

文章编号: 1671-7449(2025)04-0373-09

J. Test Measur. Technol., 2025, 39(4): 373-381.

融合 ESPRIT 和 FFT 的动叶片振动参数 辨识方法研究

范振芳¹, 黄晋英¹, 刘思远², 卫焦霖¹

(1. 中北大学 机械工程学院, 山西 太原 030051; 2. 中北大学 计算机科学与技术学院, 山西 太原 030051)

摘要: 叶端定时(Blade Tip Timing, BTT)是当前研究叶片振动问题最有效的测试技术之一, 被广泛应用于动叶片的状态监测与故障诊断。然而, BTT技术固有的非均匀、欠采样特性引发的叶片振动参数辨识困难已成为当前BTT技术亟需解决的难题。首先, 研究旋转不变子空间(Estimating Signal Parameter via Rotational Invariance Techniques, ESPRIT)和快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT)辨识叶片振动参数的特征; 然后, 对叶片振动的频谱分析结果进行扩展; 最后, 提出一种融合ESPRIT和FFT的动叶片振动参数辨识方法。ESPRIT-FFT方法利用扩展频谱寻找叶片振动频率的估计值, 通过ESPRIT算法确定频率所属的频带, 进而辨识叶片振动参数。仿真研究证明了ESPRIT-FFT方法的可行性和抗噪性。离心压缩机叶轮振动试验显示ESPRIT-FFT方法辨识叶片振动频率的绝对误差为1.4 Hz, 相对误差为0.22%。

关键词: 叶端定时; 动叶片; 旋转不变子空间; 快速傅里叶变换; 频谱扩展; 参数辨识

中图分类号: TH17

文献标识码: A

doi: 10.62756/csjs.1671-7449.2025056

引用格式: 范振芳, 黄晋英, 刘思远, 等. 融合ESPRIT和FFT的动叶片振动参数辨识方法研究[J]. 测试技术学报, 2025, 39(4): 373-381.

FAN Zhenfang, HUANG Jinying, LIU Siyuan, et al. Research on vibration parameter identification method of rotating blade based on ESPRIT and FFT algorithm[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2025, 39(4): 373-381.

Research on Vibration Parameter Identification Method of Rotating Blade Based on ESPRIT and FFT Algorithm

FAN Zhenfang¹, HUANG Jinying¹, LIU Siyuan², WEI Jiaolin¹

(1. School of Mechanical Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China;

2. School of Data Science and Technology, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: Currently, blade tip timing (BTT) stands as one of the most effective monitoring techniques for studying blade vibration issues, and it is extensively utilized in condition monitoring and fault diagnosis of rotating blades. However, the difficulties in identifying blade vibration parameters caused by the inherent non-uniformity and under sampling characteristics of the BTT technique have become an urgent challenge that needs to be addressed. This paper initially investigates the attributes of blade vibration parameters identified by the estimating signal parameter via rotational invariance techniques (ESPRIT) and fast Fourier

收稿日期: 2025-01-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52405141); 山西省基础研究计划资助项目(202403021212143); 山西省高等学校科技创新资助项目(2024L177); 中国博士后科学基金资助项目(2024M752992)

作者简介: 范振芳(1995-), 男, 讲师, 博士, 主要从事旋转机械状态监测与运维研究。E-mail: fanzf@nuc.edu.cn.

transform(FFT) algorithms. Subsequently, it extended the spectral analysis results of blade vibration, and ultimately proposed a method for identifying vibration parameters of the rotating blade that integrates ESPRIT and FFT algorithms. The ESPRIT-FFT method employed the extended spectrum to estimate the blade vibration frequency, determined the frequency band via the ESPRIT algorithm, and subsequently identified the blade vibration parameters. Simulation studies demonstrate the feasibility and noise resistance of the ESPRIT-FFT method. The vibration test of the centrifugal compressor impeller reveals that the absolute error of the ESPRIT-FFT method in identifying blade vibration frequency is 1.4 Hz, with a relative error of 0.22%.

Key words: blade tip timing; rotating blade; estimating signal parameter via rotational invariance techniques; fast Fourier transform; extended spectrum; parameter identification

0 引言

动叶片是航空发动机、大型压缩机、连续风洞等重大装备完成能量转换的核心部件,其安全运行是重大装备机组健康管理和智能运维的重要组成部分^[1]。当前,叶端定时(Blade Tip Timing, BTT)是研究叶片振动问题最有效的测试技术之一,被广泛应用于动叶片状态监测与故障诊断^[2]。

BTT技术起源于间断相位法和脉冲调制法,其测试原理为通过在机组上安装的定时传感器连续感知叶片的实际到达时间,然后,结合转速同步信号计算叶片的理论到达时间,最后,结合两者的时间差获取叶片到达定时传感器的振动位移^[3]。对于单支定时传感器,转子旋转一圈,传感器对单个叶片的振动位移实现一次测量,单支定时传感器的采样频率近似等于转频^[4]。然而,实际叶片的振动频率远超转子旋转频率。因此,基于BTT技术获取的叶片振动信号具有严重的欠采样特性^[5],且现有的频谱分析方法无法有效辨识叶片的振动参数。

叶片振动参数辨识是通过特定算法对欠采样振动信号进行特征提取,包括幅值、相位、频率等。当前,国内外学者对叶片振动参数辨识算法进行了广泛探索,主要分为两类:时域类算法和空间类算法。时域类算法基于叶片单频或多频响应模型,利用非线性最小二乘法拟合叶片振动波形,进而辨识叶片振动参数,主要包括单参数法^[6]、双参数法^[7-8]、自回归法^[9]、正弦拟合法^[10-11]等,一般用于解决变转速工况下叶片单频振动响应的参数辨识问题。空间类算法是对叶片振动信号的自相关矩阵进行特征分解,然后,利用叶片振动参数与特征值、特征向量之间的映射关系实现叶片振动参数辨识。空间类算法主要包括多信号分类(Multiple Signal Classification,

