

基于改进广义解调的直升机传动系统速度追踪

汤 勇¹, 吴太欢², 唐振寰¹, 米 栋¹, 张万阳², 罗华耿²

(1. 中国航发湖南动力机械研究所 株洲, 412002) (2. 厦门大学航空航天学院 厦门, 361000)

摘要 为了从复杂的非平稳振动信号中追踪直升机的传动系统轴转速信息, 开发了一种改进的广义解调变换方法。首先, 利用广义解调变换对目标信号进行移频, 移频后目标分量将由非平稳转换为近似平稳; 其次, 基于频谱细化的短时傅里叶变换 (short time Fourier transform, 简称 STFT) 方法计算得到解调信号时频图; 然后, 估计信号的瞬时频率, 利用迭代计算提升频率估计精度; 最后, 基于估计的转速信息开展同步分析, 提高传动系统齿轮故障振动的信噪比。仿真分析和实测分析结果表明: 所提出方法估计的轴速度信息具有较高的精度, 满足基于速度信息开展同步分析的需求; 利用估计的速度开展同步分析可有效提高信噪比, 增强阶次谱上的故障特征, 便于准确提取齿轮故障特征。

关键词 广义解调变换; 瞬时频率估计; 直升机传动系统; 同步分析; 故障诊断

中图分类号 TH113.1; V263.6

引 言

直升机传动系统是直升机上的重要子系统之一^[1-2]。开展直升机传动系统齿轮、轴承部件的故障监测与诊断对于提升直升机的安全具有重要意义。振动分析被广泛应用于直升机传动系统状态监测和故障诊断。由于振动传感器无法直接安装在被测部件上, 只能在附近的机匣上安装少数的振动传感器^[3]。复杂的传递路径导致振动信号在传递过程中衰减, 同时旋转部件振动信号相互耦合, 增加了传动系统故障特征提取的难度。因此, 利用有效的降噪技术提高振动信号的信噪比对于振动监测和故障诊断至关重要。

时间同步平均 (time synchronous averaging, 简称 TSA) 技术是一种有效的降噪技术, 在旋转机械系统振动信号处理中被广泛应用^[4-5]。开展 TSA 技术应用的关键在于获得准确的参考轴速度^[6-7]。从振动信号中提取轴转速信息是可行的方案之一^[8], 基于振动信号提取轴速度信息的研究^[8-9]大致分为 2 类: ①单分量信号相位解调; ②时频脊线提取。

单分量信号相位解调的瞬时频率估计方法从混合信号中分离出速度同步基频分量或其高阶谐波分量, 利用相位解调方法^[10]估计信号的瞬时频率。Boudraa 等^[11]利用经验模态分解 (empirical mode de-

composition, 简称 EMD) 从混合信号中分离出单分量信号, 利用非线性 Teager-Kaiser 算子 (Teager-Kaiser energy, 简称 TKE) 得到信号的瞬时频率。Bonnardot 等^[12]用窄带滤波器将混合信号中的目标单分量分离出来, 利用 Hilbert 变换得到信号的瞬时相位, 求导得到信号的瞬时频率。针对瞬时频率大幅波动的振动信号, 当前缺乏有效的信号分解算法。上述问题限制了相位解调方法的应用。

时频脊线提取运用加移动时间窗的基变换方法, 将一维时域信号映射到二维时频域内, 追踪目标分量脊线在时频空间内的分布规律来估计其瞬时频率。Urbanek 等^[13]提出了两步法的 STFT 时频追踪来提取瞬时频率信息。时频脊线提取精度严重依赖时频表征算法的计算精度, 在处理非稳态振动信号时 STFT 的精度较低, 导致 STFT 时频表征提取精度较低。

笔者提出了一种运用细化频谱分析的改进的广义解调变换 (improved generalized demodulation transform, 简称 IGDT) 方法, 基本原理是利用广义解调方法对目标信号进行移频解调, 解调后目标分量的频率由非平稳瞬时频率转换为近似平稳瞬时频率。改进的频谱细化 STFT 方法提取解调信号的瞬时频率具有更高的精度; 引入迭代计算, 可大幅提高时频脊线瞬时频率估计精度。

