

FFT 相位误差的修正及转子轨迹图

北京航空航天大学
航空发动机研究所

王德友* * 李其汉 晏砺堂
杨士杰

【摘要】 提出了一种 FFT 相位误差修正的方法, 利用经相位修正的 FFT 数据重构时间序列来描绘双转子振动响应的轨迹图。这种数据分离综合的实现, 较清晰地描述转子系统的振动特性, 而为研究双转子发动机转静件碰摩和裂纹等故障现象描述提供了较好的工具。

主题词: 转子 振动 相位 误差 修正

分类号: V231.92

1 FFT 的相位误差及修正方法

轨迹图在旋转机械振动监测及故障诊断中是十分有效的工具, 特别是通过对振动故障反应敏感的相位信息进行故障描述和研究。但在航空发动机台架试车的振动监测中却很少使用, 其原因一是发动机振动响应信号十分复杂, 信号的污染亦较严重; 二是对双转子发动机而言, 其信号主要成分为两个转子的转速频率, 其结果所给出的轨迹图是非常杂乱的图形, 人们无法从中得到任何有用的信息。一种办法是将振动信号进行预处理, 如加带通滤波和跟踪滤波, 但这样一次也只能显示一帧信息, 即单转子的转子轨迹, 而无法将双转子轨迹进行综合显示。同时带宽内仍可能存在干扰, 轨迹图依然较杂乱的。FFT 分析技术是一种频率分解技术, 它将一个复杂信号分解为多个谐波的迭加, 能否将分解的谐波进行信号重构呢? FFT 技术由于做加窗处理带来能量泄漏问题, 使得当采样频率不为信号的整数倍或是窗函数不在被分析信号的零相位点时, 就会产生幅度、频率和相位误差^[1,2], 信号的绝对相位的误差是相当大的量。在采用 FFT 技术的信号分析设备中, 如 HP 公司的 5431、亚特兰大公司的 SD385, 丹麦 B&K 公司的 2033 和日本小野的 CF900 系列中其频率误差均由其频率分辨率确定。幅度误差与所加窗的类型和信号截取的位置有关。当采用矩形窗时误差 < 34%, 汉宁窗 < 10% 左右。而信号的绝对相位误差是相当大的量, 通常在 FFT 中是毫无意义的量, 但它且有一定的规律可循, 这使得对相位误差进行修正提供了可能性。在文献[3]中 Tompsonhe J K, Tree D R 等人利用相位误差与频率误差的线性关系提出对频率和幅度的修正方法。本文提出对复杂信号相位的修正方法, 并通过实现经修正的 FFT 的数据重构时域谐波信号, 来完成双转子轨迹图的分离综合。

1.1 相位误差的产生

先用矩形窗函数对频率为 f_0 、幅度为 A 、初相位为 φ 的正弦信号加窗后进行富氏变换为:

$$F\{x(t)W(t-T/2)\} = (A/2)W(f+f_o)\exp[j\pi T(f-f_o)+\varphi] + (A/2)W(f-f_o)\exp[j\pi T(f-f_o)+\varphi] \quad (1)$$

其中 T 为窗函数的宽度。(1)式表明,当窗函数乘以谐波信号做富氏变换后,其信号的能量并不发生变化,仅仅是实部与虚部转换,各部量值却由相位确定。考虑(1)式中的相位函数:

$$\Phi(f) = \pi T(f-f_o) + \varphi \quad (2)$$

当 T 的倒数(即采样频率)与信号的频率 f_o 为非整数倍时,则由泄漏产生相位误差为:

$$\Delta\Phi = \pi T(f-f_o) \quad (3)$$

(3)式表明,相位误差与频率误差为线性关系。设矩型窗的宽度为 1,即采样频率等于窗函数宽度的倒数时 $T=1$,则频率误差为 0.1 Hz 时,其相位误差为 18° 。所以在许多信号分析设备中 FFT 变换的相位误差是相当大的。即使采用细化处理,也仅仅是增加幅度谱线的分辨率,而当细化因子与 Δf 不为整数倍时,其相位误差仍然是存在的。

1.2 相位、频率和幅度误差的修正

如上所述,泄漏对相位的影响是确定的,它可用较精确的数学表达式来描述,这就有可能找到一种方法对相位进行修正而获取较逼近的估计值。对(3)式做如下改写:

$$\varphi = \Phi + \pi T \Delta f \quad (4)$$

由(4)式可知只要能较精确的计算出 Δf ,就可较精确的估计出相位误差值。所以问题的关键是要计算出频率误差。其计算方法如下:考虑函数 $f(t) = \{f_i(t)\}$, $f_i(t) = A_i \cos(2\pi f_i t + \varphi_i)$ ($i=1, 2, \dots, n$) 其中 A_i 为信号分量幅度, f_i 为频率, φ_i 为相位。对 $f(t)$ 做 FFT 得幅度分量的估计值: $\{A\} = \{A_1 \ A_2 \ \dots \ A_n\}$, 频率分量估计值 $\{f\} = \{f_1 \ f_2 \ \dots \ f_n\}$, 相位分量估计值 $\{\varphi\} = \{\varphi_1 \ \varphi_2 \ \dots \ \varphi_n\}$, 对于到任选,可由下式求得频率误差:

$$\Delta f = f - f_i = \pm (1/T) / [A_i / A_{i+1} + 1] \quad (5)$$

由此可得相位修正 $\varphi = \varphi_i + \Delta\varphi$, 频率修正 $f_i = f_i + \Delta f$, 幅度修正对于 $i=1$ 到 $i=n$, 任选 A_{i-1} , A_i , A_{i+1} , 求得其中的最大值与最小值 $A_{\max}$, $A_{\min}$, 相对应的频率为 $f_{\max}$, $f_{\min}$, 当 $f_{\max} > f_{\min}$ 时, $f_o = f_{\max} - \Delta f$, 否则 $f_o = f_{\max} + \Delta f$ 则当 $\Delta f = 0$, 幅度为 A_i , 否则:

