量实验台, 如图8所示, 它主要由篦齿盘(带冠叶片篦齿以外部分不重要, 因此将非篦齿部分做成了实心盘)、V型探头(对比试验时采用同尺寸圆形芯极探头)、3自由度位移机构、电机、调理采集模块以及 PC 组成。驱动器驱动电机(转速范围 0~3 000 RPM), 带着篦齿盘转动, 并由转速控制器控制。传感器安装于提供间隙和位移标准的移动精度 1 μm 的位移台上, 借助位移台升降保证探头和转轴等高, 通过

调节径向千分尺模拟 BTC, 调节轴向千分尺模拟 AD。相关参数如表3所示。测量过程中, 电容传感器信号经调理模块转换为电压信号并由高速采集模块(采样率设置为1 MSps)采集上传至计算机以进行实时或离线分析。

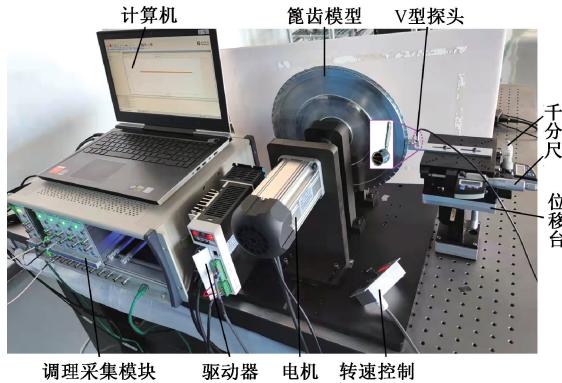


图8 标定和实验装置

Fig. 8 Calibration and experimental setup

表3 装置关键参数

Table 3 Key parameters of the setup

部件	参数	值
篦齿	篦齿半径 $R/\text{mm}$	150
	$w_1/\text{mm}$	1.6
	$w_2/\text{mm}$	0.8
	篦齿数量 $n$	60
	挖槽深度 $h/\text{mm}$	1.5
V型传感器	半径 $R_s/\text{mm}$	4.4
	$w_3/\text{mm}$	1
	$\beta/(\text{°})$	15
电机	转速范围/( $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ )	0~3 000
调理采集模块	采样率 $f_s/\text{MHz}$	1

## 2.2 标定

在所提出的系统上进行了一系列实验, 以评估所提出的V型探头及间隙测量方法的性能。这些实验旨在评估所提出方法的重复性、动态精度以及和圆形芯极探头的对比结果。

实验的第一步是对整个装置进行二维动态标定, 转速控制在700 r/min, BTC校准范围为0.5~1.5 mm, AD校准范围为-1~1 mm。篦齿与探头轻微接触且位于探头中心设置为标定零点( $ad=btc=0$ ), 然后, 从( $ad, btc$ )=(-1 mm, 0.5 mm)开始, 以0.1 mm的步进距离先将ad从-1 mm(或1 mm)移到1 mm(或-1 mm), 再以0.1 mm动一步btc, 直到( $ad, btc$ )移动到(1 mm, 1.5 mm)。在每个标定点, 记录采集模块和千分尺的数据, 其中千分尺记录值作为标准值。接着, 按照1.4节方法处理数据, 得到的

转速和滤波前后的波形如图9所示, 可知利用类自由叶片获取的转速与真实转速一致, 滤波效果良好, 高频噪声和毛刺被完全滤除。

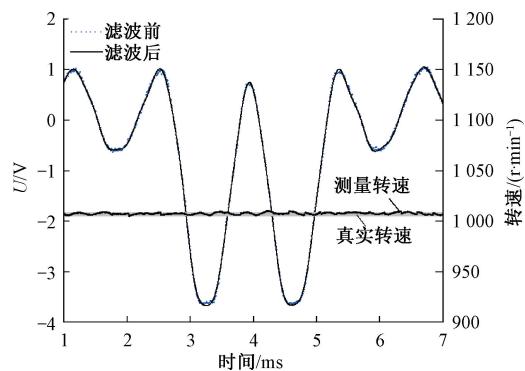


图9 真实采样信号和滤波信号

Fig. 9 True sampled signal and filtered signal

如图10(a)、(b)所示, 按照标定顺序展示了0.1 s内各标定点处是否进行正弦和函数拟合所提取的 $V_{pp}$ 和 $S_{cw}$ 参数的标准差, 可见滤波后直接寻峰和拟合后再寻峰得到的 $V_{pp}$ 的标准差基本一致, 但拟合后的 $S_{cw}$ 的标准差减小到未拟合的大约1/3, 说明拟合后参数的提取确实更