1 改进的广义解调变换

1.1 广义解调变换

广义解调方法源于傅里叶变换的调制或频移特性。假设信号 $x(t) = A(t) \exp(j\theta(t))$ 受解调函数 $\exp[-j2\pi v(t)]$ 频率调制,其中, $v(t)$ 为一个实函数,为时变相位,则该调频信号的傅里叶变换可表示为 $X[f + \dot{v}(t)] =$

$$\int_{-\infty}^{\infty} x(t) \exp[-j2\pi v(t)] \exp[-j2\pi ft] dt \quad (1)$$

将 $\exp\{-j2\pi[v(t) + ft]\}$ 视为基函数,广义傅里叶变换可表示为

$$X_G[f] = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \exp\{-j2\pi[v(t) + ft]\} dt \quad (2)$$

相应的广义傅里叶逆变换可表示为

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} X_G(f) \exp\{j2\pi[v(t) + ft]\} df \quad (3)$$

如果信号 $x(t) = \exp\{j2\pi[v(t) + f_0 t]\}$,则信号的瞬时频率 $\dot{\theta}(t) = f_0 + \dot{v}(t)$,其中: $\dot{\theta}(t)$, $\dot{v}(t)$ 分别为相位 $\theta(t)$, $v(t)$ 对时间 t 的导数。运用解调函数 $\exp[-j2\pi v(t)]$ 解调信号 $x(t)$,信号频谱被旋转、平移到 $f = f_0$,得到 $X_G(f) = \delta(f - f_0)$,其中,搬移距离为 $\text{mean}(\dot{v}(t))$ 。广义解调傅里叶变换原理如图1所示。

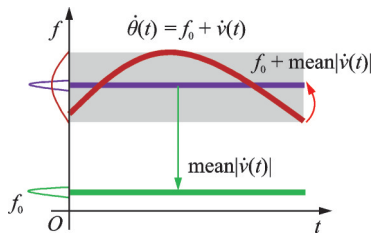


图1 广义解调傅里叶变换原理

Fig.1 The principle of generalized demodulation Fourier transform

若相位函数 $v(t)$ 与目标信号相位 $\theta(t)$ 完全匹配,则广义解调可以完全消除目标信号的频谱弥散。然而,广义解调中的调制信号 $\exp[-j2\pi v(t)]$ 瞬时相位函数 $v(t)$ 通常利用 STFT 估计得到,而常规 STFT 处理非平稳宽带信号的精度较低,且易受背景噪声干扰。因此,笔者利用细化 STFT 谱来提高时频谱的频率分辨率,并运用迭代算法提升频率估计精度。

1.2 细化的离散时间傅里叶变换

经典离散傅里叶变换的理论频率分辨率 Δf 为

时间窗长度 T 的倒数, $\Delta f = 1/T$,若实际的频率分辨率小于 Δf ,则常规的频谱分析方法无法准确辨识该信号的频谱。利用细化频谱逼近目标信号的频率是可行的解决办法。

离散时间周期信号 $x[n]$ 的傅里叶级数表示为

$$x[n] = \sum_{k=-\infty}^{\infty} a_k \exp\left(jk\left(\frac{2\pi}{N}\right)n\right) \quad (4)$$

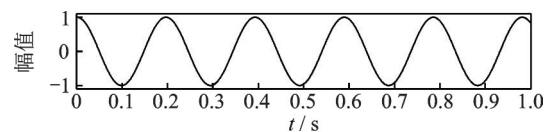
其中: N 为采样周期; a_k 为傅里叶级数的系数,也称为 $x[n]$ 的频谱 $X[f]$ 。

$x[n]$ 的表达式为

$$X[n] = \frac{1}{N} \sum_{k=-\infty}^{\infty} x[n] \exp\left(-jk\left(\frac{2\pi}{N}\right)n\right) \quad (5)$$

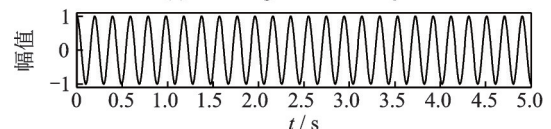
根据上述性质,理论上若离散时间周期信号满足整周期采样的条件,则能够用有限级数完整表示该离散时间周期信号。在实际情况下,由于缺乏先验信息或者无法实现长时间采样,导致无法利用整周期信号做频谱分析,引起频谱分析误差。

