DOI: 10.3901/JME.2019.19.103

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*

贺长波¹ 李宏坤¹ 赵新维¹ 王维民² 吴淑明³

(1. 大连理工大学机械工程学院 大连 116024;

2. 北京化工大学高端机械装备健康监控与治愈化北京市重点实验室 北京 100029;

3. 西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室 西安 710049)

摘要: 考虑到传统的应变法无法同时测量所有叶片的振动且存在一定的安全隐患, 故利用叶尖定时技术对叶片振动进行监测。由于该方法得到的信号属于严重欠采样信号, 且实际获得的信号存在噪声干扰, 传统的傅里叶分析无法得到叶片的真实振动频率。研究基于总体最小二乘准则(TLS)的旋转不变子空间法(Esprit)对存在噪声干扰的欠采样信号进行频率估计, 并以估计结果作为先验知识对欠采样信号进行重构。通过仿真信号分析及高速旋转叶片试验台验证方法的有效性。结果表明, 所提方法可以有效地对含噪欠采样信号进行处理并估计出叶片的真实频率信息, 具有很好的工程应用价值。

关键词: 叶尖定时; 欠采样; TLS-Esprit; 信号重构; 叶片振动

中图分类号: TG156

Analysis Method for Under-sampled Blade Tip-timing Signal Based on the Rotational Invariance Technique with Total Least Squares Principle

HE Changbo¹ LI Hongkun¹ ZHAO Xinwei¹ WANG Weimin² WU Shuming³

(1. School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024;

2. Beijing Key Laboratory of Health Monitoring Control and Fault Self-recovery for High-end Machinery, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029;

3. State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049)

Abstract: Considering the traditional strain test method cannot measure all the blades vibration information at the same time and it may also bring some hidden danger for the normal operation of the rotating blade, blade tip-timing (BTT) technique is used to monitor the vibrating blades. However, as BTT method can just obtain under-sampled signal and the sampled signal will also be interfered by noise in practice, traditional Fourier transform is not enough for the extraction of blades original vibration frequency. Therefore, the rotational invariance technique (Esprit) with total least squares (TLS) principle is studied to estimate the original frequency information from the under-sampled signal with strong noise interference. The estimated frequency information will be further used as priori knowledge for the tip-timing signal reconstruction with interpolation function. Both simulation and experiment signal are used to verify the effectiveness of the proposed method, and the result shows the proposed method is useful for the frequency analysis of under-sampled BTT signal with noise interference demonstrating its great value in engineering application.

Key words: blade tip-timing; under-sampled; TLS-Esprit; signal reconstruction; blade vibration

0 前言

高速旋转叶片是压缩机, 涡轮机及航空发动

机等大型流体机械的核心部件。然而, 由于叶片长期工作在极端载荷的环境下, 很容易产生疲劳失效。若不能及时发现叶片的失效问题最终可能会带来极大的灾难^[1]。因此, 通过合适的状态监测技术识别叶片的振动信息对其长期健康稳定的运行具有重要的意义。作为传统的接触式测试方法,

* 国家自然科学基金资助项目(U1808214, 51575075)。20180720 收到初稿, 20190103 收到修改稿

应变法通过粘贴在叶片表面的应变片获取叶片的振动信息,并可以通过无线传输的方式将采集到的应变信号传递到监测系统^[2-4]。然而,在叶片数较多的情况下该方法无法对所有的叶片进行监测且粘贴在叶片表面的应变片在叶轮高速运转时会受到强离心力及气流冲击的作用,存在被破坏的风险,这带来了一定的安全隐患。同时,如何合理地布置安装应变片引线及无线传输节点也是需要解决的问题之一,故应变法并不适合实际的旋转叶片振动监测。

