

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2209478

基于频谱的篦齿轴向窜动与叶尖间隙测量方法*

李发富¹, 段发阶¹, 易亮², 牛广越¹, 刘昊¹

(1. 天津大学精密测试技术及仪器国家重点实验室 天津 300072; 2. 中国航发上海商用
发动机制造有限责任公司 上海 201306)

摘要:航空发动机低压涡轮带冠叶片篦齿和机匣之间的叶尖间隙参数以及篦齿轴向窜动参数的在线高精度测量是保证涡轮发动机安全运作和气动效率的关键。传统的电容式叶尖间隙测量系统对噪声敏感度大,且不能对篦齿的轴向窜动参数同时进行测量。因此研制了一种“人”字形电容传感器,提出了一种基于频谱的篦齿叶尖间隙参数和轴向窜动参数的提取方法。建立了“人”字形电容传感器测量模型。仿真分析了测量信号的幅度谱特征并提出了一种最优谱线选择方法。提出了基于转速和信号特征频率估计的自适应频域滤波,信号整周期等角度采样,幅度谱估计以及二元多项式曲面拟合相融合的信号处理方法,实现了叶尖间隙参数和轴向窜动参数的动态测量。在实验室环境下搭建了篦齿叶尖间隙参数和轴向窜动参数测试实验平台,完成了标定和测量实验。实验结果显示,篦齿盘工作在1 900 r/min以下时,测量系统在0.5~1.5 mm叶尖间隙及±1 mm轴向窜动范围内,叶尖间隙测量精度达18 μm,轴向窜动测量精度达30 μm。

关键词: 篦齿; 叶尖间隙; 轴向窜动; 电容传感器; 频谱分析

中图分类号: TH69 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4

Measuring method of axial movement and tip clearance of labyrinth seals based on the amplitude spectrum

Li Fafu¹, Duan Fajie¹, Yi Liang², Niu Guangyue¹, Liu Hao¹

(1. State Key Lab of Measuring Technology and Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. Aero Engine Corporation of China Shanghai Commercial Aircraft Engine Manufacturing Co., Ltd., Shanghai 201306, China)

Abstract: Online high-precision measurement of tip clearance parameters between the labyrinth seals and the casing and axial movement parameters of labyrinth seals are the key to ensuring the safe operation and aerodynamic efficiency of turbine engines. The traditional capacitive tip clearance measurement system is sensitive to noise and cannot measure the axial movement parameters of labyrinth seals at the same time. Therefore, a “herringbone”-shaped capacitive sensor is designed, and a method for extracting the parameters of labyrinth seals’ tip clearance and axial movement parameters based on spectrum estimation is proposed. The measurement model of the herringbone capacitance sensor is established. The amplitude spectrum characteristics of the measured signal are simulated and analyzed, and the optimal spectrum line is determined. A signal processing method of adaptive frequency domain filtering based on estimation of rotation speed and signal characteristic frequency, full-period and uniform angle sampling, amplitude spectrum estimation, and binary polynomial surface fitting is proposed to realize the dynamic measurement of blade tip clearance parameters and axial movement parameters. The experimental platform for testing tip clearance parameters and axial movement parameters of a labyrinth seal is established in the laboratory environment. The calibration and measurement experiments are completed. Experimental results show that when labyrinth seals work below 1 900 r/min, the measurement accuracy of blade tip clearance and axial movement is 18 μm and 30 μm within the measurement range of 0.5~1.5 mm blade tip clearance and ±1 mm axial movement.

Keywords: labyrinth seals; blade tip clearance; axial movement; capacitive sensor; spectrum analysis

0 引言

低压涡轮带冠叶片作为航空发动机核心做功部件之一,它的结构参数和运转状态参数关乎整个发动机系统的高效性、安全性和稳定性^[1-3]。与自由动叶片相比,低压涡轮带冠叶片常常伴有密封篦齿。其中,带冠叶片顶端篦齿和机匣内壁的叶尖间隙以及旋转带冠叶片和静子叶片间的轴向间隙与发动机泄漏量、气动性能、运转效率、安全稳定以及喘振安全裕度等直接关联^[4-6]。过大或过小的间隙对发动机都是不利的,研究表明,1%的间隙增量意味着1.5%的涡轮效率下降^[7],而过小的间隙会带来转子叶片与机匣、静子叶片的磨损问题,严重时甚至会造成整个发动机系统的破坏^[8]。然而影响间隙变化的因素极其复杂,包括高温、高压、燃气腐蚀、多重载荷、过渡态转速变化等等,目前尚未提出相应的理论和模型对间隙进行准确的预测和评估^[9],因此,高精度、在线间隙测量技术是实现间隙最优值确定和间隙主动控制的关键。

目前国内外学者对发动机低压涡轮带冠叶片篦齿更多的关注点在于尺寸结构的改进,主要通过数值计算、仿真等手段确定篦齿的最优化尺寸、结构参数,以达到降低泄露量和改善涡轮的气动性能的目的^[6,10-12]。叶尖间隙测量方面,从20世纪五六十年代开始,国外包括通用电气、罗尔斯-罗伊斯、NASA等在内的发动机制造企业或研究机构将大量人力、物力、财力投入叶尖间隙测量方法的研究,也因此诞生了放电探针法、电涡流法、光纤法、微波法、电容法等不同测量原理的叶尖间隙在线测量方法^[4,13]。其中,电容法由于精度高、灵敏度高,频带宽,动态响应性能好,耐高温、结构简单、易于安装等优势,在国外已经作为一项成熟技术被用于叶尖间隙的机载测试,在国内调幅式电容法也是航空发动机研究院所开展叶尖间隙测试的标配技术^[4]。然而,无论是国外应用最广泛的Fogale公司的MC925系统还是国内天津大学段发阶团队开发的BCMS系统,主要的测量对象是自由动叶片,且电容传感器均采用圆形芯极的多同轴结构,使用前需要根据机匣上安装孔的位置进行静态或者动态标定。直接应用于低压涡轮带冠叶片叶尖篦齿与机匣内壁之间的叶尖间隙测量时,叶片在高负载、变转速工况下运转很可能会产生一定范围内的轴向窜动引起篦齿端面和传感器圆形芯极的相对位置偏离标定位置,给叶尖间隙的测量带来了误差,严重时甚至会导致间隙主动控制装置的误操作和叶片运转健康状况的误判。篦齿轴向间隙和轴向窜动测量方面的研究报道较少,近期仅有重庆大学的邵斌等基于调频干涉原理,研制了量程0~20 mm,精度为满量程0.08%的轴向间隙测量样机^[14],能否用于篦齿轴向间隙测量还有待考量。