以幅值为1、频率为5.1 Hz的数值仿真信号为例(信号幅值为无量纲数值),采样时长 $T_1 = 1$ s, $T_2 = 5$ s,采样频率 $f_s = 1024$ Hz,快速傅里叶变换(fast Fourier transform,简称FFT)频谱的分辨率分别为 $\Delta f_1 = 1/T_1 = 1$ Hz, $\Delta f_2 = 1/T_2 = 0.2$ Hz,2种采样长度情况下频谱都存在一定程度的能量泄露。图2为快速傅里叶变换得到的频谱。对于单分量信号谱,采样周期越长,频谱分辨率越高,且能量最高的频率点最接近信号真实的频率;然而在实际情况下采样周期较短,不满足分析需求。



(a) 信号时间总长 $T_1 = 1$ s

(a) The length of time is $T_1 = 1$ s



(b) 信号时间总长 $T_2 = 5$ s

(b) The length of time $T_2 = 5$ s

图2 快速傅里叶变换得到的频谱

Fig.2 The FFT spectrum

根据离散时间傅里叶变换(discrete time Fourier transform, 简称DTFT)的性质,得到细化频谱的DTFT近似计算公式为

$$X[f_{\min} + m\Delta f] = \frac{1}{N} \sum_{k=-\infty}^{+\infty} x[k] \exp(-j2\pi(f_{\min} + m\Delta f)k) \quad (6)$$

其中: Δf 为频率分辨率; $m=0, 1, \dots, M-1$; $M=(f_{\max}-f_{\min})/\Delta f$,为输出点数; $(f_{\min}, f_{\max})$ 为信号频率成分的粗略范围。

理论上, Δf 不受 N 的限制,可根据实际分析需求设定;频率分析点数仅与频率分辨率设定有关。

当 $\Delta f > \frac{f_s}{N}$,DTFT获得频谱比FFT得到的频谱更加精细,可实现频谱细化分析。这一算法本质上是补零的细化傅里叶变换(the Fourier transform, 简称FT)算法。

周期信号的频谱细化可以看作是对连续傅里叶频谱的离散采样分析。对于单分量信号,连续傅里叶频谱满足

$$\left| \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \exp(-j2\pi ft) dt \right| \leq \left| \exp(j2\pi\theta_0(\tau)) \int_{-\infty}^{\infty} A(t) dt \right| \quad (7)$$

其中: $A(t)$ 为分析信号 $x(t)$ 的幅值; $\theta_0(\tau)$ 为分析信号的相位。

细化频谱的离散时间傅里叶变换如图3所示。图3(a)中5.0 Hz和5.2 Hz频谱点幅值相等,图3(b)

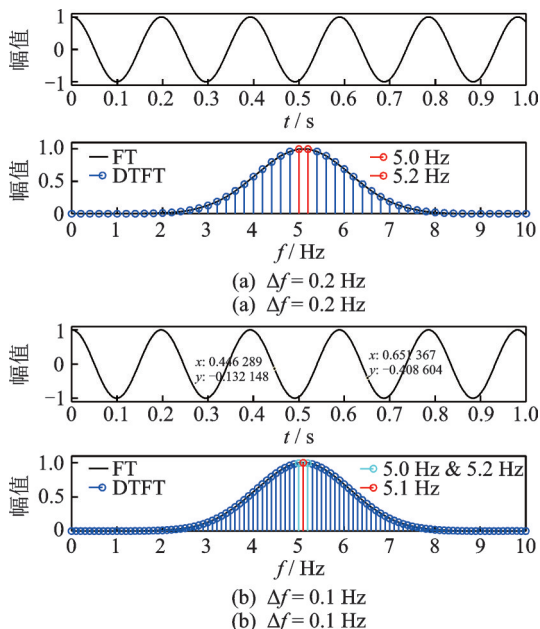


图3 细化频谱的离散时间傅里叶变换

Fig.3 DTFT spectrum

中5.1 Hz幅值高于5.0 Hz和5.2 Hz。当DTFT频率分辨率越高,时频变换得到的频谱越细,可通过搜索频谱上能量的最大值点来估计单分量信号的真实频率。

1.3 瞬时频率提取

STFT作为非平稳信号的分析工具,可将一维时间信号扩展到二维时频空间,用来表征信号的频率和幅值的时变特征。STFT的表达式为

$$\text{STFT}(\tau, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) h(t - \tau) \exp(-j2\pi ft) dt \quad (8)$$