作为一种非接触式测振方法,叶尖定时技术可以同时测出所有叶片的振动信息,因而在近年来受到越来越多的关注和研究^[5-10]。该方法通过安装在机壳上的光纤传感器及转轴附近的键相传感器来获取叶片在非振动状态及振动状态下分别到达光纤传感器的相对时间,从而可以间接得到叶片的振幅信息。然而,该方法的采样频率通常为叶轮的转频,考虑到实际的叶片振动频率通常远大于转频,故得到的信号往往是欠采样信号。针对该问题,HEATH等^[11-12]研究基于扫频方式的单参数法及双参数法用来获取叶片的同步共振参数。陈仲生等^[13-15]研究基于 sinc 及余弦插值函数的欠采样信号重构方法用来获取叶片振动参数。考虑到该类重构方法需要通过有限元分析等方式预先获取叶片的振动频率作为先验知识,林军等^[16-17]进一步利用欠采样信号构造稀疏模型,并通过压缩感知的方法在没有先验知识的情况下求解叶片的原始振动频率,该方法对仿真信号及试验数据均取得了很好的辨识效果。但是该方法通常需要多个光纤传感器,如何在叶尖定时传感器数目较少的情况下还原叶片的真实振动频率仍需要进一步的研究,李孟麟等^[18]通过研究旋转不变子空间法(Esprit)用来对欠采样信号进行频率估计,并取得了良好的结果。然而该方法并未对强噪声干扰条件下如何有效地获取频率信息进行研究,由文献[19]可知在实际信号存在噪声干扰的情况下,基于总体最小二乘准则(Total least squares, TLS)的 Esprit 法仍能有效地对频率信息进行辨识。故本文通过对 TLS-Esprit 法进行研究用来估计叶尖定时欠采样信号的原始频率,通过仿真及试验验证了方法的有效性,并将频率辨识的结果作为先验知识,对欠采样信号进行重构。

1 叶尖定时测振原理

作为一种受到越来越多关注的非接触式测振方

法,叶尖定时技术通过安装在转轴附近的键相传感器用来获取转速脉冲信号作为零时刻参考点,并通过安装在机壳上的光纤传感器用以获得叶片在不振及振动状态下分别经过光纤传感器的相对时间,如图 1 所示。则根据得到的时间差及转频信息,可以由式(1)计算出第 i 个叶片的振幅。与应变法不同,叶尖定时技术可以通过非接触的方式同时测出所有叶片的振幅

$$S_i = 2\pi R * \frac{t_i^{real} - t_i^{ideal}}{t_{n+1}^{kp} - t_n^{kp}} \quad (1)$$

式中, S_i 表示第 i 个叶片的振幅, t_n^{kp} 表示叶轮第 n 转时获得的前一个键相脉冲信号, t_{n+1}^{kp} 则表示后一个键相信号,相应地由 $1/(t_{n+1}^{kp} - t_n^{kp})$ 可以得到叶轮的转频信息。 t_i^{ideal} 表示叶片不振时到达传感器的理想时间, t_i^{real} 则表示叶片振动时实际到达传感器的时间。

(a) 叶尖定时测振传感器分布

(b) 传感器获取的键相信号及叶片到达时间

图 1 叶尖定时测试原理图

2 叶尖定时欠采样信号分析

2.1 双传感器获取的信号阵列模型

由上述的叶尖定时测振原理可知,当只使用一个定时传感器时在叶轮旋转一周只能获取某一单叶片振动信号的一个采样点,此时采样频率即

为叶轮的转频。而叶片的振动频率通常远大于叶轮转频，故得到的往往是欠采样的叶片振动信号。因此，传统的傅里叶分析只能得到混叠频谱。为提取叶片的真实振动频率，研究基于 TLS 准则的 Esprit 法用以处理叶尖定时数据。该方法需要在机壳上安装两个传感器 $S1$ 和 $S2$ ，两传感器之间的角度差为 θ 。设叶片有 R 个振动源信号，在叶轮的高速运行中振动信号分别被 $S1$ 和 $S2$ 获取，采样率为叶轮的轴频 f_s ，则 $S2$ 与 $S1$ 的采样时间相差 $\tau = \theta/2\pi f_s$ 。为保证叶片的振动信息可以通过延时相位差被有效地提取， τ 应该小于信号的时域 Nyquist 采样间隔。设传感器 $S1$ 在第 m 个采样点得到的叶片振动信号为 $x(m)$ ， $S2$ 采集的振动信号为 $y(m)$ ，分别表示如下

$$x(m) = \sum_{i=1}^R s_i(m) + w_x(m) \quad (2)$$

$$y(m) = \sum_{i=1}^R s_i(m - \tau) + w_y(m) \quad (3)$$

式中， $s_i(m)$ 表示第 i 个振动源信号在第 m 个采样点

的信息。 $w_x(m)$ 和 $w_y(m)$ 为高斯白噪声，用来表示采样时的噪声干扰。为便于后面的分析，分别用复指数形式表示上述的 $x(m)$ 和 $y(m)$ ，如式(4)和式(5)所示

$$x(m) = \sum_{i=1}^R a_i \exp(j2\pi f_i(m/f_s)) + w_x(m) \quad (4)$$

$$y(m) = \sum_{i=1}^R a_i \exp(j2\pi f_i[(m/f_s) - \tau]) + w_y(m) = \sum_{i=1}^R a_i \exp(-j2\pi f_i \tau) \exp(j2\pi f_i(m/f_s)) + w_y(m) \quad (5)$$