针对现有电容式叶尖间隙测量系统应用于低压涡轮叶片篦齿叶尖间隙测量时的缺陷,同时填补篦齿轴向窜动测量方面的空白,本文提出了一种篦齿叶尖间隙和轴向窜动同时测量的新型结构电容测量方法。制备了新型人字形芯极的电容传感器,建立了人字形芯极结构下的低压涡轮带冠叶片篦齿叶尖间隙测量信号模型,分析了信号的时频特征,仿真了叶尖间隙和轴向窜动对测量信号幅度谱的影响规律,通过转速估计、频域滤波、等角度整周期采样、幅度谱估计、二元多项式曲面拟合相融合的处理方法,实现了篦齿叶尖间隙参数和轴向窜动参数的在线高精度测量,做到了一支传感器多种功能,实际工程意义重大。

1 测量模型和方法

针对自由动叶片的电容调幅式叶尖间隙测量技术是基于变间隙的双平板电容原理工作的。整个测量系统主要由转子和电容传感器组成的双平板电容器、调幅式电容调理电路、间隙信号采集处理系统以及上位机4个部分组成,如图1所示。测量过程为:调幅式调理电路将待测平板电容转换为幅度适宜的电压信号,经高速采集处理系统AD采样后传输给上位机,最后在上位机上实现数据处理和结果显示。

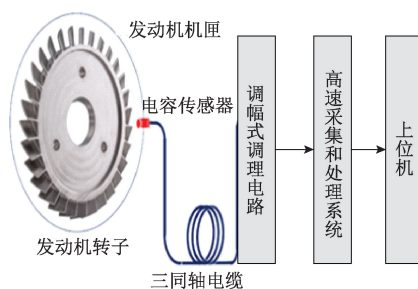


图1 电容式叶尖间隙测量系统

Fig. 1 Capacitive tip clearance measurement system

本文基于图1的叶尖间隙测量系统硬件架构,测量对象换成低压涡轮带冠叶片篦齿,结合新型电容传感器“人”字结构特性所对应的信号模型以及上位机相应的信号处理算法来实现篦齿叶尖间隙和轴向窜动的同时测量。

1.1 传感器结构及最优化参数

传统电容式叶尖间隙测量系统的传感器芯极都为圆形,测量时,不仅不能针对篦齿的轴向窜动进行测量,且由于轴向窜动改变了传感器和篦齿端面的相对有效面积而给叶尖间隙的测量带来了误差。为了解决这一问题,即使得轴向窜动不改变传感器和篦齿端面的相对有效面积,同时还能让传感器输出信号包含轴

向窜动信息。研制了有一定夹角的新型“人”字芯极电容传感器,如图2(b)所示,传感器芯极沿横轴对称分布,芯极限定在半径为 R_0 的圆内,圆与芯极上边界所在直线的交点坐标为 (X, Y) ,即图2中A和B两点,则芯极参数由上边界所在直线与横轴交点 p ,倾角 θ 以及

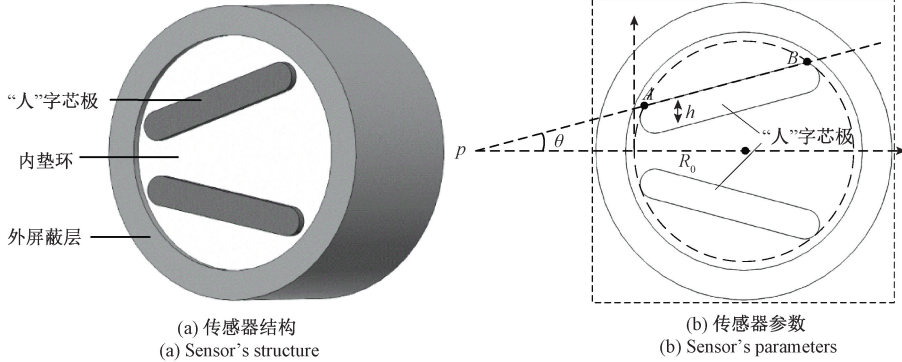


图2 传感器结构与参数

Fig. 2 Structure and parameters of the sensor

$$\begin{aligned} \max(V_R, V_s, V_p) &= f(\theta, p, h) \\ \text{s. t. } \begin{cases} \sqrt{(R_0^2 - (X - R_0)^2)} = \tan(\theta) \times (X - p) \\ 0 < \frac{|(R_0 - p) \times \tan(\theta)|}{\sqrt{\tan^2(\theta) + 1}} < R_0 \\ 0 < h \leq Y_A, p < 0, 0 < \theta < \frac{\pi}{2} \end{cases} \end{aligned} \quad (1)$$

式中: Y_A 指A点纵坐标。其中 V_R, V_s, V_p 的完整表达式复杂,且对上述优化过程来说不是必要的。因此 V_R, V_s, V_p 可简化表达成 $V_R = X_B - X_A, V_s = \tan\theta, V_p = h$ 。对式(1)进行最优值搜索可得到 p, θ, h 的值。芯极参数最优值搜索结果如图3所示($h = 1 \text{ mm}$), x, y 坐标分别表示 p, θ 值的索引, Z 轴表示归一化目标函数值。本文设计的传感器尺寸及最优值搜索的芯极参数结果不公开。