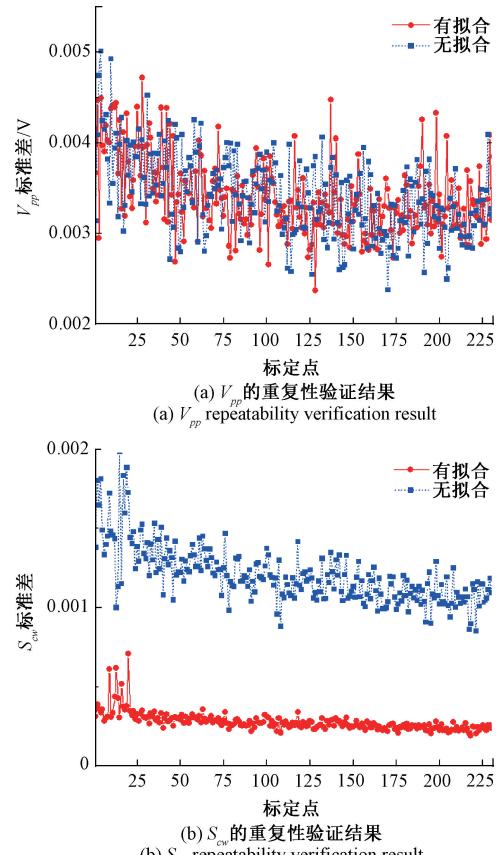


图10  $V_{pp}$  和  $S_{cw}$  重复性验证结果

Fig. 10  $V_{pp}$  and  $S_{cw}$  repeatability verification result

加准确和稳定。最后,BTC 和 AD 的最优标定系数和标定误差如表 4、5 所示,光滑的形状(即小系数)和小 RMSE 值(0.001 396、0.005 967)表明校准面是合适的。

表 4 BTC 标定系数

Table 4 Calibration factor of BTC

系数	值	系数	值	系数	值
$\tau_1^{00}$	0.943 600	$\tau_1^{30}$	-0.026 990 0	$\tau_1^{22}$	$\approx 0$
$\tau_1^{10}$	-0.325 500	$\tau_1^{21}$	-0.001 534 0	$\tau_1^{13}$	-0.000 875 1
$\tau_1^{01}$	0.016 440	$\tau_1^{12}$	0.003 389 0	$\tau_1^{04}$	0.001 663 0
$\tau_1^{20}$	0.080 170	$\tau_1^{03}$	0.000 813 0		
$\tau_1^{11}$	0.004 717	$\tau_1^{40}$	0.006 612 0		
$\tau_1^{02}$	-0.025 820	$\tau_1^{31}$	$\approx 0$	RMSE	<b>0.001 396</b>

表 5 AD 标定系数

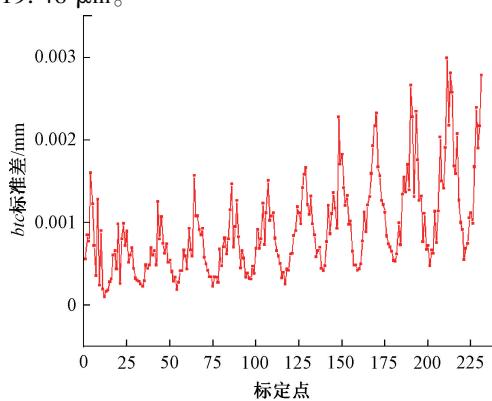
Table 5 Calibration factor of AD

系数	值	系数	值	系数	值
$\tau_2^{00}$	0.007 290	$\tau_2^{30}$	-0.002 868 0	$\tau_2^{22}$	0.000 417 9
$\tau_2^{10}$	-0.074 940	$\tau_2^{21}$	0.008 427 0	$\tau_2^{13}$	-0.007 793 0
$\tau_2^{01}$	0.660 000	$\tau_2^{12}$	0.007 674 0	$\tau_2^{04}$	0.003 070 0
$\tau_2^{20}$	0.009 049	$\tau_2^{03}$	-0.027 860 0		
$\tau_2^{11}$	0.031 570	$\tau_2^{40}$	0.000 992 6		
$\tau_2^{02}$	-0.022 840	$\tau_2^{31}$	0.000 197 0	RMSE	<b>0.005 967 0</b>