MUSIC)算法和旋转不变子空间(Estimating Signal Parameter via Rotational Invariance Techniques, ESPRIT)算法。MUSIC算法根据叶片振动信号向量与特征向量之间的正交性对叶片振动频率进行搜索估计^[12-14],其通过频率搜索辨识叶片振动参数,对定时传感器布局有严格的要求。ESPRIT算法是将两支定时传感器构成有延迟和无延迟通道,根据信号所携带的叶片振动相位差信息,利用空间类算法解模糊,得到振动频率的估计值,该算法通过相关矩阵特征分解能够直接辨识叶片振动频率^[15-16]。ESPRIT算法通过两组信号的相位差辨识叶片振动频率,当信号信噪比较大时,相位差辨识精度低,进而会导致叶片振动参数辨识误差。此外,基于伪谱估计^[17]、压缩感知^[18]、叶片振动主动混叠^[19]等方法也可用于对叶片振动参数进行辨识。

本文在ESPRIT算法原理的基础上,首先,研究该算法辨识叶片振动参数的特征,揭示ESPRIT算法在辨识叶片振动频带方面的优越性;然后,对叶片振动欠采样信号进行快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT),研究叶片振动频谱的混叠特性,提出叶片振动频谱扩展方法;最后,结合ESPRIT算法和频谱扩展,提出一种融合ESPRIT和FFT的动叶片振动参数辨识方法(ESPRIT-FFT),有效地解决了叶片振动参数辨识精度低的问题,为基于BTT技术的动叶片状态监测与故障诊断提供理论支撑。

1 ESPRIT算法

1.1 振动信号相关矩阵特征值分解

假设叶片振动信号 $y(t)$ 由复正弦信号和白噪声组成,其振动信号的表达式为

$$y(t) = \sum_{k=1}^K A_k e^{2\pi f_k t + \varphi_k} + v(t), \quad (1)$$

式中: A_i 、 f_i 和 φ_i 分别为叶片振动的幅值、频率和相位; i 为振动分量; j 为复数单位; K 为振动分量数量; $v(t)$ 为叶片振动信号噪声。

通过定时传感器连续采集 M 个数据点, 第 q

$$y(q) = \begin{bmatrix} A_1 e^{2\pi f_1 t_{qj} + \varphi_1} + A_2 e^{2\pi f_2 t_{qj} + \varphi_2} + \dots + A_K e^{2\pi f_K t_{qj} + \varphi_K} \\ A_1 e^{2\pi f_1 t_{q+1j} + \varphi_1} + A_2 e^{2\pi f_2 t_{q+1j} + \varphi_2} + \dots + A_K e^{2\pi f_K t_{q+1j} + \varphi_K} \\ \vdots \\ A_1 e^{2\pi f_1 t_{q+M-1j} + \varphi_1} + A_2 e^{2\pi f_2 t_{q+M-1j} + \varphi_2} + \dots + A_K e^{2\pi f_K t_{q+M-1j} + \varphi_K} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ e^{2\pi f_1 \tau_{1j}} & e^{2\pi f_2 \tau_{1j}} & \dots & e^{2\pi f_K \tau_{1j}} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ e^{2\pi f_1 \tau_{M-1j}} & e^{2\pi f_2 \tau_{M-1j}} & \dots & e^{2\pi f_K \tau_{M-1j}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_1 e^{2\pi f_1 t_{qj} + \varphi_1} \\ A_2 e^{2\pi f_2 t_{qj} + \varphi_2} \\ \vdots \\ A_K e^{2\pi f_K t_{qj} + \varphi_K} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中: τ_i 为相邻采样点的时间差值, $\tau_i = t_{q+i} - t_{q0}$

进一步, 式(1)可以写成矩阵形式为

$$y(q) = As(q) + v(q), \quad (4)$$

式中:

$$A = [a(f_1) \quad a(f_2) \quad \dots \quad a(f_K)] = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ e^{2\pi f_1 \tau_{1j}} & e^{2\pi f_2 \tau_{1j}} & \dots & e^{2\pi f_K \tau_{1j}} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ e^{2\pi f_1 \tau_{M-1j}} & e^{2\pi f_2 \tau_{M-1j}} & \dots & e^{2\pi f_K \tau_{M-1j}} \end{bmatrix}, \quad (5)$$

其中, 向量 $a(f)$ 、 $s(q)$ 和 $v(q)$ 的表达式为

$$a(f) = [1 \quad e^{2\pi f \tau_{1j}} \quad \dots \quad e^{2\pi f \tau_{M-1j}}]^T, \quad (6)$$

$$s(q) =$$

$$[A_1 e^{2\pi f_1 t_{qj} + \varphi_1} \quad A_2 e^{2\pi f_2 t_{qj} + \varphi_2} \quad \dots \quad A_K e^{2\pi f_K t_{qj} + \varphi_K}]^T, \quad (7)$$

$$v(q) = [v(t_q) \quad v(t_{q+1}) \quad \dots \quad v(t_{q+M-1})]^T. \quad (8)$$

叶片振动信号 $y(q)$ 的自相关矩阵计算公式为

$$R = E\{y(q)y^H(q)\}. \quad (9)$$

这里, 假设噪声信号是均值为 0, 方差为 σ_v^2 的白噪声。因此, 式(9)的自相关矩阵可以表示为

$$R = APA^H + \sigma_v^2 E, \quad (10)$$

式中: E 为单位矩阵, P 为正定的对角矩阵,

$$P = \text{diag}\{|A_1|^2, |A_2|^2, \dots, |A_K|^2\}. \quad (11)$$

因此, 可得矩阵 APA^H 共有 K 个非零特征值。对 APA^H 进行特征值分解, 设 $\bar{\lambda}_1$ 、 $\bar{\lambda}_2$ 、 \dots 、 $\bar{\lambda}_M$ 为特征值, 则 u_1 、 u_2 、 \dots 、 u_M 表示对应的特征向量。相关矩阵 R 共有 M 个特征值, 对相关矩阵 R 进行特征值分解, 可得特征值的表达式为

$$\begin{cases} \lambda_i = \bar{\lambda}_i + \sigma_v^2, & i = 1, \dots, K, \\ \lambda_i = \sigma_v^2, & i = K + 1, \dots, M. \end{cases} \quad (12)$$