式中， a_i 表示第 i 个复信号的幅值， f_i 表示信号的频率， m/f_s 表示对第 m 个数据点进行采样时的时间， $\exp(-j2\pi f_i \tau)$ 即表示 $S2$ 传感器采集到的第 i 个信号相对于 $S1$ 的相位差。

分别通过传感器 $S1$ 和 $S2$ 连续采集 K 个数据点，并将两传感器获取的叶片振动信号排成两列矢量 $X(m)$ 和 $Y(m)$ 。其中 $X(m)$ 表示如下

$$X(m) = [x(m), x(m+1), x(m+2), \dots, x(m+K-1)]^T \quad (6)$$

$$X(m) = \begin{bmatrix} a_1 \exp\left(j \frac{2\pi f_1 m}{f_s}\right) + a_2 \exp\left(j \frac{2\pi f_2 m}{f_s}\right) + \dots + a_R \exp\left(j \frac{2\pi f_R m}{f_s}\right) \\ a_1 \exp\left(j \frac{2\pi f_1 (m+1)}{f_s}\right) + a_2 \exp\left(j \frac{2\pi f_2 (m+1)}{f_s}\right) + \dots + a_R \exp\left(j \frac{2\pi f_R (m+1)}{f_s}\right) \\ \vdots \\ a_1 \exp\left(j \frac{2\pi f_1 (m+K-1)}{f_s}\right) + a_2 \exp\left(j \frac{2\pi f_2 (m+K-1)}{f_s}\right) + \dots + a_R \exp\left(j \frac{2\pi f_R (m+K-1)}{f_s}\right) \end{bmatrix} + W_x(m) \quad (7)$$

将式(7)中左侧的矩阵通过式(8)进行表示

$$\underbrace{\begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ \exp\left(j \frac{2\pi f_1}{f_s}\right) & \exp\left(j \frac{2\pi f_2}{f_s}\right) & \dots & \exp\left(j \frac{2\pi f_R}{f_s}\right) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \exp\left(j \frac{2\pi f_1 (K-1)}{f_s}\right) & \exp\left(j \frac{2\pi f_2 (K-1)}{f_s}\right) & \dots & \exp\left(j \frac{2\pi f_R (K-1)}{f_s}\right) \end{bmatrix}}_{A(f)} \underbrace{\begin{bmatrix} a_1 \exp\left(j \frac{2\pi f_1 m}{f_s}\right) \\ a_2 \exp\left(j \frac{2\pi f_2 m}{f_s}\right) \\ \vdots \\ a_R \exp\left(j \frac{2\pi f_R m}{f_s}\right) \end{bmatrix}}_{S(m)} \quad (8)$$

结合上述式(6)~(8)，则传感器 $S1$ 连续 K 次采样获得的矢量 $X(m)$ 可以表示为

$$X(m) = A(f)S(m) + W_x(m) \quad (9)$$

同理，可以将传感器 $S2$ 获得的信号矢量 $Y(m)$ 通过 $A(f)$ 和 $S(m)$ 进行表示如下

$$Y(m) = A(f)\Phi S(m) + W_y(m) \quad (10)$$

式中， Φ 如式(11)所示是一个对角矩阵，包含 $S1$ 和

$S2$ 传感器采集到的信号的相位差信息。

$$\Phi = \begin{bmatrix} \exp(-2\pi f_1 \tau) & & & \\ & \exp(-2\pi f_2 \tau) & & \\ & & \ddots & \\ & & & \exp(-2\pi f_R \tau) \end{bmatrix} \quad (11)$$

通过式(9)和式(10)可以将双传感器获取的叶片振动数据写成阵列信号的形式，且可以清楚地

发现, 叶片的振动频率包含在矩阵 Φ 中。由于多数情况下使用叶尖定时技术时采样频率即为叶轮的转频, 远小于叶片的振动频率, 获得的信号为欠采样信号。传统的傅里叶变换无法获取叶片的真实频率, 故本文通过研究阵列信号的常用处理方法之一, 总体最小二乘旋转不变子空间法(TLS-Esprit)对矩阵 Φ 进行估计从而达到识别叶片振动频率的目的。