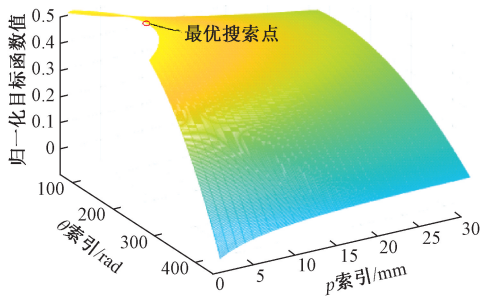


图3 参数最优值搜索结果

Fig. 3 Optimal value search results for parameters

1.2 篦齿测量模型

低压涡轮带冠叶片篦齿模拟盘如图4(a)所示(其中顶端篦齿按实际篦齿的等比例制作,叶冠、叶片和叶盘做

芯极纵轴厚度 h 三者确定。三者的值和传感器轴向窜动测量量程 V_R ,灵敏度 V_s 以及输出信号幅度 V_p 有关。为了追求传感器的上述输出特征达到最优,采用多目标最优化方法来确定传感器的芯极参数。相应的多目标最优化数学模型如式(1)所示。

成一个整体圆盘),篦齿沿周向连续,不考虑过渡段厚度变化时,轴向厚度以 w_1 和 w_2 为周期。为了实现转速同步,圆周上厚度为 w_2 处的 m 个对称位置存在沿径向的“W”型挖槽改装,挖槽深度为 d_1 ,本文中 $m = 4$ 。“人”型电容传感器测量篦齿的模型如图4(b)所示。信号模型推导时做如下简化:

1) 篦齿厚度 w_1 和 w_2 之间的过渡段数学表达式复杂,而对信号模型影响甚微,简化为直角阶梯。

2) 芯极和篦齿端面相对的有效四边形面积倾角小,等效为相同面积的矩形。

3) 推导过程理想化,不考虑边缘效应的影响。

简化后篦齿旋转时传感器对应的端面厚度 w 表达式为:

$$w(\omega Rt) = \begin{cases} w_1, & iT \leq \omega Rt \leq (k+i)T \\ w_2, & (k+i)T \leq \omega Rt \leq (i+1)T' \end{cases}$$

$i = 0, 1, 2, \dots$

(2)

式中: T 为单个篦齿周期长度,有 $T = 2\pi R/n$, R 指篦齿圆周半径(如图4所示), n 为篦齿周期数(即篦齿个数),本文中所用篦齿数 $n = 60$, k 为 w_1 占周期 T 的比例, ω 为旋转角速度; t 为时间。

式(2)经傅里叶级数展开为:

$$\begin{aligned} w(\omega Rt) &= [k(w_1 - w_2) + w_2] + \\ &\sum_{i=1}^{\infty} \left\{ \frac{w_1 - w_2}{i\pi} \sin(2\pi ik) \cos\left(2\pi i \frac{\omega Rt}{T}\right) + \right. \\ &\left. \frac{w_1 - w_2}{i\pi} [1 - \cos(2\pi ik)] \sin\left(2\pi i \frac{\omega Rt}{T}\right) \right\} \end{aligned} \quad (3)$$

同理,篦齿和传感器间的径向间隙 d (值为 d_2 或 $d_1 + d_2$)因篦齿周向均匀分布的 m 个“W”型凹槽可展开如式(4)所示。

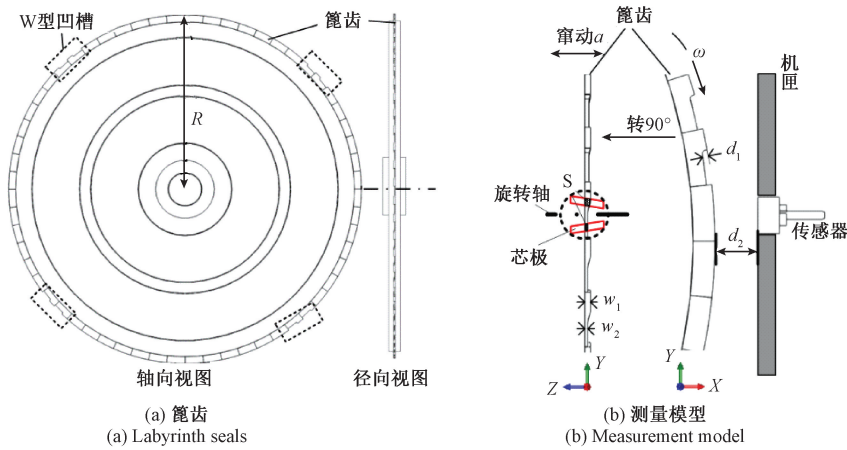


图4 迷宫齿及其测量模型

Fig. 4 Labyrinth seals and its measuring model

$$d(\omega Rt) = \sum_{i=1}^{\infty} \frac{d_2}{i\pi} \left[\left(\sin\left(\frac{2imk\pi}{n}\right) + \sin\left(\frac{2im(k+1)\pi}{n}\right) - \sin\left(\frac{2im\pi}{n}\right) - \sin\left(\frac{4im\pi}{n}\right) \right) \times \cos\left(\frac{2im\pi}{nT}\omega Rt\right) - \left(\cos\left(\frac{2imk\pi}{n}\right) + \cos\left(\frac{2im(k+1)\pi}{n}\right) - \cos\left(\frac{2im\pi}{n}\right) - \cos\left(\frac{4im\pi}{n}\right) \right) \times \sin\left(\frac{2im\pi}{nT}\omega Rt\right) \right] + \left[d_2 + \frac{2m(1-k)}{n}d_1 \right] \quad (4)$$

式中: d_2 指待测叶尖间隙, d_1 指开槽深度。

利用微积分思想计算径向间隙与测量系统输出电压信号的关系式:

$$\tilde{U}(t) = \beta \frac{\varepsilon S}{d} = \beta \varepsilon \left[\int_{\omega Rt}^{\omega Rt+h} \frac{w(\omega Rt)}{d(\omega Rt)} \times \Delta(\omega Rt) + \int_{\omega Rt+a\sin(\theta)}^{\omega Rt+a\sin(\theta)+h} \frac{w(\omega Rt)}{d(\omega Rt)} \times \Delta(\omega Rt) \right] \quad (5)$$