其中: $h(t)$ 为非负、归一化的窗函数,通常使用高斯窗函数。

基于细化DTFT的STFT离散计算公式为

$$\text{STFT}[n, f_{\min} + m\Delta f] = \frac{1}{L} \left\{ x \left[n - \frac{L}{2} + k \right] h[k] \times \exp(-j2\pi(f_{\min} + m\Delta f)k) \right\} \quad (9)$$

估计单分量信号的大致频率范围之后,合理设置频率分辨率,运用脊线搜索方法估计信号的瞬时频率(instantaneous frequency, 简称IF)。

2 算法流程与仿真验证

2.1 基于细化时频谱速度估计的同步分析

速度同步时谐波基频与啮合谐波基频之间的关系式为

$$f_M = f_H Z_H = f_L Z_L \quad (10)$$

其中: f_H 为输入轴速度; f_L 为输出轴速度; Z_H 为高速齿轮齿数; Z_L 为低速齿轮齿数。

通常,利用同一种算法直接估测单分量信号瞬时频率的估计误差相对稳定。假设瞬时频率估计算法估计的速度同步基频分量和啮合响应谐波分量的瞬时频率误差范围为 $[\Delta E_{\min}, \Delta E_{\max}]$,根据阶次关系从 f_M 换算到 f_H ,可将估计误差缩小 Z_H 倍,即为

$$\left[\frac{\Delta E_{\min}}{Z_H}, \frac{\Delta E_{\max}}{Z_H} \right]。$$

高次谐波IF与基频成倍数关系,意味着速度的非平稳性在高次谐波频率中表现得更加明显,将给STFT提取速度信息的方法带来更大误差。笔者利用广义解调降低高次谐波分量的非平稳性,利用细

化的STFT方法提高IF的估计精度,同时采用多次迭代计算进一步提升速度估计精度。

具体算法流程如下:

1) 对原始信号做STFT时频分析,粗略估算目标啮合谐波的瞬时频率 $f_M^0(t)$;

2) 基于式(2)得到解调变换频谱 $X_G[f]$,对其做逆快速傅里叶变换(inverse fast Fourier transform,简称IFFT),得到低频近似平稳广义解调信号 $x_G(t)$;

3) 根据计算精度需求,设定窗函数宽度 L_w 和频率分辨率 Δf ,基于式(9)计算频谱细化的STFT时频谱,利用脊线提取方法估计信号 $x_G(t)$ 的瞬时频率 $f_G^0(t)$;

4) 原始信号 $x(t)$ 最终估计的啮合谐波分量瞬时频率 $f_M^i = f_G^{i-1}(t) + f_M^{i-1}(t)$;

5) 判断标准差(standard deviation,简称STD) $\text{STD}[f_G(t)]$ 是否小于迭代停止误差 ΔE ,否则返回第2步,重复上述计算过程;

6) 根据啮合谐波分量瞬时频率 f_M 与 Z 速度基频的谐波关系换算得到转速 $f_{\text{shaft}} = f_M^i/Z$;

7) 利用估计的轴转速信号生成虚拟键相信号;

8) 根据虚拟键相信号对原始信号 $x(n\Delta t)$ 进行重采样,得到与速度同步的角域信号 $x(n\Delta\theta)$;