2.2 Esprit 类算法的基本模型

将矢量 $X(m)$ 和 $Y(m)$ 合并成一个矢量 $Z(m)$, 则 $Z(m)$ 可以通过下面的式(12)表示

$$Z(m) = \begin{bmatrix} X(m) \\ Y(m) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A \\ A\Phi \end{bmatrix} S(m) + \begin{bmatrix} W_x(m) \\ W_y(m) \end{bmatrix} \quad (12)$$

Esprit 方法的原理是基于阵列的移不变特性而引起的信号子空间旋转不变性。这里信号子空间即由矩阵 $X(m)$ 和 $Y(m)$ 张成, 它们张成了维数相同的 R 维信号子空间。且 $Y(m)$ 张成的信号子空间相对于 $X(m)$ 张成的信号子空间旋转了一定的相位。

由于信号子空间及噪声子空间可以用阵列信号的协方差矩阵的特征分解来进行表征, 故首先求 $Z(m)$ 的自相关矩阵

$$R_{zz} = E[Z(m) Z^H(m)] = \bar{A} R_{ss} \bar{A}^H + \sigma^2 I \quad (13)$$

式中, R_{ss} 为信号的自相关矩阵, 设各信号互不相干, 则 R_{ss} 为 R 维满秩阵。 σ^2 为噪声方差。对 R_{zz} 进行特征值分解为

$$R_{zz} = \sum_{i=1}^{2K} \lambda_i e_i e_i^H = E_s A_s E_s^H + \sigma^2 E_N E_N^H \quad (14)$$

式中, E_s 为前 R 个大特征值对应的特征矢量张成的信号子空间 $E_s = [e_1, \dots, e_R]$, 相应地 $2K - R$ 个较小的特征值对应的特征矢量 $E_N = [e_{R+1}, \dots, e_{2K}]$ 张成与信号子空间正交的噪声子空间。这时, 会存在唯一的、非奇异的 $R \times R$ 维满秩矩阵 T 使得下式成立

$$E_s = \bar{A} T \quad (15)$$

根据阵列的移不变特性可以将 E_s 分解为两部分, 即 $E_X \in \mathbb{C}^{K \times R}$ 和 $E_Y \in \mathbb{C}^{K \times R}$, 可以得到如下关系

$$E_s = \begin{bmatrix} E_X \\ E_Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A T \\ A \Phi T \end{bmatrix} \quad (16)$$

对上式进行分析可以得到

$$E_Y = A \Phi T = (E_X T^{-1}) \Phi T = E_X (T^{-1} \Phi T) = E_X \Psi \quad (17)$$

由式(17)可知, E_X 和 E_Y 张成了相似的子空间, 且矩阵 Φ 的对角元为 Ψ 的特征值。因此, 当求取矩

阵 Ψ 时也可以相应地对 Φ 进行估计。但是在实际处理中, 无法得到精确的 R_{zz} , 只能通过采样信号的相关函数 $\hat{R}_{zz}$ 作为 R_{zz} 的估计值

$$\hat{R}_{zz} = \frac{1}{N} \sum_{m=1}^N Z(m) Z^H(m) \quad (18)$$

由于 $\hat{R}_{zz}$ 与 R_{zz} 会存在一定的偏差, 故实际得到的 $\hat{E}_X$ 和 $\hat{E}_Y$ (E_X 和 E_Y 的估计值)不能正好满足式(17)的关系。因此本文利用总体最小二乘准则(TLS)来求解矩阵 Ψ , 从而实现从欠采样信号中估计出真实的叶片振动频率。

2.3 基于 TLS-Esprit 算法的频率估计方法

基于最小二乘(LS)准则的方法是上述问题的一种解决方案如文献[18]所述, 但根据文献[19], 在 $\hat{E}_X$ 和 $\hat{E}_Y$ 都存在估计误差的情况下, 基于 TLS 准则的求解方案可以得到精度较高的结果。考虑到在实际采样信号存在噪声的情况下, 显然得到的 $\hat{E}_X$ 和 $\hat{E}_Y$ 会存在一定的估计误差, 因此这里采用基于 TLS 准则的求解方案对矩阵 Ψ 进行估计。设实际得到的 E_X 和 E_Y 存在的误差分别为 ΔE_X 和 ΔE_Y , 则总体最小二乘的思想是得到如下方程的解

$$(E_X + \Delta E_X) \Psi = E_Y + \Delta E_Y \quad (19)$$

对上式进行处理, 可以改写成如下的形式

$$([-\Delta E_Y \ \Delta E_X] + [-E_Y \ E_X]) \begin{bmatrix} 1 \\ \Psi \end{bmatrix} = (\Delta E + E) z = 0 \quad (20)$$