### 2.3 测量性能评价实验

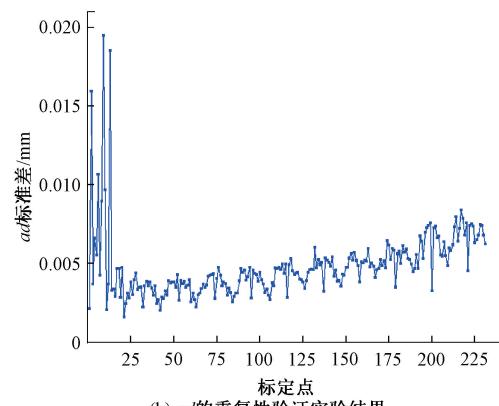
标定后,进行了一系列性能评价实验。

首先,完成了测量重复性评价实验。btc 在 0.5~1.5 mm 范围一次移动 0.1 mm,每个间隙下 ad 从 -1 mm 每次移动 0.1 mm 直到 1 mm,得到总共 231 个测量点。在每个测量点,测量时间为 0.1 s。然后计算每个点的标准差,如图 11(a)、(b) 所示,结果按照测量点移动顺序给出。btc 的最大标准差为 3.0  $\mu\text{m}$ ,且在同一间隙下,标准差随 ad 的绝对值增加而增加;ad 的最大标准差为 19.48  $\mu\text{m}$ 。



(a) btc 的重复性验证实验结果

(a) Results of reproducibility validation experiments for btc



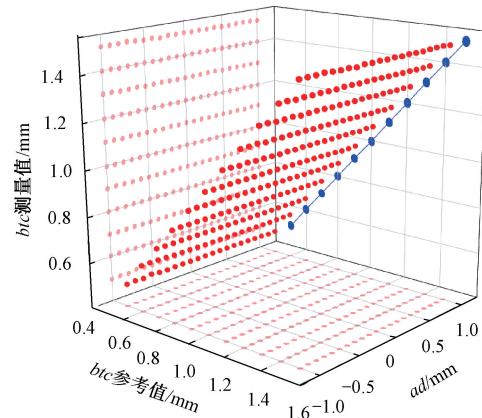
(b) ad 的重复性验证实验结果

(b) Results of reproducibility validation experiments for ad

图 11 btc 和 ad 的重复性验证实验结果

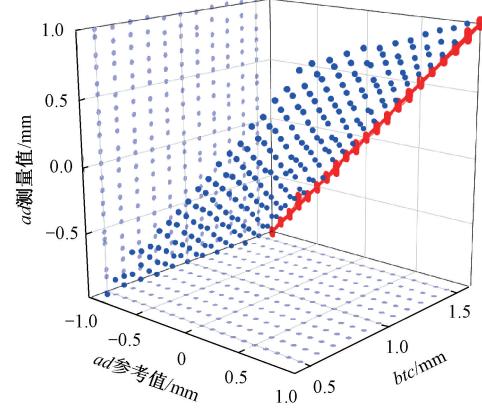
Fig. 11 Results of reproducibility validation experiments for btc and ad

接着,完成了线性度评估实验。以 btc 和 ad 的参考值为 x、y 轴,btc、ad 的测量值为 z 轴绘制了标定范围内 btc 测量值、ad 测量值与千分尺示值的三维散点关系图,同时给出了其在各个坐标面上的投影,如图 12(a)、(b) 所示。计算得 btc 和 ad 的线性度分别为 0.42% 和 4.08%。