式中: β 指调理电路放大系数, ε 指迷宫齿和传感器之间介电常数, Δ 是微分号, a 指迷宫齿轴向窜动, θ 指传感器芯极倾角, h 指传感器芯极纵轴宽度。

联立式(3)~(5), 并对(5)式中 $d(\omega Rt)$ 进行恒等变换得到:

$$\tilde{U}(t) = \tilde{U}_1(t) - \Delta\tilde{U}(t) \quad (6)$$

$$\tilde{U}_1(t) = \beta \varepsilon \left[\frac{2(w_1 - w_2)T}{\pi^2 d_2} \sum_{i=1}^{\infty} \frac{\sin \frac{i\pi h}{T}}{i^2} \cos \frac{i\pi a \tan(\theta)}{T} \times \sqrt{C_i^2 + B_i^2} \times \cos\left(\frac{2\pi i \omega Rt}{T} + \varphi_i\right) + \frac{2h[k(w_1 - w_2) + w_2]}{d_2} \right] \quad (7)$$

$$\Delta\tilde{U}(t) = \beta \varepsilon \left\{ \frac{nw_2 T}{\pi^2 (d_2 + d_1)} \sum_{i=1}^{\infty} \left[\frac{\sin \frac{imh\pi}{nT}}{i^2} \cos \frac{im a \tan(\theta) \pi}{nT} \cos\left(\frac{im\pi}{n}\right) \times \sqrt{E_i^2 + F_i^2} \cos\left(\frac{2im\pi\omega Rt}{nT} + \phi_i\right) \right] + \frac{2mh(1-k)w_2}{n(d_2 + d_1)} \right\} \quad (8)$$

式中: $B_i, C_i, E_i, F_i, \varphi_i, \phi_i$ 均为和谐波级数有关的常数。

电压 $\tilde{U}$ 可表达成两个基频比为 n/m 的无限次正弦信号

叠加形式的差。设 $\Delta\tilde{U}$ 的基频为 f_0 , $\tilde{U}_1$ 的基频为 $\frac{n}{m}f_0$, 则 $\tilde{U}$ 的幅度谱如式(9)所示。

$$|\tilde{U}(if_0)| = \begin{cases} \beta\epsilon \left[\frac{2(w_1 - w_2)T}{\pi^2 d_2} \frac{\sin \frac{i\pi h}{T}}{i^2} \sqrt{C_i^2 + B_i^2} + \frac{nw_2 T}{\pi^2 (d_2 + d_1)} \times \frac{\sin \frac{imh\pi}{nT}}{i^2} \cos\left(\frac{im\pi}{n}\right) \sqrt{E_i^2 + F_i^2} \right] \cos \frac{imatan(\theta)\pi}{nT}, \\ i = \frac{n}{m}, 2\frac{n}{m}, \dots \\ \beta\epsilon \frac{nw_2 T}{\pi^2 (d_2 + d_1)} \frac{\sin \frac{imh\pi}{nT}}{i^2} \cos\left(\frac{im\pi}{n}\right) \sqrt{E_i^2 + F_i^2} \cos \frac{imatan(\theta)\pi}{nT}, \text{ 其他} \end{cases} \quad (9)$$

由式(9)知, $\tilde{U}$ 的每根谱线的幅度都是叶尖间隙 d_2 和轴向窜动 a 的函数, 利用两根谱线幅度信息(分别记作 A_1, A_2) 即可解算出 d_2 和 a 。

1.3 谱线幅度最优化

不同阶次谐波的谱线幅度大小不同, 受环境和噪声的影响大小也不一样, 选取高精度的 A_1, A_2 对保证测量精度就显得尤为重要。本文针对式(9)前 $(100 \times n/m)$ 次谐波分量(去除直流分量), 带入实际系统参数进行信噪比 10 dB 的信号模型数值仿真。单次仿真信号模型的不同阶次幅度谱相对位置和大小如图 5 所示。

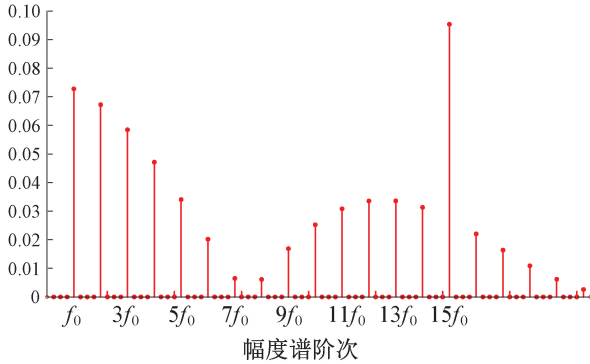


图 5 仿真信号幅度谱

Fig. 5 Amplitude spectrum of simulated signal

幅度越大的谱线相对误差越小, 抗噪性能越强。且考虑到实际工况下, 温度、振动等环境因素带来了更为复杂的低频干扰, 大大降低了 $f_0 \sim 5f_0$ 的低频谱线的幅度精度, 因此选取中频段 $13f_0$ (即 $\frac{n-2m}{m}f_0$) 和 $15f_0$ (即 $\frac{n}{m}f_0$) 的谱线幅度信息分别作为 A_1, A_2 。

1.4 间隙信号提取方法

幅度谱 A_1, A_2 的估计是间隙信号提取的关键, 而幅度谱精确估计的关键点是信号整周期提取。此外, 为了解决采样点数随转速变化的问题和降低后续信号处理的压力, 采样电压信号需要进行等时间采样转换为等空间角度采样的尺度调整。实际测量过程中间隙信号提取的算法流程如图 6 所示。