所以 TLS 的解等价于

$$\min \|\Delta E\|$$

$$\text{s.t. } (\Delta E + E) z = 0 \quad (21)$$

由文献[20]可知, 求解式(21)的过程等价于寻找一个酉矩阵 F 使得 F 与 E_{XY} 正交, $E_{XY} = [E_X \ E_Y]$ 。也就是 F 张成的空间与 E_X 或 E_Y 列矢量张成的空间正交, 所以可以通过对 $E_{XY}^H E_{XY}$ 进行特征分解从而得到 F , 即

$$E_{XY}^H E_{XY} = E A E^H \quad (22)$$

式中, A 是由特征值构成的对角阵, E 为对应的特征矢量。将 E 分为 4 个 $R \times R$ 子矩阵如下

$$E = \begin{bmatrix} E_{11} & E_{12} \\ E_{21} & E_{22} \end{bmatrix} \quad (23)$$

式中, $\begin{bmatrix} E_{12} \\ E_{22} \end{bmatrix}$ 是与特征值 0 相对应的特征矢量, 令

$F = \begin{bmatrix} E_{12} \\ E_{22} \end{bmatrix}$ 则可满足上面的要求, 可得

$$\begin{bmatrix} E_x & E_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \end{bmatrix} = E_x F_1 + E_y F_2 = 0 \quad (24)$$

由上式可以推得

$$ATF_1 + A\Phi TF_2 = 0 \Rightarrow -F_1 F_2^{-1} = T^{-1} \Phi T \quad (25)$$

故可令式(17)中的 $\Psi = -F_1 F_2^{-1}$ ，则可以对得到的 Ψ 进行特征值分解，其特征值 $(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_R)$ 即为对矩阵 Φ 中对角元素的估计。故可以进一步通过 $-\angle \lambda_i / 2\pi\tau$ 实现对第 i 个频率成分 f_i 的估计。

3 仿真信号分析

为了验证本文方法的有效性，首先构造仿真信号进行分析。由文献[7, 21]可知，叶片的振动通常可以认为是简谐振动，故这里构造含有频率成分 124 Hz 及 160 Hz 的叶片振动信号 $s(t)$ 如下所示

$$s(t) = 4 \sin(2\pi * 124t) + 6 \sin(2\pi * 160t) \quad (26)$$

设在叶轮转速为 3 000 r/min 的工况下对叶片振动信号进行采集，则相应的采样频率为 50 Hz。此时采样得到的信号为严重欠采样信号，相应的时域波形及频谱如图 2 所示。

图 2 欠采样信号的时域波形及频谱

在图 2 中，信号的原始频率 124 Hz 及 160 Hz 通过传统的傅里叶变换已经无法识别，只能得到真实频率与采样率之间的差频信息 24 Hz 及 10 Hz。为了估计出真实频率，使用 TLS-Esprit 方法处理欠采样信号从而实现对真实频率的还原。

首先，设定延迟采样时间 τ 的大小：由上述分析可知，延时 τ 需要小于满足 Nyquist 采样定理的采样间隔。考虑到这里构造的仿真信号的频率最大值为 160 Hz，故 Nyquist 采样频率为 320 Hz，则 $\tau < 1/320$ 即可满足要求，故这里设置延时 τ 为 0.003 s。

接着，设置连续采样的点数 K ，这里设为 200。由于实际的 R_{zz} 需要通过式(18)估计获得，故还需要设置式(18)中的参数 N ，这里设为 500。

在设置好必要的参数后，按照 TLS-Esprit 方法的原理对矩阵进行处理最终实现对 Φ 中对角元素的估计，从而可以估计出信号的原始频率 124 Hz 和 160 Hz。