次采样的信号向量可以定义为

$$y(q) = [y(t_q) \quad y(t_{q+1}) \quad \dots \quad y(t_{q+M-1})]^T. \quad (2)$$

忽略噪声信号 $v(t)$, 式(2)中复正弦信号可以

展开为

自相关矩阵 R 中有 K 个特征值与信号有关, 其余 $M-K$ 个特征值仅与噪声有关。根据以上信息, 有以下重要定义:

1) 信号子空间 E_s : E_s 是由 λ_1 、 λ_2 、 \dots 、 λ_K 对应的特征向量 u_1 、 u_2 、 \dots 、 u_K 生成的子空间, 记为

$$E_s = \text{span}\{u_1 \quad u_2 \quad \dots \quad u_K\}. \quad (13)$$

2) 噪声子空间 E_N : E_N 是由 λ_{K+1} 、 \dots 、 λ_M 对应的特征向量 u_{K+1} 、 \dots 、 u_M 生成的子空间, 记为

$$E_N = \text{span}\{u_{K+1} \quad u_{K+2} \quad \dots \quad u_M\}. \quad (14)$$

1.2 ESPRIT 算法原理

在实际试验过程中, 两支定时传感器可以构成有延迟的双通道。ESPRIT 算法根据两组叶片振动信号所携带的相位差信息, 通过频率解模糊, 对叶片振动频率进行估计。根据式(2), 两支定时传感器第 q 次采样的叶片振动信号可以定义为

$$y_1(q) = [y_1(t_q) \quad y_1(t_{q+1}) \quad \dots \quad y_1(t_{q+M-1})]^T, \quad (15)$$

$$y_2(q) = [y_2(t_q) \quad y_2(t_{q+1}) \quad \dots \quad y_2(t_{q+M-1})]^T. \quad (16)$$

这里, 假设两支定时传感器之间的安装夹角为 $\Delta\beta$, 因此, 两支定时传感器通道之间的延迟时间为

$$\tau^\dagger = \frac{\Delta\beta}{2\pi f_s}, \quad (17)$$

式中: f_s 为转轴旋转频率, 单位为 Hz。

进一步, 式(16)可以改写为

$$y_2(q) = [y_1(t_q + \tau^\dagger) \quad y_1(t_{q+1} + \tau^\dagger) \quad \dots \quad y_1(t_{q+M-1} + \tau^\dagger)]^T. \quad (18)$$

根据式(4),两支定时传感器采集的振动信号可以表示为

$$\mathbf{y}_1(q) = \mathbf{A}s(q) + \mathbf{v}_1(q), \quad (19)$$

$$\mathbf{y}_2(q) = \mathbf{A}\mathbf{A}^\dagger s(q) + \mathbf{v}_2(q), \quad (20)$$

式中:

$$\mathbf{A}^\dagger = \begin{bmatrix} e^{-2\pi f_1 \tau^\dagger j} & & & \\ & e^{-2\pi f_2 \tau^\dagger j} & & \\ & & \ddots & \\ & & & e^{-2\pi f_k \tau^\dagger j} \end{bmatrix}. \quad (21)$$

将向量 $\mathbf{y}_1(q)$ 和 $\mathbf{y}_2(q)$ 合并成一个向量 $\mathbf{Y}(q)$, 可以表示为

$$\mathbf{Y}(q) = \begin{bmatrix} \mathbf{y}_1(q) \\ \mathbf{y}_2(q) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} \\ \mathbf{A}\mathbf{A}^\dagger \end{bmatrix} s(q) + \begin{bmatrix} \mathbf{v}_1(q) \\ \mathbf{v}_2(q) \end{bmatrix}. \quad (22)$$

向量 $\mathbf{Y}(q)$ 的自相关矩阵计算公式为

$$\mathbf{R} = E\{\mathbf{Y}(q)\mathbf{Y}^H(q)\} = \bar{\mathbf{A}}\bar{\mathbf{P}}\bar{\mathbf{A}}^H + \sigma_v^2 \mathbf{E}. \quad (23)$$

然后,对自相关矩阵 \mathbf{R} 进行特征值分解, \mathbf{E}_s 为前 K 个大特征值对应的特征向量组成的信号子空间, $\mathbf{E}_s = \text{span}\{\mathbf{u}_1, \mathbf{u}_2, \dots, \mathbf{u}_K\}$, \mathbf{E}_N 为 $2M-K$ 个较小特征值对应的特征向量组成的噪声子空间, $\mathbf{E}_N = \text{span}\{\mathbf{u}_{K+1}, \mathbf{u}_{K+2}, \dots, \mathbf{u}_{2M}\}$ 。这时,存在唯一的、非奇异的 $M \times M$ 维满秩矩阵 \mathbf{T} 使下式成立

$$\mathbf{E}_s = \bar{\mathbf{A}}\mathbf{T}. \quad (24)$$

根据矩阵的时移不变特性,可以将 \mathbf{E}_s 分解为两个矩阵,即 $\mathbf{E}_{y_1} \in \mathbb{C}^{M \times K}$ 和 $\mathbf{E}_{y_2} \in \mathbb{C}^{M \times K}$,可以得到如下关系式

$$\mathbf{E}_s = \begin{bmatrix} \mathbf{E}_{y_1} \\ \mathbf{E}_{y_2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}\mathbf{T} \\ \mathbf{A}\mathbf{A}^\dagger \mathbf{T} \end{bmatrix}. \quad (25)$$