(a) btc 的线性度评估实验结果

(a) Experimental results of linearity evaluation of btc



(b) ad 的线性度评估实验结果

(b) Experimental results of linearity evaluation of ad

图 12 btc 和 ad 的线性度评估实验结果

Fig. 12 Experimental results of linearity evaluation of btc and ad

然后,完成了700~1 900 r/min(间隔300 r/min)下的测量精度评估实验,考虑到对全量程范围进行精度测试是困难的,采取抽样检验的方式,选取 $btc = 0.6\text{ mm}, 1.0\text{ mm}, 1.4\text{ mm}$  3个涵盖小中大的间隙值,每个间隙下 $ad$ 从-1 mm每次移动0.2 mm直到1 mm,即每个转速下33个点,总共165个点。在各测量点,将 $btc, ad$ 测定值与从千分尺得到的基准值进行比较,求出测定精度。进行3次精度评价实验。各测量点处的 $btc$ 以及 $ad$ 的测量误差如图13(a)、(b)所示。图中横轴按照测量点移动顺序给出。实验结果表明,在0.5~1.5 mm的测量范围内,该系统的 $btc$ 测量精度优于8.0  $\mu\text{m}$ 。在±1 mm范围内,该系统的 $ad$ 测量精度优于21.6  $\mu\text{m}$ 。

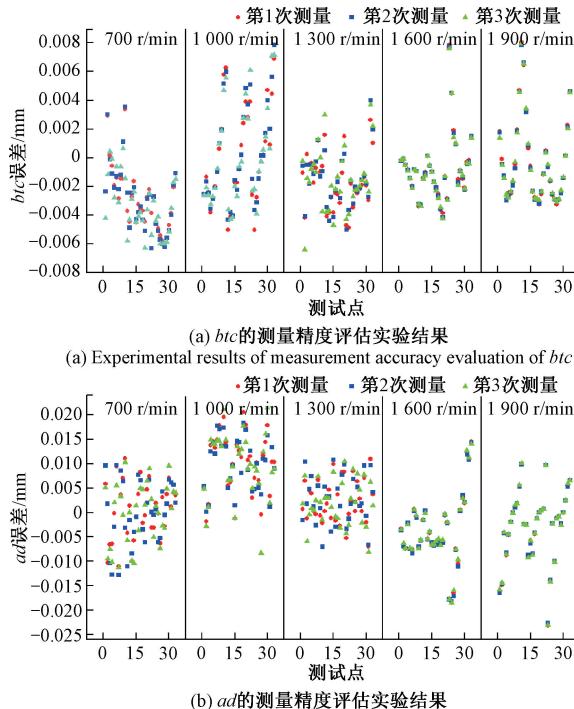


图13  $btc$ 和 $ad$ 的测量精度评估实验结果

Fig. 13 Experimental results of measurement accuracy evaluation of  $btc$  and  $ad$

最后,完成了所提V型电容探头间隙测量方法和同尺寸圆形芯极方法的对比实验。首先进行了圆形芯极探头的标定,标定零点选取与2.2节相同,保持 $ad=0$ 不变,转动径向千分尺使 $btc$ 从0.5 mm以0.1 mm的步进距离移动到1.5 mm,测量的电压值和千分尺示值间的多项式拟合曲线作为标定曲线。然后,分别用两种探头在 $ad=-1.0\text{ mm}, ad=-0.5\text{ mm}, ad=0\text{ mm}, ad=0.5\text{ mm}, ad=1.0\text{ mm}$  5个位置进行了BTC测量,每个位置 $btc$ 从0.5 mm以0.1 mm的移动量移动至1.5 mm。结果如图14所示。并且,图14中还给出了V型芯极电容探头仅用圆形芯极探头标定方法进行标定的测量结果。

图14左边为传统圆形芯极方法,中间为V型探头结合本文提出的方法,右边为仅V型探头的方法。对比结果表明,在 $ad=0\text{ mm}$ 时,本文的方法和传统圆形芯极方法精度相差无几,但随着 $ad$ 的逐渐增大,后者的性能快速恶化,当 $ad$ 绝对值到1 mm时,测量误差最大可到0.25 mm,这在工程应用中是无法接受的。相反,V型探头结合所提方法在±1 mm  $ad$ 下表现良好,最大误差不超过8  $\mu\text{m}$ 。并且,即使是仅通过更改圆形芯极为V型, $±1\text{ mm }ad$ 下的测量误差也有所下降,大约为原先的一半。总之,本研究所提出的电容探头结构和方法实现了AD下的BTC高精度测量,同时实现了AD的有效监测。