为了更加清晰地展示 TLS-Esprit 法的估计结果，可以结合基于 sinc 函数的插值重构技术(式(27) [13-14])对欠采样信号进行时域重构，并得到相应的频谱。需要指出，在通过 sinc 插值技术对欠采样信号进行重构时，需要知道一定的先验知识：即原始信号中心频率的估计值。而这估计值正可以由 TLS-Esprit 方法的频率辨识结果得到，故这里结合该方法的估计结果作为先验知识及基于 sinc 函数的插值重构技术可以很容易地得到原始信号的时域振动波形及对应的频谱，如图 3 所示。

$$S_c(t) = \text{Re} \left[\sum_{k=-\infty}^{+\infty} \tilde{s}\left(\frac{k}{f_s}\right) \text{sinc}(f_s t - k) \exp(2\pi f_0(t - k/f_s)) \right] \quad (27)$$

式中， $\tilde{s}(t)$ 是 $s(t)$ 的解析形式，Re 表示取信号实部， k 表示在进行 BTT 采样时的第 k 个采样点， k/f_s 则表示第 k 个点的采样时间。

图 3 基于先验知识的重构信号时域波形及频谱

在上述的分析中，构造的仿真信号没有添加噪声，此时通过 TLS-Esprit 法可以精确地估计出 124 Hz 和 160 Hz，不存在估计误差。而在实际的叶尖定时测试中，获得的信号不可避免地会存在噪声干扰，常常甚至是强噪声干扰。而如前文所述，TLS-Esprit 在实际采样数据存在噪声干扰时仍能很好地估计出信号的真实频率信息。故为了进一步验证方法的有效性，分别对式(26)中的仿真信号 $s(t)$ 添加 5 dB、-1 dB 及 -5 dB 的高斯白噪声并利用该方法

进行分析,分别进行 500 次独立仿真试验,得到的估计结果如图 4 所示。

图 4 不同信噪比下基于 TLS-Esprit 法的频率估计结果

从图中可以看出 TLS-Esprit 法在 5 dB 的弱噪声干扰下可以很精确地识别出原始信号的振动频率,即使在 -5 dB 的强噪声干扰下,仍可以很好地辨识

出原始频率,不会出现误估计。故通过仿真分析可以说明本文方法的有效性尤其是强噪声干扰情况下其辨识结果的可靠性。

4 试验验证

为进一步验证本文提出的 TLS-Esprit 频率估计方法对实际测试数据的有效性,在高速直叶片振动试验台上进行相关试验,其中试验台如图 5 所示。该试验台由底座,电动机,叶轮,护罩,永磁体激励等部件组成,试验叶轮由 32 个叶片组成,叶轮直径为 138 mm,叶尖厚度为 3 mm 且本次试验中采用 6 个永磁体激励。

图 5 高速直叶片试验台^[23]

根据 TLS-Esprit 法的要求,需要通过 2 个叶尖定时传感器分别获取叶片的振动信息,从而利用相位差的信息对叶片的原始振动频率进行估计。故在进行试验测试时,使用 3 通道激光源(1 通道用于键相,2 通道用于叶尖定时),测试系统的光功率可以在 0~1 W 之间连续调节用来获得强度合适的光信号。采用基于 FPGA 的高速数据采集系统 Compact RIO,从而实现 20 MS/s 的数字采样。实际测试时两传感器的布局如图 6 所示,图中两叶尖定时传感

图 6 实际测试传感器分布

器设置为相邻 5° ，从而保证两传感器在对叶片的振动信号进行采样时延时 τ 小于 Nyquist 采样间隔。

由之前对该试验台的分析结果可知，叶片在 63 Hz 转频激励下会被激起谐振，谐振频率约为 2270 Hz^[22-23]。故在试验时调整叶轮转速为 $63 \times 60 = 3780$ (r/min)，从而激起叶片的谐振用以获取叶片的振动数据。在该转速下通过两通道叶尖定时传感器连续采集叶片的振动数据，并利用傅里叶变换对采集的振动数据进行频谱分析，相应的叶片同步振动时域波形及频谱如图 7 所示。

图 7 欠采样叶片振动波形及频谱

从上图中可以看出，由于采样频率较低，实际得到的叶片振动信号为严重欠采样信号。根据之前的研究成果，该试验台在 63 Hz 的转频激励下叶片会产生 36 倍的同步共振^[22-23]，故对获得的试验信号进行谱分析其频率在 0 Hz 附近也与之前的研究结论一致。上图也说明直接进行傅里叶分析无法获得关于叶片振动频率的有效信息，尤其是同步共振，无法获得真实的频率值只能得到 0 Hz 的频谱。