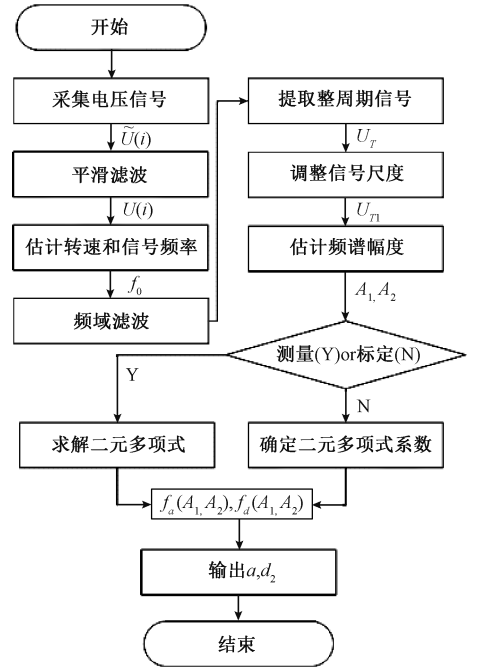


图 6 算法流程

Fig. 6 Algorithm process

1) 信号频率估计和自适应滤波

采集的电压信号 $\tilde{U}(i)$ 受环境、线缆、电路等噪声影响, 信号信噪比低且毛刺现象突出, 采用滑动均值滤波方法对电压信号进行降噪处理可有效缓解上述问题, 且提高了后面转速和信号频率提取的准确度, 降低了后续数据处理的压力。滑动均值滤波最关键的参数为奇数窗长 N_0 , 通常综合信号的有效频带、采样频率、资源消耗等因素来设置^[15], 表达式为:

$$U(i) = \frac{1}{N_0} \sum_{n=-\frac{N_0-1}{2}}^{\frac{N_0-1}{2}} \tilde{U}(i+n) \quad (10)$$

经滑动均值滤波后的电压信号 $U(i)$ 如图 7 所示, 其中篦齿上开的每个“W”型槽对应图中明显的向下凸起。为了避免信号峰值和谷值附近的噪声毛刺对转速预估的影响, 以每圈信号峰峰值从上往下 80% 处的电压值作为自适应转速提取基线, 基线与电压信号每 $(4m+1)$ 个交点

的点数差即对应了篦齿转一圈所用的时间(基线落在采样点之间时采用该两点的线性拟合以求取交点精确值),本文中 $m=4$,则篦齿转速可由下式估计得到:

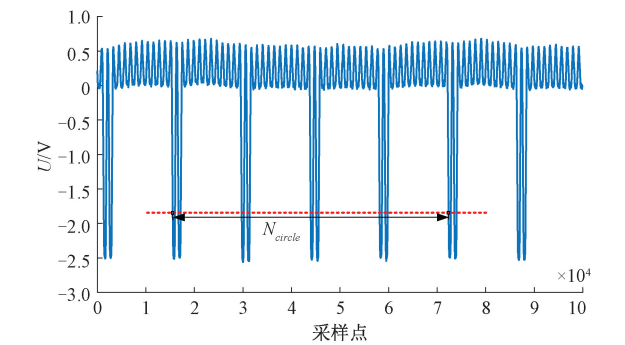


图 7 时域信号及转速提取

Fig. 7 Time domain signal and speed extraction

$$rpm = 60 \times f_s / N_{circle} \quad (11)$$
式中: rpm 为转速, f_s 为信号采样率, N_{circle} 为篦齿转一圈的采样点数。

由此可得,篦齿周向周期数(即篦齿个数)决定的特征频率 f_0 可估计为:

$$f_0 = \frac{rpm \times m}{60} \quad (12)$$

为了准确提取采集信号的周期,需要先对信号进行滤波。本文通过估计的信号特征频率 f_0 进行自适应频域滤波,有效规避了数字滤波器的相位偏移问题和无法自适应转速变化带来的信号频带改变问题。具体操作为:对信号进行快速傅里叶变换(fast Fourier transform, FFT),为保证前 $\frac{n}{m}$ 根谱线信息不丢失,前后都留出 $0.2 f_0$ 的余量,即截取 $\left[0.8 f_0, \frac{1.2 n}{m} f_0\right]$ 的频谱信息,然后再快速傅里叶逆变换(inverse fast Fourier transform, IFFT)得到滤波后的时域信号。

2) 信号整周期提取和尺度调整

信号整周期提取时以篦齿“W”型凹槽对应的峰值点(1个)和谷值点(2个)作为特征点(图8中标出)。篦齿每圈包含 m 个对称分布的“W”型凹槽。以某一特定凹槽对特征点按顺时针进行编号: $v_{l1}, p_1, v_{r1}, v_{l2}, p_2, v_{r2}, v_{l3}, p_3, v_{r3}, \dots, v_{lm}, p_m, v_{rm}, \dots$ 。其中 p_i 代表第 i 个峰值点, v_{li} 、 v_{ri} 分别代表第 i 个峰值左右对应谷值点。则提取方式分为 v_{r1} 到 v_{r2} , v_{r1} 到 $\frac{v_{rm+2}}{2}$, v_{r1} 到 $v_{r(m+1)}$, p_1 到 p_2 , p_1 到 $\frac{p_{m+2}}{2}$, p_1 到 p_{m+1} 6种。 $m=4$ 时各提取方式如图8所示。本文以特征频率 $\frac{n}{m} f_0$ 对应谱线幅度的结果作为提取方式优劣的评价准则。按各提取方式分别连续提取 100 圈 $\frac{n}{m} f_0$ 对应谱线的幅度结果如表1所示。

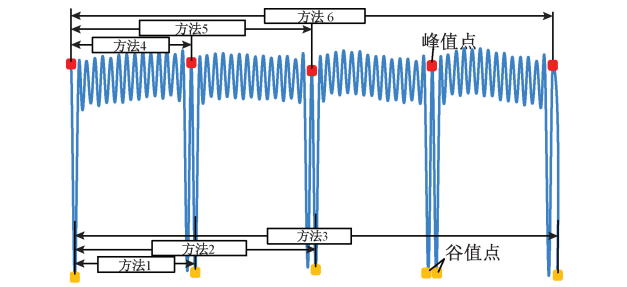


图 8 整周期提取方法($m=4$)

Fig. 8 Way of whole cycle extraction($m=4$)

表 1 各提取方法幅度结果(保留 4 位小数)

Table 1 the amplitude results of each extraction way (retaining four decimals)

方法	幅度	标准差	百分比误差/%
1	0.288 7	0.001 5	0.527 4
2	0.288 7	0.001 0	0.351 6
3	0.288 7	$2.393\ 5 \times 10^{-4}$	0.082 9
4	0.288 7	0.001 3	0.443 1
5	0.288 7	$9.181\ 8 \times 10^{-4}$	0.318 1
6	0.288 7	$2.387\ 9 \times 10^{-4}$	0.082 7