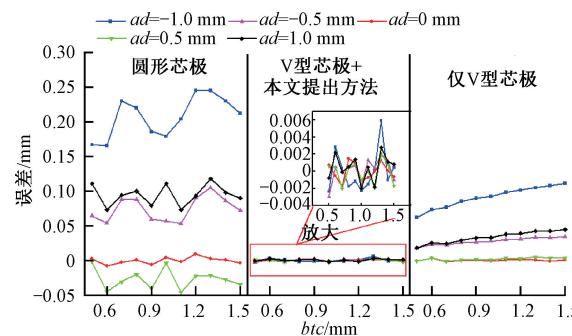


图14 对比实验结果

Fig. 14 Comparison of experimental results

### 3 结 论

带冠涡轮叶片在轴向载荷、热载荷、气激力等综合因素影响下不可避免地产生AD,给BTC的准确可靠测量带来了巨大的挑战。在本文研究中,提出了一种V型芯极电容探头和 $V_{pp}$  &  $S_{cw}$ 方法。该方法利用V型芯极电容探头来检测带冠叶片叶顶篦齿的“类自由叶片”特征,监测转子叶片的瞬时转速。并根据转速信息对探测信号进行滤波降噪。然后对滤波后的“类自由叶片”特征信号进行拟合获取 $V_{pp}$  &  $S_{cw}$ 参数。通过校准二者分别与BTC、AD的二元多项式函数关系,最终实现了BTC、AD的同时测量。仿真和实验验证了该方法的准确性和有效性。本文主要工作总结为:

- 1) 针对带冠叶片在AD条件下间隙高精度测量需求,提出了一种新颖的V型芯极结构电容传感器,同时监测BTC和AD。
- 2) 提出了利用V型传感器与篦齿“类自由叶片”产生的特征波形的 $V_{pp}$  &  $S_{cw}$ 参数实现BTC和AD同时测量的方法。通过数学推导,明确了 $btc, ad$ 分别与 $V_{pp}$  &  $S_{cw}$ 的关系。
- 3) 搭建了一个带冠叶片篦齿BTC和AD测量实验

台,针对所提方法,实现了  $btc$  和  $ad$  关于  $V_{pp}$  &  $S_{cu}$  的最优二元多项式标定。

4) 通过一系列实验对所提方法进行了验证。实验结果表明,在 0.5~1.5 mm  $btc$ 、 $\pm 1$  mm  $ad$  测量范围下,重复性评价实验中  $btc$  的标准差不超过 3  $\mu\text{m}$ ( $ad$  的标准差不超过 19.48  $\mu\text{m}$ )。 $btc$  和  $ad$  的线性度分别为 0.42% 和 4.08%。 $btc$  测量精度优于 8.0  $\mu\text{m}$ , $ad$  测量精度优于 21.6  $\mu\text{m}$ 。相较于传统圆形结构探头在  $\pm 1$  mm  $ad$  下 0.25 mm 糟糕的性能表现,本文提出的方法更具吸引力和工程应用价值。