根据式(25),可以得到

$$\mathbf{T}^{-1} \mathbf{A}^\dagger \mathbf{T} = (\mathbf{E}_{y_1}^H \mathbf{E}_{y_1})^{-1} \mathbf{E}_{y_1}^H \mathbf{E}_{y_2}. \quad (26)$$

式中: $(\mathbf{E}_{y_1}^H \mathbf{E}_{y_1})^{-1} \mathbf{E}_{y_1}^H \mathbf{E}_{y_2}$ 的特征值为 \mathbf{A}^\dagger 的对角元素。

对 $(\mathbf{E}_{y_1}^H \mathbf{E}_{y_1})^{-1} \mathbf{E}_{y_1}^H \mathbf{E}_{y_2}$ 进行特征值分解,通过计算特征值 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_K$ 携带的信号延迟相位差得到振动频率估计值为

$$P_{\text{esprit}}(k) = \left| \frac{\angle \lambda_k}{2\pi\tau^\dagger} \right|, \quad (27)$$

式中: $\angle(\cdot)$ 表示取相位。

ESPRIT 算法根据两支传感器通道所携带的相位差信息,通过两次特征值分解,对叶片振动频率进行辨识。然而,在实际工程应用中,ESPRIT 算法对叶片振动信号的噪声比较敏感,

通过 ESPRIT 算法对 BTT 获取的欠采样信号进行频率辨识存在较大误差。

1.3 ESPRIT 算法仿真分析

基于 MATLAB 软件模拟叶片振动信号,并通过仿真研究 ESPRIT 算法的误差特征。模拟叶片单频异步振动,振动幅值为 1 mm,振动频率为 378 Hz。模拟叶片振动全采样,根据香农采样定理,全采样的采样频率设置为 1 000 Hz。模拟基于 BTT 技术的叶片振动测试,仿真 2 支 BTT 传感器,分别命名为 Tip1 和 Tip2,传感器安装角度分别设置为 0° 和 30° 。模拟叶片转子的旋转频率为 100 Hz,即 BTT 技术单探针的采样频率为 100 Hz。叶片振动采样时长为 100 s。模拟叶片振动测试过程中的非确定性因素,在叶片振动信号中添加白噪声,信噪比 $\text{SNR}=10$ dB。图 1 展示了 0.2 s 的叶片振动信号,图中折线表示叶片振动全采样信号,散点图表示叶片振动欠采样信号。

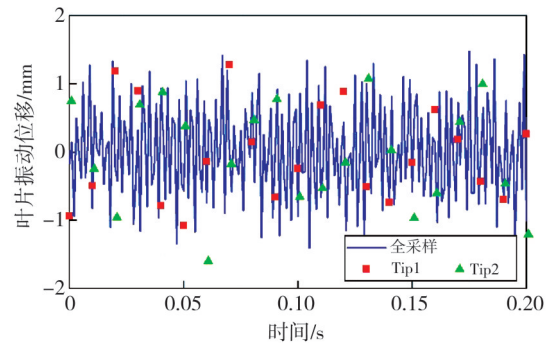


图 1 叶片振动信号仿真模拟

Fig. 1 Simulation signal of blade vibration

对叶片振动全采样信号和 BTT 欠采样信号进行 FFT 分析,不同信号的频谱分析结果如图 2 所示。可以发现:1) 全采样信号的频谱分析结果为 378 Hz 和 622 Hz,其中 622 Hz 是由于 FFT 双边谱特性导致的;2) BTT 欠采样信号的频谱分析结果为 22 Hz 和 78 Hz,这是由于在欠采样状态下,频率混叠造成的。BTT 欠采样信号的频谱分析结果与仿真假设完全不同。

利用 ESPRIT 算法对叶片振动信号进行参数辨识。由上述内容可知,仿真信号的数据长度为 1×10^4 ,设置每次连续采集的数据点长度 $M=100$,因此,根据仿真信号可以对叶片振动频率重复估计 100 次。为了将 ESPRIT 算法的结果进行图形可视化,对每次频率估计结果进行赋值,其计算公式为