$$A_i = \pi A_i (f_{\max} - f_o) / \sin[\pi(f_{\max} - f_o)] \quad (6)$$

当窗函数不同时,其频率误差 Δf 的表达式是不同的。

2 修正方法的应用举例

2.1 一般函数的修正

考虑函数

$$f(t) = A_1 \cos(2\pi f_1 t - \pi/3) + A_2 \cos(2\pi f_2 t - \pi/3)$$

其中 $A_1 = A_2 = 1.0$ V, $f_1 = 100$ Hz, $f_2 = 200$ Hz, 当 f_1 从 100.1 Hz 变到 100.9 Hz, f_2 从 200.1 Hz 变到 200.9 Hz 时(f_1 和 f_2 同时变化), 对 $f(t)$ 进行 FFT 后应用上述公式求得振幅、频率、相位等修正和不经修正的计算值。结果证明: 频率和幅度修正的误差 $< 0.1\%$, 相位误差 $< 1^\circ$ 。

2.2 转子轨迹的分离与综合

在双转子发动机中,其振动响应主要是与高低压转子转速有关的信号组成,但由于发动机故障状态的产生及各种电磁干扰的存在,使得利用原始信号做出的归迹图非常杂乱。图 1 给出了某型机台架试车中测得的 4 截面转子轨迹图。本文试图用经 FFT 分析的数据作相位修正和信号重构的方法实现转子轨迹的描述,其方法如下:

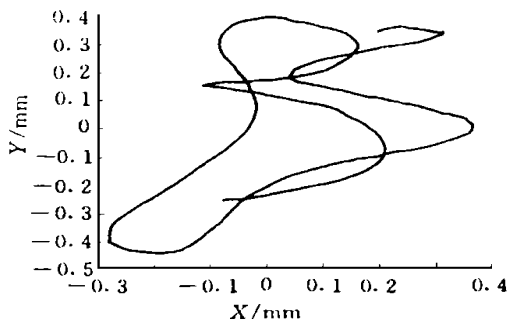


图 1 原始振动信号转子轨迹图

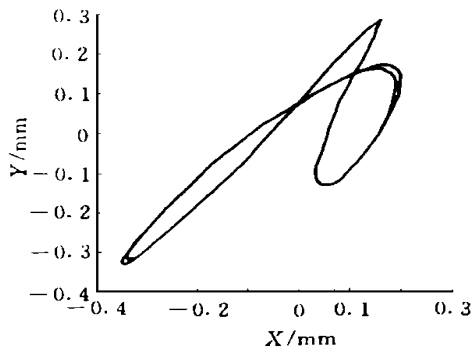


图 2 振动信号分离综合后转子轨迹图

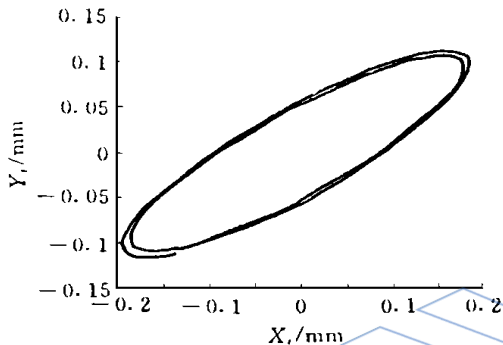


图 3 振动信号分离的低压转子轨迹图

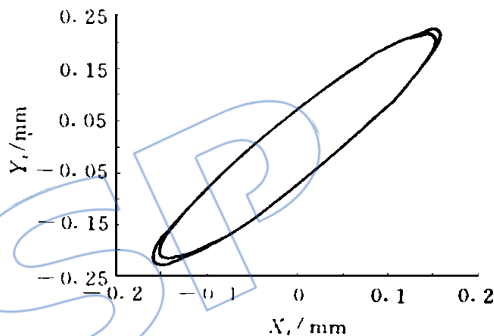


图 4 振动信号分离出的高压转子轨迹图

考虑从发动机台架试车任一稳态转速下,对某一截面的振动响应时域信号(垂直和水平)截取 n 个数据点,依次取 M 个数据作 FFT 分析并进行幅度、频率和相位的修正,其中 $M < 100n$ (考虑轨迹图每一圈至少 100 个数据点)。利用经修正后的频谱数据求得其时域值:

$$X_j(t_i) = A_j \cos(2\pi f_j t_i + \varphi) \quad , \quad Y_j(t_i) = A_j \cos(2\pi f_j t_i + \varphi + \pi/2)$$

$$X(t) = \sum X_j(t_i) \quad , \quad Y(t) = \sum Y_i(t_i)$$

其中 $j, i = 0, 1, 2, \dots$, X_j, Y_j, A_j 和 φ 分别表示 t_i 时刻频率为 f_j 量的水平方向位移、垂直方向位移、幅度和相位角。其为分离综合后轨迹图和分离后低压和高压转子轨迹图,见图 2- 4。

本文提出的相位修正方法对许多情况下的频谱分析是有效的,它可利用经 FFT 后的信号进行分离重构成时域信号,应用于描述双转子运动轨迹,为故障种类分离和故障模式的建立提供了一种有价值的手段。

参 考 文 献

- 1 Gaillard P. L 'Analyse et Traitement des Signaux. Universite de Technologué de Compiègne, 1987
- 2 高品贤. 振动、冲击及噪声测试技术. 西安: 西安交通大学出版社, 1992
- 3 Tompson J K, Tree D R. Leakage Error in Fast Analysis. Journal of Sound and Vibration, 1980, 71: 331- 544