未来的研究应侧重于温度、振动等环境因素对该方法的影响,并提出消除相关影响的措施。

## 参考文献

- [1] 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.
- [2] NIRMALAN N V, BAILEY J C. Experimental investigation of aerodynamic losses of different shapes of a shrouded blade tip section[C]. Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air, 2005, 47268: 785-792.
- [3] AHMED R, FIRRONE C M, ZUCCA S. A test rig for the full characterization of the dynamics of shrouded turbine blades [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2023, 189: 110080.
- [4] 肖林,雷小华,郭光辉,等.基于快速稀疏扫频干涉的动态间隙测量方法[J].仪器仪表学报,2022,43(9):52-61.  
XIAO L, LEI X H, GUO G H, et al. A dynamic clearance measurement method based on a fast sparse frequency-swept interferometry [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(9): 52-61.
- [5] 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.
- [6] ASLINEZHAD M, HEJAZI M A. Turbine blade tip clearance determination using microwave measurement and k-nearest neighbour classifier [J]. Measurement, 2020, 151:107142.
- [7] SALINAS S, CASTILLO A, BLOXHAM M, et al. Comprehensive capacitance sensor calibration for high-speed fluid-machinery tip clearance characterization [J]. Measurement, 2023, 218: 113117.
- [8] 段发阶,牛广越,周琦.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.
- [9] SATISH T N, VIVEK A, ANAGHA S N, et al. Novel resistor-capacitor (RC) network-based capacitance signal conditioning circuit for tip clearance measurement on gas turbine engine [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering, 2020, 234(2): 342-360.
- [10] LI J, GUO G H, DUAN F J, et al. A novel self-adaptive, multi-peak detection algorithm for blade tip clearance measurement based on a capacitive probe[J]. Measurement Science and Technology, 2021, 32 (8): 085006.
- [11] KWAPISZ D, HAFNER M, QUELOZ S. Calibration and characterization of a CW radar for blade tip clearance measurement[C]. 2010 7th European Radar Conference, 2010: 320-323.
- [12] BOROVÍK S, KUTEYNÍKOVA M, SEKISOV Y. Reducing the impact of influence factors on the measurement results from single-coil eddy current sensors [J]. Sensors, 2023, 23(1): 351.
- [13] 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 ZH F, NIU G Y, YI L, et al. Tip clearance measurement of shrouded turbine blades in turbofan engines [J]. China Measurement & Test, 2023, 49(12): 16-22.
- [14] 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 ZH F, NIU G Y, et al. Research on multi-channel tip clearance measurement technology for shrouded turbine blades [J]. Electronic Measurement Technology, 2024, 47(20):1-6.
- [15] MOHAMED M, BONELLO P, RUSSHARD P. The determination of steady-state movements using blade tip timing data[C]. Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air. American Society of Mechanical Engineers, 2018,

- 51159: V07CT35A010.
- [16] JOUSSELIN O. Development of blade tip timing techniques in turbo machinery [D]. Manchester: The University of Manchester, 2013.
- [17] ZHANG X L, WANG W M, CHEN K, et al. Five dimensional movement measurement method for rotating blade based on blade tip timing measuring point position tracking[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2021, 161: 107898.

## 作者简介



李发富,2020年于天津大学获得学士学位,现为天津大学博士生,主要研究方向为测试计量技术及仪器。

E-mail:1023202041@tju.edu.cn

**Li Fafu** received his B.Sc. degree from Tianjin university in 2020. Now he is a Ph.D. candidate at Tianjin University. His main research interest is measurement technology and instruments.



段发阶(通信作者),1989年于天津大学获得学士学位,1991年于天津大学获得硕士学位,1994年于天津大学获得博士学位,现为天津大学教授,主要研究方向为光电测量及计算机视觉检测技术、在线测量与设备健康监测技术以及海洋环境监测与水声探测技术。

E-mail:fjduan@tju.edu.cn

**Duan Fajie** (Corresponding author) received his B.Sc. degree from Tianjin University in 1989, received his M.Sc. degree from Tianjin University in 1991, received his Ph.D. degree from Tianjin University in 1994. Now he is a professor at Tianjin University. His main research interests include photoelectric measurement and computer vision detection technology, on-line measurement and equipment health monitoring technology and the marine environment monitoring and underwater acoustic detection technology.



郭光辉,2009年于沈阳航空航天大学获得学士学位,2018年于英国克莱菲尔德大学获得硕士学位,现为中国航发四川燃气涡轮研究院高级工程师,主要研究方向为旋转机械结构间隙测试技术。

E-mail:glorysy@163.com

**Guo Guanghui** received his B.Sc. degree from Shenyang Aerospace University in 2009 and his M.Sc. degree from Cranfield University (UK) in 2018. He is currently a senior engineer at the AECC Sichuan Gas Turbine Establishment. His main research focuses on structural clearance measurement technology for rotating machinery.