$$Q(i) = \frac{F_{\max}}{100}, \quad i = 1, 2, \dots, 100, \quad (28)$$

式中: F_{\max} 为扩展频谱幅值的最大值; $Q(i)$ 为无量纲参数; i 为估计的次数。

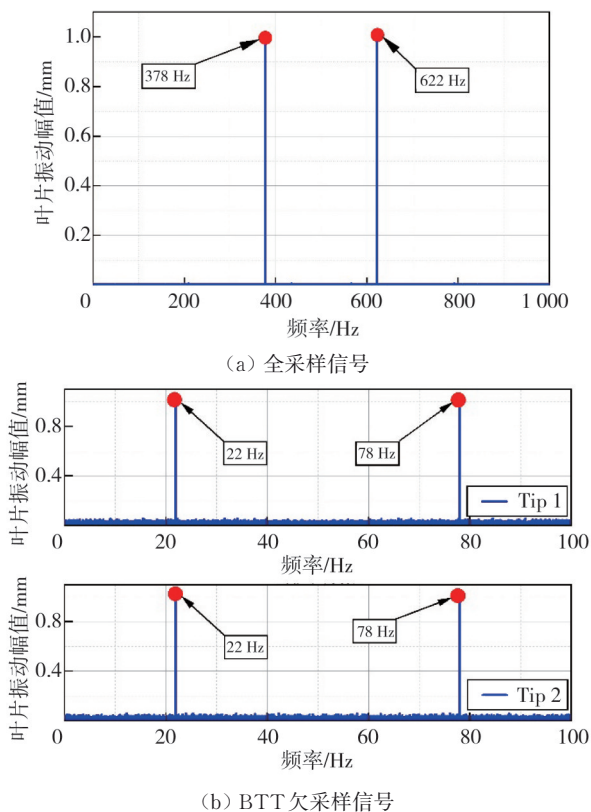


图 2 叶片振动信号频谱分析结果

Fig. 2 Spectral analysis results of blade vibration signals

接着, 将每一次频率估计结果作为横坐标, 对应的 $Q(i)$ 作为纵坐标绘制 ESPRIT 算法结果的散点图, 如图 3 所示。

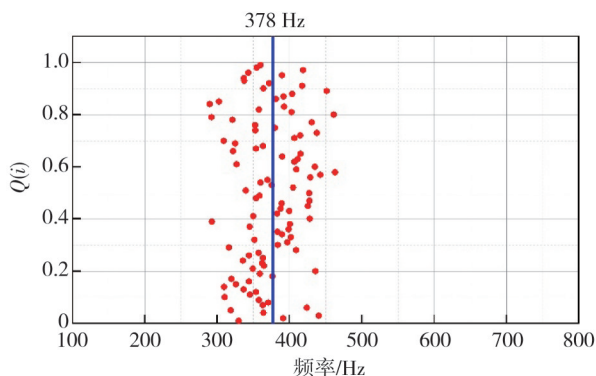


图 3 基于 ESPRIT 算法的叶片振动频率辨识结果

Fig. 3 Identification results of blade vibration frequency based on ESPRIT algorithm

图 3 显示, ESPRIT 算法获取的叶片振动频率分布在实际频率 378 Hz 附近, 平均值为 373.83 Hz, 频率辨识绝对误差和相对误差分别为

4.17 Hz 和 1.10%。

2 ESPRIT-FFT 方法

2.1 基于 ESPRIT 增强 FFT 的方法

叶片振动模拟频率为 378 Hz, BTT 采样频率为 100 Hz, 因此, 可以得到叶片振动的混叠频率为

$$\text{Mod}(378, 100) = 78, \quad (29)$$

式中: $\text{Mod}(\cdot)$ 为求余函数。

根据图 2(b), 对 BTT 欠采样振动信号进行 FFT 分析, 虽然无法准确辨识叶片振动频率, 但可以准确辨识叶片振动的混叠频率。另外, 图 3 显示 ESPRIT 算法的估计结果分布在真实频率附近, 辨识精度较低, 但 ESPRIT 算法可以准确估计叶片振动频率所在的频带。因此, 可以通过将 FFT 结果进行倍频扩展, 然后, 结合 ESPRIT 算法的结果, 实现叶片振动频率的准确辨识。本文将该方法称为融合 ESPRIT 和 FFT 的动叶片振动参数辨识方法, 简称为 ESPRIT-FFT 方法。

2.2 ESPRIT-FFT 方法仿真分析

首先, 将图 2(b) 的 2 组叶片振动频谱进行平均处理。然后, 将处理后的频谱按照 8 倍频进行扩展。接着, 将 ESPRIT 算法的估计结果绘制到扩展后的频谱。ESPRIT-FFT 方法的辨识结果如图 4 所示, 可以发现 ESPRIT-FFT 方法辨识结果与仿真假设完全一致, 能够准确辨识叶片振动频率。

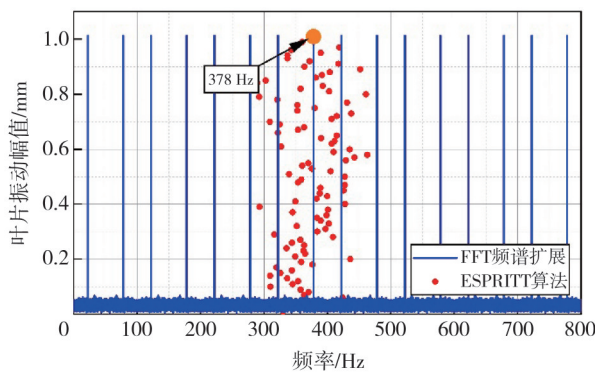


图 4 信噪比为 10 dB 时, 基于 ESPRIT-FFT 方法的叶片振动频率辨识结果

Fig. 4 Identification results of blade vibration frequency based on ESPRIT-FFT method when SNR=10 dB

接着, 进一步考察 ESPRIT-FFT 方法的抗噪性。将叶片振动信号中的白噪声设置为 $\text{SNR} = -5 \text{ dB}$ 。利用 ESPRIT-FFT 方法辨识叶片振动频率, 结果如图 5 所示。图 5 显示 ESPRIT 算法的辨识结果方差较大, 辨识频率的平均值为

401.19 Hz, 绝对误差达到23.19 Hz, 与仿真值偏差较大。

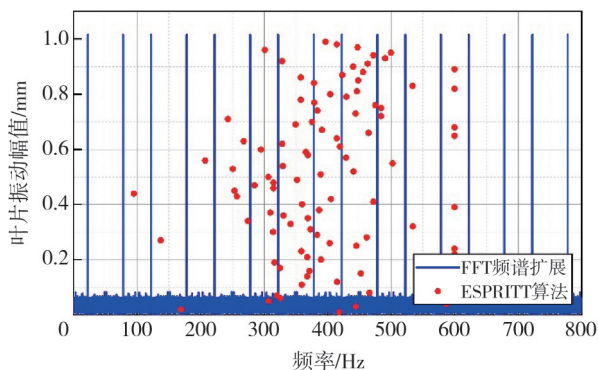


图5 信噪比为-5 dB时, 基于ESPRIT-FFT方法的叶片振动频率辨识结果

Fig. 5 Identification results of blade vibration frequency based on ESPRIT-FFT method when SNR=-5 dB