此外，从图 7 中的时域振动波形还可以发现实际获得的欠采样信号存在噪声干扰。因此，为了对叶片的原始振动频率进行有效的估计，使用本文提出的 TLS-Esprit 法进行分析处理。其中参数 τ 由两传感器夹角 (5°) 及叶轮转频计算获得，这里需要说明，由于实际在对传感器进行安装时会存在偏差，故实际传感器的夹角可能并非 5° 。但在计算 τ 时若仍根据 5° 夹角，则会影响 τ 的实际大小从而给估计结果带来误差。故在对实际数据进行处理时，需要对角度值进行微小修正，从而获得较为准确的估计结果。由于自相关矩阵 R_{zz} 需要通过式 (18) 估计获得，故为了保证 R_{zz} 的估计精度，这里令 N 为 1720，另外连续采集点数 K 设为 200。则根据 TLS-Esprit 法的原理进行计算，可以估计出信号的频率值为 2268 Hz，与之前的研究结果一致^[22-23]。试验结果表

明即使在噪声干扰条件下，该方法仍有效地获取叶片的真实振动频率，具有很高的可靠性及应用价值。

为进一步展示叶片的实际振动频率，以 TLS-Esprit 法估计得到的 2268 Hz 作为先验知识，使用基于 sinc 函数的插值重构技术对试验获得的欠信号进行时域重构，并对重构后的信号进行傅里叶分析，得到的结果如图 8 所示。

图 8 重构信号时域及频域

5 结论

(1) 有效的叶片振动监测技术一直以来都是研究的热点与难点，受试验条件的限制(如有限的信号采集通道)传统的应变法无法同时测量所有叶片的振动信息，且存在一定的安全隐患。针对该问题，研究基于叶尖定时技术的非接触式测振方法用来获取叶片的振动参数。

(2) 针对叶尖定时信号欠采样的问题，在传统的 Esprit 法频谱辨识的基础上，研究了基于 TLS 准则的 Esprit 法用来对欠采样信号存在噪声干扰时叶片的真实振动频率进行估计，并通过仿真信号分析及试验验证了本文方法的有效性。考虑到实际采集的信号多存在噪声干扰，故本文的方法也能为叶尖定时欠采样信号的分析提供一个新的思路。

(3) 此外，以 TLS-Esprit 法的估计结果作为先验知识，结合插值技术还可以对叶尖定时获得的欠采样信号进行重构得到叶片的振动波形。

参 考 文 献

- [1] FLEETING R, COATS R. Blade failures in the HP turbines of RMS Queen Elizabeth and their rectification[J]. Institute of Marine Engineers Transactions, 1970, 82: 49-74.