由表1可知, $p_1 \sim p_{m+1}$ (方法6)的提取方式标准差最小,用于整周期信号 U_T 提取最合适。

此外,由于采集模块采样率恒定,一次整周期信号提取的点数将随转速的增大而减小。为了降低提取点数变化对测量精度的影响并且固定提取点数方便后续幅度估计,考虑采用线性插值方式对提取的信号进行等时间采样转换为等空间角度采样的尺度调整。等空间角度采样点数 N_0 可与最低转速下的等时间采样点数保持一致,即 $N_0 = 60 f_s / (n \times rpm_{min})$ 。

3) 叶尖间隙和轴向窜动参数提取

尺度调整后的提取信号 U_{Ti} 经频谱幅度估计得到 A_1, A_2 ,再通过标定即可提取出篦齿的叶尖间隙和轴向窜动。由式(9)知, d_2, a 关于 A_1, A_2 的表达式非常复杂难以解析表示。当谐波次数 i 不超过 $\frac{n}{m}$ 、 $a \in [-1, 1]$ 时, $\frac{imatan(\theta)\pi}{nT}$ 的值接近0, $\cos \frac{imatan(\theta)\pi}{nT}$ 可近似为 a 的多项式,因此可采用关于 A_1, A_2 的二元多项式进行拟合分别得到叶尖间隙对 d_2 和轴向间隙 a 的标定曲面。拟合表达式为:

$$d_2 = \sum_{i=0}^{\lambda} \sum_{j=0}^{\lambda} p_{ij}^1 A_1^i A_2^j, i+j \leq \lambda \quad (13)$$

$$a = \sum_{i=0}^{\lambda} \sum_{j=0}^{\lambda} p_{ij}^2 A_1^i A_2^j, i+j \leq \lambda \quad (14)$$

式中: λ 是拟合阶数, p_{ij}^1, p_{ij}^2 是多项式标定系数。利用式 (13), (14) 即可分别实现叶尖间隙和轴向窜动量的动态测量。

2 实验和分析

为验证提出的叶尖间隙和轴向窜动测量方法的有效性和准确性, 搭建了图 9 所示的标定和实验系统平台。

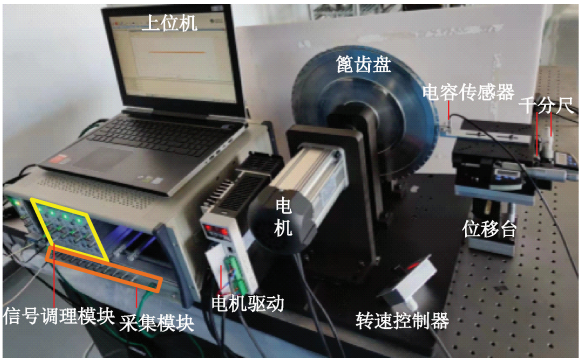


图 9 标定和实验系统平台

Fig. 9 Calibration and experimental system platform

整个测量系统由篦齿盘、电机及其驱动、带数显千分尺的三自由度位移台、“人”字芯极电容传感器、信号调理和采集模块、上位机和若干线缆等组成。轴向和径向上的千分尺移动精度 $1\text{ }\mu\text{m}$, 移动行程优于 10 mm , 可分别作为轴向窜动和叶尖间隙的基准值。

动态标定时, 篦齿转速设为 700 r/min , 以传感器端面沿篦齿端面对称分布时的位置为零轴向窜动位置(如图 4(b)中所示), 篦齿端面和传感器芯极相切位置为叶尖间隙零位, 并将此位置设为数显千分尺原位。通过轴向和径向上的数显千分尺分别控制轴向窜动 a 以 0.1 mm 的步进距离从 -1 mm 步进到 1 mm , 叶尖间隙 d_2 以 0.1 mm 的步进距离从 0.5 mm 步进到 1.5 mm , 步进顺序为先遍历 a , 再进给 d_2 。根据 1.4 节的所述方法, 幅度谱估计得到 A_1, A_2 带入式 (13) 和 (14), 再依据最小二乘原理对拟合阶数 λ 进行最优化迭代。综合考虑拟合精度、计算量、资源消耗等指标, 取 $\lambda = 5$ 。得到 d_2, a 的拟合标定系数见表 2 和 3, 标定曲面的均方根误差 (root mean square error, RMSE) 分别是 0.002 8 和 0.001 1 。

表 2 d_2 标定系数(保留 4 位有效数字)

Table 2 Calibration factors of d_2 (four significant digits retained)

系数	值	系数	值	系数	值	系数	值	系数	值
p_{00}^1	0.941 3	p_{10}^1	-0.336 8	p_{01}^1	0.046 92	p_{20}^1	0.083 22	p_{11}^1	0.005 745
p_{02}^1	-0.030 69	p_{30}^1	-0.028 79	p_{21}^1	0.002 189	p_{12}^1	-0.005 049	p_{03}^1	0.007 775
p_{40}^1	0.012 21	p_{31}^1	-0.000 622 6	p_{22}^1	0.000 400 7	p_{13}^1	0.000 615 4	p_{04}^1	-0.000 250 1
p_{50}^1	-0.002 220	p_{41}^1	-0.000 466 3	p_{32}^1	0.000 734 6	p_{23}^1	-0.000 569 2	p_{14}^1	0.000 292 0
p_{05}^1	-0.000 257 2								

表 3 a 标定系数(保留 4 位有效数字)

Table 3 Calibration factor of a (four significant digits retained)

系数	值	系数	值	系数	值	系数	值	系数	值
p_{00}^1	-0.071 76	p_{10}^1	0.157 3	p_{01}^1	-0.689 2	p_{20}^1	0.014 04	p_{11}^1	-0.142 3
p_{02}^1	0.123 6	p_{30}^1	0.005 392	p_{21}^1	-0.014 44	p_{12}^1	0.037 84	p_{03}^1	-0.002 331
p_{40}^1	-0.000 458 8	p_{31}^1	0.001 624	p_{22}^1	-0.004 934	p_{13}^1	0.011 62	p_{04}^1	-0.008 556
p_{50}^1	-0.000 748	p_{41}^1	0.000 757 3	p_{32}^1	-0.001 185	p_{23}^1	0.004 107	p_{14}^1	-0.006 591
p_{05}^1	0.001 856								