9) 选取整周期的角域信号 $x(M\Delta\theta)$ 进行阶次分析或者TSA,提取故障特征。

2.2 仿真案例

根据齿轮箱啮合信号模型设计仿真信号对所提出方法进行验证。平行齿轮箱啮合信号为

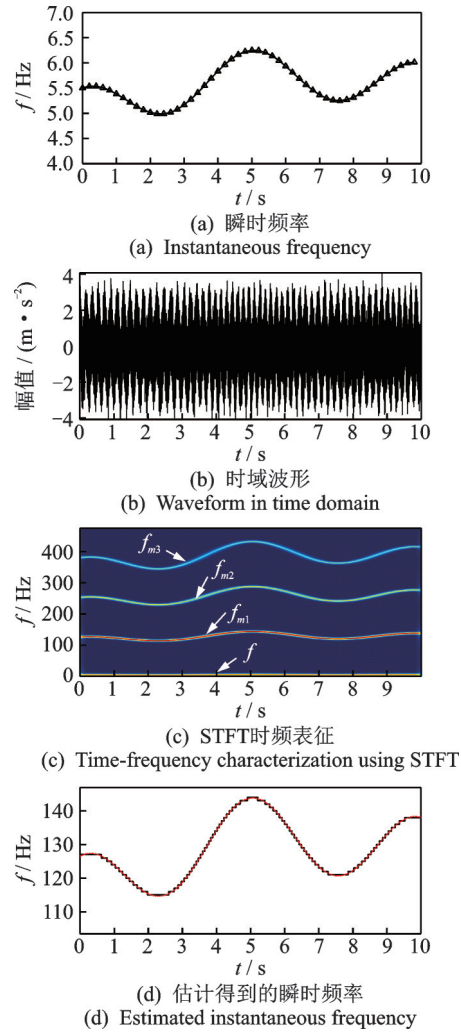
$$s(t) = A_0 \cos\left(2\pi \int f(t) dt + \varphi_0\right) + \sum_{m=0}^M A_m \cos\left(2\pi m T \int f(t) dt + \varphi_m\right) \quad (11)$$

其中: $f(t)$ 为轴速度; A_0, φ_0 分别为速度同步基频的幅值和相位; T 为齿数; m 为啮合频率阶次; A_m, φ_m 分别为第 m 阶啮合谐波的幅值和初相位。

仿真信号轴速度随时间变换关系为

$$f(t) = 5 + 0.5 \cos(0.4\pi t) + 0.25t + 0.02t^2 \quad (12)$$

图4为仿真信号及基于STFT分析结果。仿真信号中包含速度基频谐波和三阶啮合谐波分量,仿真信号中谐波分量参数如表1所示。采样频率为1 024 Hz,信号长度为10 s。



红色线为真实速度曲线;黑色线为估计得到的速度曲线

图4 仿真信号及基于STFT分析结果

Fig.4 Simulation signal and the results of STFT

表1 仿真信号中谐波分量参数

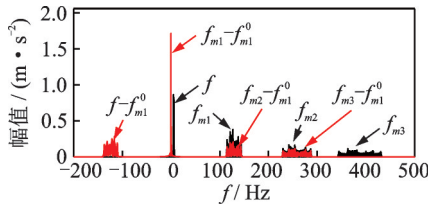
Tab.1 Parameters of simulation signal

参数	A_0	A_1	A_2	A_3	φ_0	M	φ_1	φ_2	φ_3	T
实际值	1	1.3	0.8	0.6	0	3	π	0.33π	0.5π	23

根据式(12)得到速度基频的带宽为 $\text{BP}_f = |f_{\max} - f_{\min}| = 1.27 \text{ Hz}$ 。根据阶次关系可知,三阶啮合频率的频率带宽分别为 $\text{BP}_{m_1} = 29.21 \text{ Hz}$, $\text{BP}_{m_2} = 58.42 \text{ Hz}$, $\text{BP}_{m_3} = 87.63 \text{ Hz}$ 。啮合频率的阶次越高,瞬时频率带宽越大,非平稳性与阶次比呈正相关关系。

第1次迭代的解调谱如图5所示。广义解调算子将一阶啮合分量解调并搬到零频附近,一阶啮合分量的频谱带宽已被极大缩小,其他分量在频谱上的位置和带宽也相应发生变化。

设定频率分辨率,估计广义解调后的一阶啮合



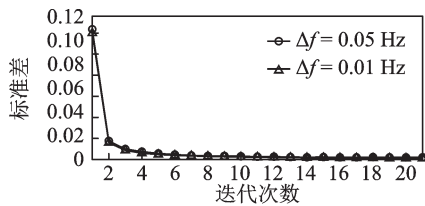
红色线为基于估计频率解调的频谱;黑色线为原始信号频谱

图5 第1次迭代的解调谱

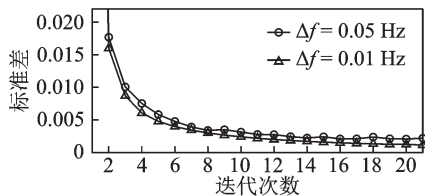
Fig.5 The first iteration of demodulation spectrum