为了更准确地辨识叶片振动频率, 本文以1/2倍采样频率为基准, 对扩展后的频谱进行频段划分, 然后, 统计不同频段内ESPRIT算法辨识结果所占的比例, 结果如图6所示。图6中黄色矩形条表示ESPRIT算法辨识结果所占的比例, 根据条形图可以准确定位叶片振动频率所在的频带, 进而可以确定叶片振动频率为378 Hz, 与仿真假设完全一致。

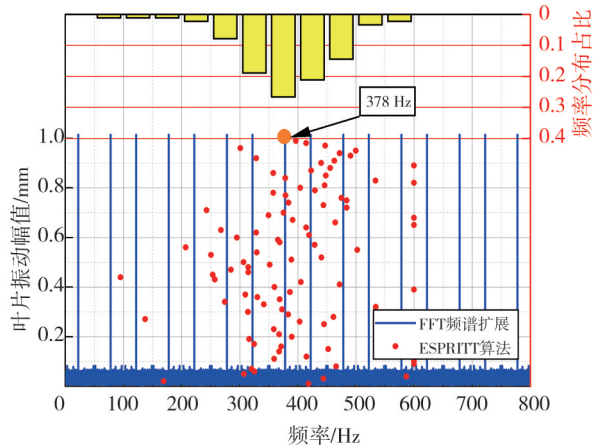


图6 信噪比为-5 dB时, 不同频段内ESPRIT算法辨识结果所占比例

Fig. 6 Proportion of ESPRIT algorithm identification results within different frequency bands when SNR=-5 dB

ESPRIT-FFT方法结合了ESPRIT算法和FFT算法频率辨识的优势, 通过扩展FFT算法的频谱预测叶片振动可能出现的频率, 然后, 利用ESPRIT算法确定叶片振动频率的频带, 最后, 确定叶片振动频率。基于ESPRIT-FFT方法的叶片振动频率辨识方法如图7所示。仿真结果显示ESPRIT-FFT方法的辨识结果与仿真假设完全一致, 可以证明ESPRIT-FFT方法的可行性和可靠性。

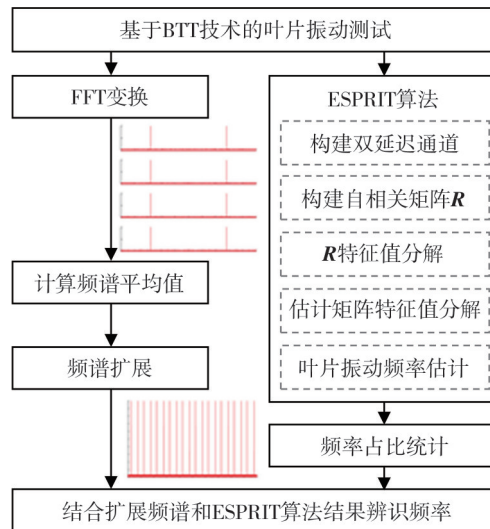


图7 ESPRIT-FFT方法的流程图

Fig. 7 Flowchart of ESPRIT-FFT method

3 离心压缩机试验及结果分析

3.1 离心压缩机试验台

在沈鼓集团Φ800型号离心压缩机模型级试验台上开展基于BTT技术的叶轮叶片振动试验。离心压缩机试验台主要由进口导叶、离心叶轮、扩压器、回流通道等组成, 离心压缩机及叶轮实物图见图8所示。离心压缩机叶轮额定转速可达9 000 r/min。

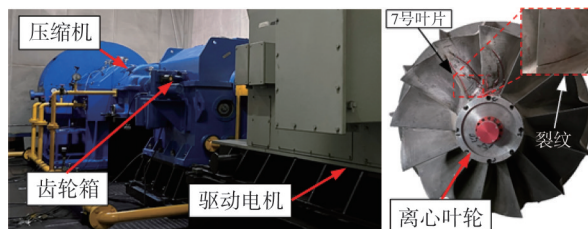


图8 离心压缩机试验台

Fig. 8 Centrifugal compressor test rig

本文利用BTT技术和应变片法开展离心压缩机叶轮叶片振动测试与分析。在离心压缩机进口的型环上安装2支BTT传感器, 分别命名为Tip1和Tip2, 2支传感器的夹角为10°。同时, 在叶轮叶片表面粘贴应变片, 对叶片振动应力进行测试, 用于验证本文研究方法在工业应用中的准确性。离心压缩机叶轮振动测试传感器布局如图9所示。

离心压缩机叶轮叶片振动测试系统包括应变测试系统和BTT测试系统。应变信号传输采用德国MANNER公司的遥测系统, 遥测系统的转子部件固定在压缩机的主轴端, 静子部件固定在压缩机进口管路中。应变信号经NI-9231采集卡将

模拟信号传输到计算机端的 DASP 采集系统, 进行信号的采集和分析, 应变信号的采样频率设置为 10 240 Hz。BTT 测试系统采用美国 HOOD 公司的激光发生器, 当叶片经过定时传感器时, 定时传感器生成方波信号并发送到 PCI-6602 采集卡, 进而记录试验过程中叶片的 BTT 信号。离心压缩机叶轮叶片振动测试系统如图 10 所示。