精度评定时, 对量程内全部 (a, d_2) 点都测量是不现实的, 因此选取量程内具有代表性的测试点来进行评定。本文基于上述标定曲面, 通过表 4 中给出的小 (0.6 mm)、中 (1.0 mm)、大 (1.4 mm) 3 个叶尖间隙配合 $\pm 1\text{ mm}$ 内 0.2 mm 步进间隔的轴向窜动的测试点在不同转速下的测量值同标定值的偏差来评定系统的测量精度和篦齿转速对测量系统精度的影响。被模拟的带冠叶片

工作转速为 2 500 r/min 。模拟的实心篦齿盘在实验室环境下工作转速有限, 转速过高会有一定危险, 试验转速最大值设置为最高转速的 0.7 倍 (1 750 r/min) 左右, 因此测试转速设置为从 700 r/min 以 300 r/min 间隔增加至 1 900 r/min 。叶尖间隙和轴向窜动的测量误差结果如图 10、11 所示。

表 4 测试点 ($a/\text{mm}, d_2/\text{mm}$)
Table 4 Test points ($a/\text{mm}, d_2/\text{mm}$)

(a, d_2)	(a, d_2)	(a, d_2)	(a, d_2)	(a, d_2)	(a, d_2)
$(-1.0, 0.6)$	$(0.2, 0.6)$	$(-1.0, 1.0)$	$(0.2, 1.0)$	$(-1.0, 1.4)$	$(0.2, 1.4)$
$(-0.8, 0.6)$	$(0.4, 0.6)$	$(-0.8, 1.0)$	$(0.4, 1.0)$	$(-0.8, 1.4)$	$(0.4, 1.4)$
$(-0.6, 0.6)$	$(0.6, 0.6)$	$(-0.6, 1.0)$	$(0.6, 1.0)$	$(-0.6, 1.4)$	$(0.6, 1.4)$
$(-0.4, 0.6)$	$(0.8, 0.6)$	$(-0.4, 1.0)$	$(0.8, 1.0)$	$(-0.4, 1.4)$	$(0.8, 1.4)$
$(-0.2, 0.6)$	$(1.0, 0.6)$	$(-0.2, 1.0)$	$(1.0, 1.0)$	$(-0.2, 1.4)$	$(1.0, 1.4)$
$(0, 0.6)$		$(0, 1.0)$		$(0, 1.4)$	

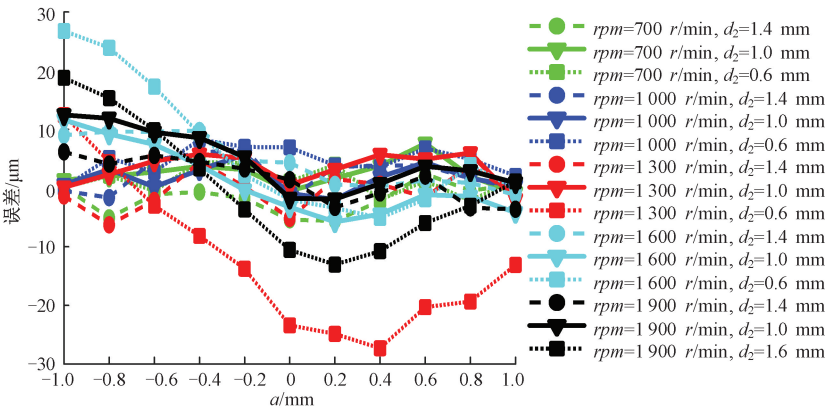


图 10 叶尖间隙误差曲线
Fig. 10 Error curves of blade tip clearance

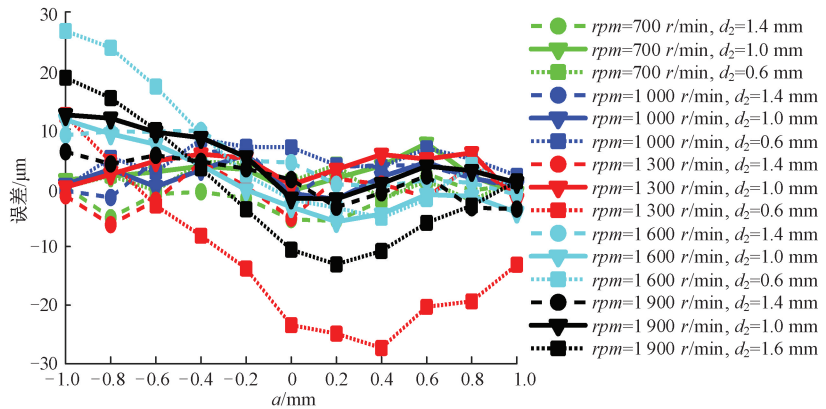


图 11 轴向窜动误差曲线
Fig. 11 Error curves of axial movement

结果表明,叶尖间隙 0.5~1.5 mm,轴向窜动 ± 1 mm 的量程内,提出的频谱估计方法在 1 300 r/min 以下的叶尖间隙的测量精度在 5 μm 以内。随着转速的增加,叶尖间隙的测量误差有所增大。即便如此,转速达到 1 900 r/min 时,测量误差仍小于 18 μm 。而轴向窜动的测量对转速的变化敏感性较低,700~1 900 r/min 转速范围内,轴向窜动的测量误差在 30 μm 以内。理论上,转速

的增加会有两方面影响,一方面会因测量系统固定的采样率造成采样点数减少,一方面会因转子受离心力增大造成叶片或篦齿“变长”、叶尖间隙变小,而不会对叶尖间隙和轴向窜动的测量精度有太大影响。上述测量结果会耦合转速的主要原因是实心模拟篦齿盘重量大,加上转轴和联轴器的安装不对中心等因素在篦齿盘转速增加时引起的篦齿盘振动的加剧和转子系统所受轴向力的改