分量频谱范围为 $[f_{\min}, f_{\max}] = [-3 \text{ Hz}, 3 \text{ Hz}]$;基于式(9)计算细化的STFT频谱,追踪得到瞬时频率 f_G^{i-1} ,新的估计啮合频率为 $f_{m1}^i = f_{m1}^{i-1} + f_G^{i-1}$ 。计算标准差 $\text{STD}(f_G^{i-1})$,判定 $\text{STD}(f_G^{i-1})$ 是否小于 ΔE ,若 $\text{STD}(f_G^{i-1}) < \Delta E$,则估计的啮合频率为 f_{m1}^i ,否则利用瞬时频率 f_{m1}^i 重新对原始信号进行广义解调,重复瞬时频率追踪计算步骤,直到广义解调后的一阶啮合分量瞬时频率的标准差 $\text{STD}(f_G^{i-1})$ 小于 ΔE ,最终估计的瞬时轴速度 $f = f_{m1}^i / Z_1$ 。

$\Delta f = 0.01 \text{ Hz}$ 和 0.05 Hz 时,瞬时频率估计误差收敛曲线如图6所示。可以看出:迭代逐渐收敛,在第5次迭代之后,2种频率分辨率下的 $\text{STD}(f_G^{i-1})$ 下降到0.005以下;频率分辨率 Δf 越小, $\text{STD}(f_G^{i-1})$ 越小。



(a) 迭代计算瞬时频率标准差曲线
(a) Iterative calculation of instantaneous frequency standard deviation curve



(b) 图7(a)中曲线的局部放大图
(b) Zoom in part of the fig.7(a)

图6 瞬时频率估计误差收敛曲线

Fig.6 Convergence curves of estimated IF error

$\Delta f = 0.01 \text{ Hz}$ 和 0.05 Hz 时,迭代5次估计的瞬时频率估计绝对误差值如图7所示。不考虑端点误差,最大估计误差均小于 0.001 Hz 。2种频率分辨率下,迭代5次计算耗时分别为 0.87 s 和 1.41 s 。可

见,设置的细化频谱频率分辨率越小,在同样的迭代次数下, $\text{STD}(f_G^{i-1})$ 越小,瞬时频率追踪精度越高。

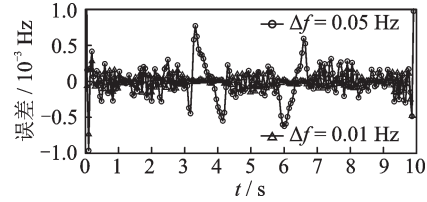
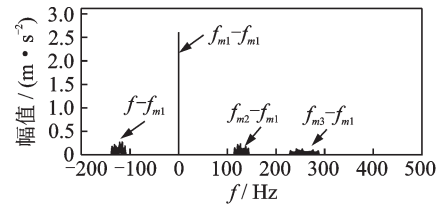


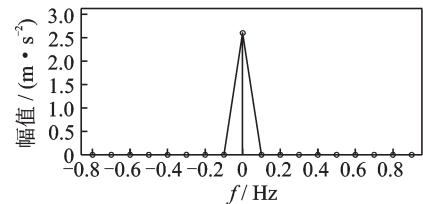
图7 瞬时频率估计绝对误差值

Fig.7 The absolute error value of IF estimates

图8为 $\Delta f = 0.05 \text{ Hz}$ 迭代5次之后的信号解调谱。可见,一阶拟合分量被调制到零频处,在零频附近未见频率弥散。图9为估计速度计算的阶次谱与真实速度计算的阶次谱比较。2种阶次谱几乎完全重合,表明估计的瞬时频率与真实频率之间的误差很小。



(a) 第1次解调信号的频谱
(a) Spectrum of the first demodulated signal



(b) 图9(a)频谱在零频附近的局部放大
(b) Zoom near the zero frequency of the fig.9(a)