- [2] GHOSH A , SUNDARESAN M , SCHULZ M , et al. Structural health monitoring techniques for wind turbine blades[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* , 2000 , 85 : 309-324.
- [3] ROY N , GANGULI R. Helicopter rotor blade frequency evolution with damage growth and signal processing[J]. *Journal of Sound and Vibration* , 2005 , 283 : 821-851.
- [4] KNAPPETT D , GARCIA J. Blade tip timing and strain gauge correlation on compressor blades[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers ,Part G :Journal of Aerospace Engineering* , 2008 , 222(4) : 497-506.
- [5] BATTIATO G , FIRRONE C M , BERRUTI T M. Forced response of rotating bladed disks : Blade tip-timing measurements[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing* , 2017 , 85 : 912-926.
- [6] GURU S S , SHYLAJA S , KUMAR S , et al. Pre-emptive rotor blade damage identification by blade tip timing method[J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power* , 2014 , 136 , 072503-1 : 4.
- [7] BENDALI S , JOSEPH L , MARC B , et al. Modal parameter identification of mistuned laded disks using tip timing data[J]. *Journal of Sound and Vibration* , 2008 , 314 : 885-906.
- [8] 王维民,任三群,陈立芳,等. 基于键相插值法的叶片振动测量研究[J]. *振动、测试与诊断* , 2017 , 37(2) : 361-365.
- WANG Weimin , REN Sanqun , CHEN Lifang , et al. The blade vibration measurement research based on the key phase interpolation method[J]. *Journal of Vibration & Diagnosis* , 2017 , 37(2) : 361-365.
- [9] 欧阳涛,段发阶,李孟麟,等. 旋转叶片异步振动全相位 FFT 辨识方法[J]. *振动工程学报* , 2011 , 24(3) : 268-273.
- OUYANG Tao , DUAN Fajie , LI Menglin , et al. A method for identifying rotating blade asynchronous vibration by all-phase fft[J]. *Journal of Vibration Engineering* , 2011 , 24(3) : 268-273.
- [10] 欧阳涛,郭文力,段发阶,等. 基于叶尖定时的旋转叶片同步振动辨识新方法[J]. *振动与冲击* , 2011 , 30(8) : 249-257.
- OUYANG Tao , GUO Wenli , DUAN Fajie , et al. New method for identifying rotating blades synchronous vibration based on tip-timing[J]. *Journal of Vibration and Shock* , 2011 , 30(8) : 249-257.
- [11] HEATH S , IMREGUN M. An improved single-parameter tip-timing method for turbomachinery blade vibration measurements using optical laser probes[J]. *International Journal of Mechanical Sciences* , 1996 , 38(10) : 1047-1058.
- [12] HEATH S , IMREGUN M. A survey of blade tip-timing measurement techniques for turbomachinery vibration[J]. *Journal of Engineering for Gas Turbine and Power* , 1998 , 120 : 784-791.
- [13] CHEN Z S , YANG Y M , XIE Y , et al. Non-contact crack detection of high-speed blades based on principal component analysis and euclidian angles using optical-fiber sensors[J]. *Sensors and Actuators A : Physical* , 2013 , 201 : 66-72.
- [14] CHEN Z S , YANG Y M , GUO B , et al. Blade damage prognosis based on kernel principal component analysis and grey model using subsampled tip-timing signals[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers-Part C : Journal of Mechanical Engineering Science* , 2014 , 228(17) : 3178-3185.
- [15] HU Z , LIN J , CHEN Z S , et al. A non-uniformly under-sampled blade tip-timing signal reconstruction method for blade vibration monitoring[J]. *Sensors* , 2015 , 15 : 2419-2437.
- [16] LIN J , HU Z , CHEN Z S , et al. Sparse reconstruction of blade tip-timing signals for multi-mode blade vibration monitoring[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing* , 2016 , 81 : 250-258.
- [17] PAN M H , YANG Y M , GUAN F J , et al. Sparse representation based frequency detection and uncertainty reduction in blade tip timing measurement for multi-mode blade vibration monitoring[J]. *Sensors* , 2017 , 17(8) : 1745.
- [18] 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) : 18-22.
- 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) : 18-22.
- [19] OTTERSTEN B , VIBERG M , KAILATH T. Performance analysis of the total least squares esprit algorithm[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing* , 1991 , 39(5) : 1122-1135.
- [20] 王永良,陈辉,彭应宁,等. 空间谱估计理论与算法[M]. 北京:清华大学出版社,2004.
- WANG Yongliang , CHEN Hui , PENG Yingning , et al. The theory and algorithm of spatial spectrum estimation[M]. Beijing : Tsinghua University Press , 2004.
- [21] GUO H T , DUAN F J , ZHANG J L. Blade resonance parameter identification based on tip-timing method without the once-per revolution sensor[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing* , 2016 , 66-67 : 625-639.
- [22] 王维民,任三群,陈立芳,等. 涡轮机叶片同步振动参数辨识方法研究(建模仿真)[J]. *振动与冲击* , 2017 ,

36(17) : 120-126.

WANG Weimin , REN Sanqun , CHEN Lifang , et al.
Synchronous vibration parametric identification method
for blades of a turbine[J]. Journal of Vibration and Shock ,
2017 , 36(17) : 120-126.

- [23] 王维民,任三群,陈立芳,等. 涡轮机叶片同步振动参数
辨识方法研究(实验研究)[J]. 振动与冲击, 2017 ,
36(17) : 127-133.

WANG Weimin , REN Sanqun , CHEN Lifang , et al.

Investigation on the method of blade synchronous
vibration parameter identification (experimental)[J].
Journal of Vibration and Shock , 2017 , 36(17) : 127-133.

作者简介:贺长波,男,1991 年出生,博士研究生。主要研究方向为大
型离心压缩机状态监测及故障诊断。

E-mail : 1019894427@qq.com

李宏坤(通信作者),男,1974 年出生,博士,教授,博士研究生导师。
主要研究方向为故障诊断,信号处理。

E-mail : lihk@dlut.edu.cn