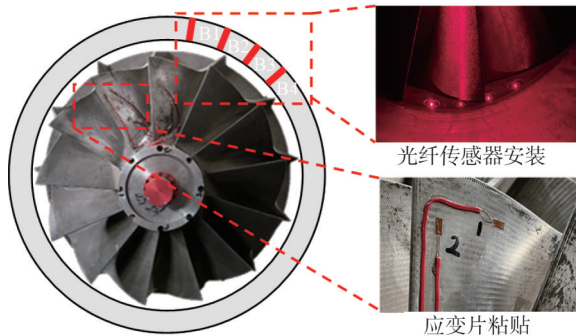


图 9 离心压缩机叶轮振动测试传感器布局

Fig. 9 Sensor layout for impeller vibration test of centrifugal compressor



(a) BTT采集模块

(b) 应变采集模块



(c) 叶轮叶片振动测试软件

图 10 离心压缩机叶轮振动测试系统

Fig. 10 Impeller vibration test system of centrifugal compressor

3.2 离心压缩机试验结果分析

离心压缩机在恒速工况下运行, 压缩机运行转速为 5 628 r/min, 待转速稳定后, 开始叶轮叶片振动测试。基于实测的 BTT 信号计算叶片振动位移, 其中 7 号叶片振动测量结果如图 11 所示。对叶片的振动信号进行 FFT 分析, 7 号叶片振动的频谱计算结果如图 12 所示。

根据 ESPRIT-FFT 方法的原理, 首先, 将图 12 的频谱进行 10 倍扩展; 然后, 基于叶片振动测量结果, 建立叶片振动自相关矩阵, 利用 ESPRIT 算法对叶片振动频率进行辨识, 并统计各频带内辨识结果的占比; 最后, 绘制 ESPRIT-FFT 方法的频率辨识

结果, 如图 13 所示, 可以发现, 离心压缩机叶轮 7 号叶片振动频率为 635.3 Hz。

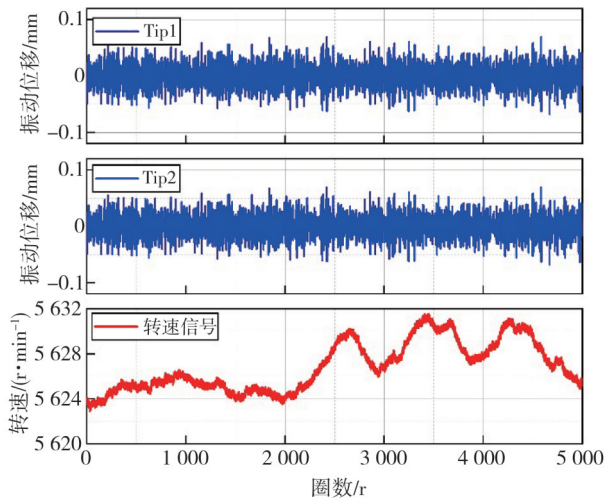


图 11 7号叶片振动测量结果

Fig. 11 Vibration measurement results of the 7th blade

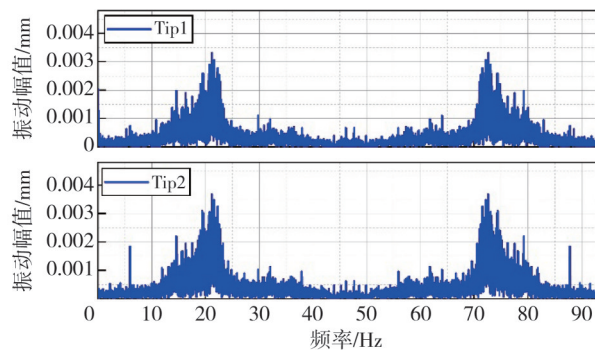


图 12 7号叶片振动频谱分析结果

Fig. 12 Vibration spectrum analysis results of the 7th blade

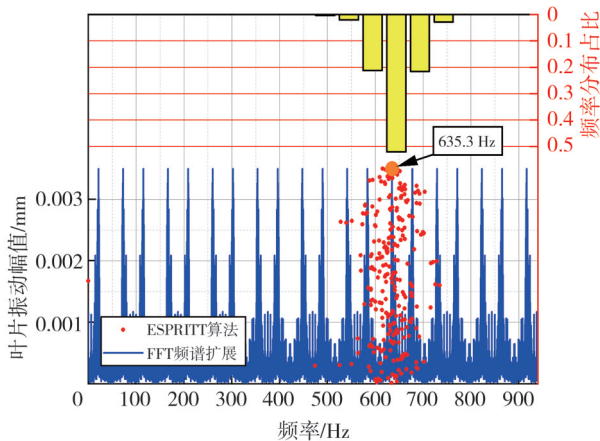


图 13 基于 ESPRIT-FFT 方法的 7 号叶片振动参数辨识结果
Fig. 13 Vibration parameters identification results of the 7th blade based on ESPRIT-FFT method

为了进一步验证 ESPRIT-FFT 方法的准确性, 本文对 7 号叶片的应变信号进行分析, 取应变信号数据长度为 10 s, 应变信号的时域图如

图 14(a) 所示, 并对应变信号进行频谱分析, 结果如图 14(b) 所示, 可以发现叶片振动频率为 633.9 Hz。与应变片测试结果相比, ESPRIT-FFT 方法叶片振动频率的绝对误差为 1.4 Hz, 相对误差为 0.22%。因此, 可以证明 ESPRIT-FFT 方法在实际工程应用中的可靠性。