图8 迭代5次之后的信号解调谱

Fig.8 Signal demodulation spectrum after 5 iterations

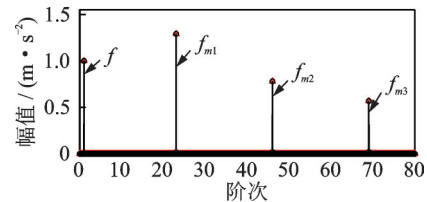


图9 阶次谱比较

Fig.9 Order spectrum comparison

4种方法的相对误差分析如表2所示。可见,笔者提出的IGD方法提取的速度与真实速度之间的相对误差最大为 0.01% ,较经典的STFT脊线追踪方法、Hilbert解调方法以及TKE法的估计误差小。

表 2 相对误差分析				
Tab.2 Relative errors analysis				
参数	方法			
	IGD	STFT	Hilbert	TKE
相对误差/%	0.01	1.71	1.98	0.43
t/s	0.41	0.21	0.22	0.73

3 应用

图 10 为某直升机传动系统的局部结构示意图。该传动系统主要包含输入齿轮级、并车级以及行星齿轮级。振动传感器安装在传动系统的机匣外表面。表 3 为直升机传动系统参数。

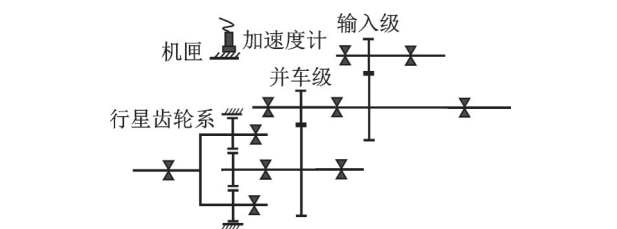


图 10 传动系统的局部结构示意图
Fig.10 Partial structure diagram of transmission

表 3 传动系统参数				
Tab.3 Parameters of transmission				
部件名称		齿数	部件名称	齿数
输入级	小齿轮	27	太阳轮	48
	大齿轮	74	行星轮	55
平行齿轮级	圆柱齿轮	21	圈齿	162
	面齿轮	142	行星轮数	5

传动系统测试时发动机变速运行。测试过程中只采集了机匣振动加速度信号,未记录发动机输出轴转速信息,振动信号离散采样率为 25.6 kHz。下台检查时,在初级减速齿轮和低速级面齿轮上发现了擦伤痕迹。二者的故障损伤图如图 11 所示。