变。由于测量系统的采样率远大于篦齿的信号频率,转速变化引起的采样点数变化通过图9的尺度调整后对测量结果影响甚微。可以预见,本文提出的方法在结构合理、配合精密的试验台或实际发动机篦齿上,能获得适应不同转速的高精度的测量结果。

3 结 论

本文首先采用多目标最优化方法确定了“人”字形电容传感器的结构参数,然后在制备的新型“人”字形电容传感器的基础上,提出了一种基于频谱幅度的篦齿叶尖间隙和轴向窜动同时测量的测量方法,做到了“一传两用”。该方法将时域信号转换到频域分析,有效规避了时域处理对信号高降噪性能的要求;提出了转速估计和基于信号特征频率的频域滤波来实现信号的整周期提取,解决了频谱估计中频谱泄露的难题;采用信号等空间角度采样方法,解决了信号整周期内采样点数反比于转速的问题;并通过二元多项式的拟合完成了叶尖间隙和轴向窜动的标定。最后,在实验室环境搭建了叶尖间隙和轴向窜动的测试系统平台,完成了测量系统的标定和精度测试。实验结果显示,700~1 900 r/min,叶尖间隙0.5~1.5 mm,轴向窜动 ± 1 mm的测试条件下。系统叶尖间隙测量精度在18 μm 内,轴向窜动测量精度在30 μm 内。

本文提出的叶尖间隙和轴向窜动同时测量的频谱方法在700~1 900 r/min的篦齿盘模型试验环境下取得了良好的测试效果,有待进一步开展发动机篦齿实际工作环境中更高转速、更大测量范围下的测试试验。

参考文献

- [1] 谢思莹,张小栋,熊逸伟,等. 三维叶尖间隙光纤探头设计及输出特性研究[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(11): 180-187.
XIE S Y, ZHANG X D, XIONG Y W, et al. Design and modeling of three-dimensional tip clearance optical probe[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(11): 180-187.
- [2] 邓澈,段发阶,蒋佳佳,等. 基于FPGA的叶尖间隙信号高速采集与处理方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2018, 32(3): 104-110.
DENG CH, DUAN F J, JIANG J J, et al. High speed acquisition and processing method for tip clearance signal based on FPGA[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2018, 32(3): 104-110.
- [3] 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/OL]. 航空学报, 2021:1-18[2022-06-20].

- NIU G Y, DUAN F J, ZHOU Q, et al. A dynamic measurement method of blade tip clearance by microwave phase difference ranging[J/OL]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2021:1-18[2022-06-20].
- [4] 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:1-29[2022-05-31]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1929.V.20210906.1259.022.html>.
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:1-29[2022-05-31]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1929.V.20210906.1259.022.html>.
- [5] ZHAO F T, JING X D, YANG M S, et al. Experimental study of rotor blades vibration and noise in multistage high pressure compressor and their relevance[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2020, 33(3): 870-878.
- [6] 贾新旺,刘飞,蔡其波. 燃气轮机篦齿封严特性的数值分析[J]. 汽轮机技术, 2021, 63(2): 111-114.
JIA X W, LIU F, CAI Q B. Numerical analysis of gas turbine labyrinth sealing characteristic[J]. Turbine Technology, 2021, 63(2): 111-114.
- [7] BUNKER R S. Axial turbine blade tips: Function, design, and durability[J]. Journal of Propulsion & Power, 2006, 22(2): 271-285.
- [8] WU J, WEN B, ZHANG Q, et al. A novel blade tip clearance measurement method based on event capture technique[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2020, 139(May): 106626.1-106626.16.
- [9] 熊宇飞. 航空发动机转子叶尖间隙测量[J]. 测控技术, 2004(1): 5-7.
XIONG Y F. Rotor tip-clearance measurement in aeroengine[J]. Measurement & Control Technology, 2004(1): 5-7.
- [10] 卢少彬. 基于维修数据的航空发动机篦齿密封特性分析[D]. 天津: 中国民航大学, 2018.
LU SH B. Analysis of aero-engine labyrinth seal characteristics based on maintenance data[D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2018.
- [11] 王建吉. 无油涡旋压缩机轴向间隙泄漏与齿顶密封研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2020.
WANG J J. Study on axial clearance leakage and tooth tip seal of oil-free scroll compressor[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2020.
- [12] 张衍,傅鑫,曹永华. 基于逆向射流抑制封严篦齿泄漏流动的数值及实验研究[J]. 航空动力学报, 2019, 34(1): 73-83.
ZHANG Y, FU X, CAO Y H. Numerical and

experimental study based on reverse jet to suppress leakage flow in the labyrinth seal [J]. Journal of Aerospace Power, 2019, 34(1): 73-83.

- [13] 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): 002029401987751.

- [14] 邵斌, 张伟, 陈伟民. 基于调频干涉的发动机转静子轴向间隙测量技术[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(11): 198-205.

SHAO B, ZHANG W, CHEN W M. Rotor-stator axial clearance measurement technique of engine based on frequency-swept interferometry [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(11): 198-205.

- [15] 邵兴臣, 段发阶, 蒋佳佳, 等. 基于自适应滑动均值和小波阈值的叶尖间隙信号降噪方法[J]. 传感技术学报, 2021, 34(1): 34-40.

SHAO X CH, DUAN F J, JIANG J J, et al. Denoising method of blade tip clearance signal based on adaptive moving average and wavelet threshold [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2021, 34(1): 34-40.

作者简介



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

E-mail: 2451024102@qq.com

Li Fafu received his B.Sc. degree from Tianjin University in 2020. He is currently a master student 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, and received his Ph.D. degree in 1994 from Tianjin University. He is currently 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.



易亮, 2012 年于西华大学获得硕士学位, 现为中国航发上海商用发动机制造有限责任公司工程师, 主要研究方向为旋转机械结构间隙测试技术。

E-mail: 563497728@qq.com

Yi Liang received his M.Sc. degree from Xihua University in 2012. He is currently an engineer at Shanghai AECC Commercial Aircraft Engine Manufacturing Co., Ltd. His main research interest is measurement technology of structural clearance of rotating machinery.