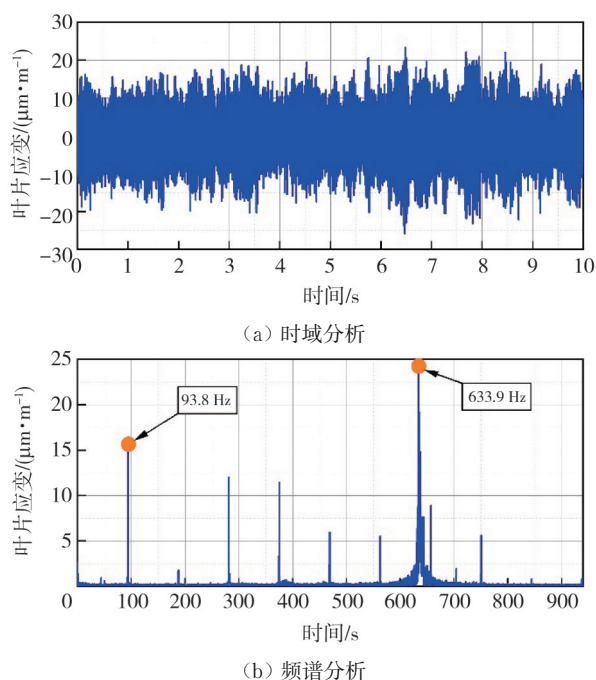


图 14 7号叶片应变分析结果

Fig. 14 Vibration measurement results of the 7th blade

4 结论

本文通过理论研究和仿真分析揭示了 ESPRIT 和 FFT 算法辨识叶片振动参数的优点和缺陷。ESPRIT 算法的频率辨识精度低, 但能够准确辨识叶片振动频率的频带, 通过对 FFT 的频谱进行扩展能够有效获取叶片振动频率的估计值。然后, 本文结合两种算法的优点, 提出一种融合 ESPRIT 和 FFT 的动叶片振动参数辨识方法。仿真分析证明了 ESPRIT-FFT 方法的可行性和抗噪性。在离心压缩机试验台开展叶轮叶片振动试验, 与应变片法的结果相比, ESPRIT-FFT 方法频率辨识的绝对误差为 1.4 Hz, 相对误差为 0.22%, 进一步证明了 ESPRIT-FFT 方法在实际工程中应用的价值。然而, ESPRIT-FFT 方法只适用于解决频带内叶片单频振动的问题, 对于动叶片多频振动参数辨识, 还需在未来的工作中继续研究。

参考文献:

- [1] 贺长波. 离心式压缩机叶片状态在线监测与故障预警方法研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2019.
- [2] 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.
- [3] FAN Z, LI H, DONG J, et al. An improved multiple per revolution-based blade tip timing method and its applications on large-scale compressor blades [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2022, 167: 108538.
- [4] DONG J, LI H, FAN Z, et al. Time-frequency sparse reconstruction of non-uniform sampling for non-stationary signal [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2021, 70(11): 11145-11153.
- [5] CHEN Z, SHENG H, XIA Y, et al. A comprehensive review on blade tip timing-based health monitoring: status and future [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2021, 149: 107330.
- [6] 郭浩天, 段发阶, 汪猛. 基于叶尖定时单参数法的叶片共振倍频数辨识[J]. *天津大学学报(自然科学与工程技术版)*, 2016, 49(9): 951-955.
GUO Haotian, DUAN Fajie, WANG Meng. Engine order identification based on blade tip-timing single parameter method [J]. *Journal of Tianjin University (Science and Technology)*, 2016, 49(9): 951-955. (in Chinese)
- [7] HEATH S. A new technique for identifying synchronous resonances using tip-timing [J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2000, 122(2): 219-225.
- [8] LI H, FAN Z, DONG J, et al. An improved blade vibration difference-based two-parameter plot method for synchronous vibration parameter identification of rotating blades [J]. *Measurement*, 2023, 207: 112397.
- [9] CARRINGTON I B, WRIGHT J R, COOPER J E, et al. A comparison of blade tip timing data analysis methods [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, 2001, 215(5): 301-312.
- [10] KAŹMIERCZAK K, PRZYSOWA R. Standard sine fitting algorithms applied to blade tip timing data [J]. *Journal of KONBiN*, 2014, 30(1): 21-30.
- [11] FAN Z, LI H, HUANG J, et al. Blade vibration difference-based circumferential Fourier fitting algorithm for synchronous vibration parameter identification of rotation blades [J]. *Sensors*, 2024, 24(24): 8083.

- [12] WANG Z, YANG Z, WU S, et al. An improved multiple signal classification for nonuniform sampling in blade tip timing[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2020, 69(10): 7941-7952.
- [13] WANG Z, YANG Z, LI H, et al. Subspace dimension reduction for faster multiple signal classification in blade tip timing[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2021, 70: 3509510.
- [14] LIU Z, DUAN F, NIU G, et al. Reconstruction of blade tip-timing signals based on the MUSIC algorithm[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2022, 163: 108137.
- [15] 李孟麟, 段发阶, 欧阳涛, 等. 基于叶尖定时的旋转机械叶片振动频率辨识 ESPRIT 方法[J]. *振动与冲击*, 2010, 29(12): 18-21.
LI Menglin, DUAN Fajie, OUYANG Tao, et al. ESPRIT method for blade vibration frequency identification in rotating machinery based on blade tip-timing measurement [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2010, 29(12): 18-21. (in Chinese)
- [16] 贺长波, 李宏坤, 赵新维, 等. 基于总体最小二乘准则旋转不变子空间法的叶尖定时欠采样信号分析[J]. *机械工程学报*, 2019, 55(19): 103-111.
HE Changbo, LI Hongkun, ZHAO Xinwei, et al. Analysis method for under-sampled blade tip-timing signal based on the rotational invariance technique with total least squares principle[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2019, 55(19): 103-111. (in Chinese)
- [17] VERCOUTTER A, LARDIES J, BERTHILLIER M, et al. Improvement of compressor blade vibrations spectral analysis from tip timing data: aliasing reduction [C]//ASME Turbo Expo 2013: Turbine Technical Conference and Exposition, 2013: 1-8.
- [18] DONG J, LI H, FAN Z, et al. Characteristics analysis of blade tip timing signals in synchronous resonance and frequency recovery based on subspace pursuit algorithm[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2023, 183: 109632.
- [19] CAO J, YANG Z, TIAN S, et al. Biprobe blade tip timing method for frequency identification based on active aliasing time-delay estimation and dealiasing [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2023, 70(2): 1939-1948.