图 12 为振动信号及其频谱。图 12(a)为采集的 60 s 振动加速度信号,对其直接进行 FFT,得到如

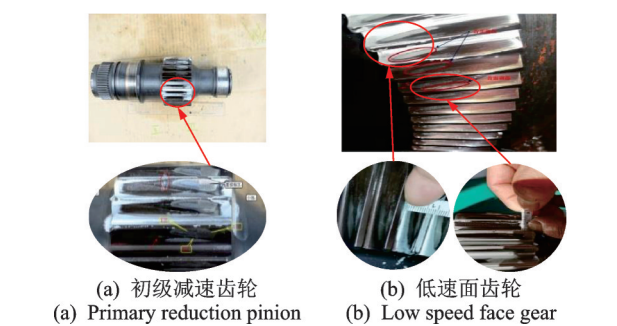


图 11 故障损伤图
Fig.11 Photos of damage condition

图 12(b)所示的频谱,仅从频谱上不能正确解读各峰值的实际含义。

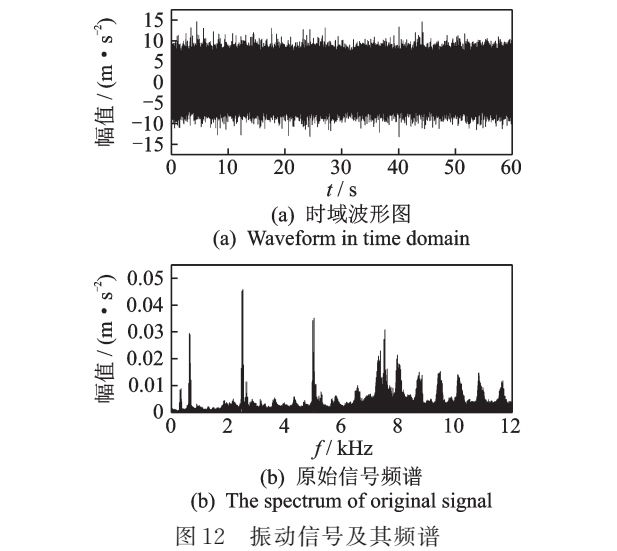


图 12 Vibration signal and its frequency spectrum

为了找出振动信号中包含的齿轮部件损伤信息,利用笔者所提方法从振动信号中提取传动系统动力输入级的转速。振动信号中估计的瞬时频率如图 13 所示。发动机输入级速度在 20 s 开始加速,加速 19 s 后速度从 248 Hz 上升到 321 Hz。

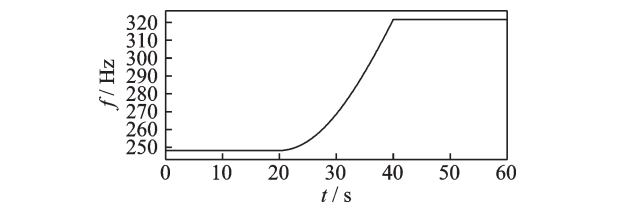


图 13 估计的瞬时频率
Fig.13 The estimated IF

图 14 为输入级同步分析。从阶次谱可以看出,除了阶次 1 与 27 外,大部分成分的频率与输出轴转速频率不构成整数比关系。其中:阶次 1 为输出轴的转速响应;阶次 27 为初减齿轮的啮合响应。

取 100 圈信号平均 10 次,从角域信号波形可以看出,输入级振动幅值明显受到轴转速调制。从图 14(d)可知,高速输入轴同步的振动信号被保留,非同步信号被抑制,这表明估计的瞬时频率精度满足 TSA 需求。在 TSA 阶次谱中可看到初减齿轮的啮合响应及速度调制边带,其他的非同步成分被抑制,表明初减齿轮存在分布式损伤,与实际情况相符。

对中间轴的平行齿轮级同步分析如图 15 所示。图 15(b)中存在显著的非整数旁瓣噪声干扰。从图 15(d)可知,TSA 成功抑制了与中间轴非同步的响

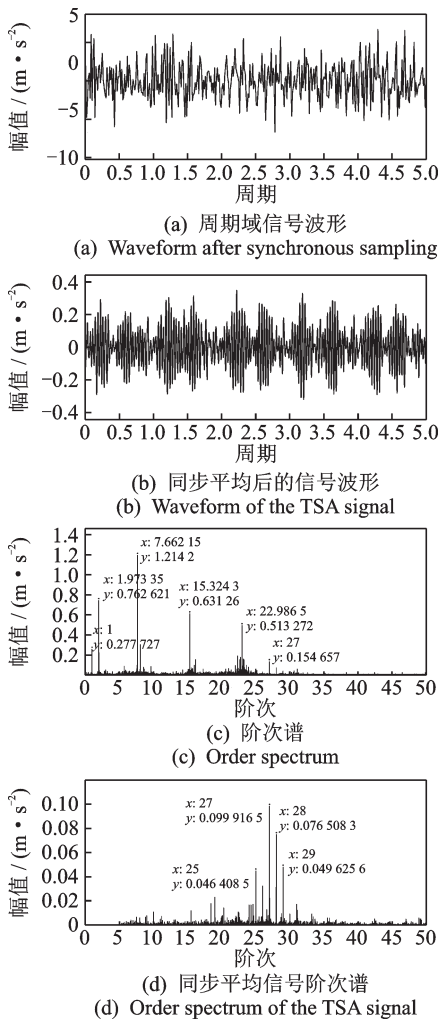


图 14 输入级同步分析

Fig.14 Input stage synchronous analysis

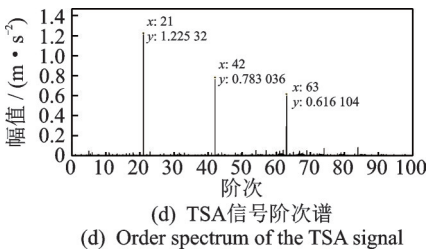
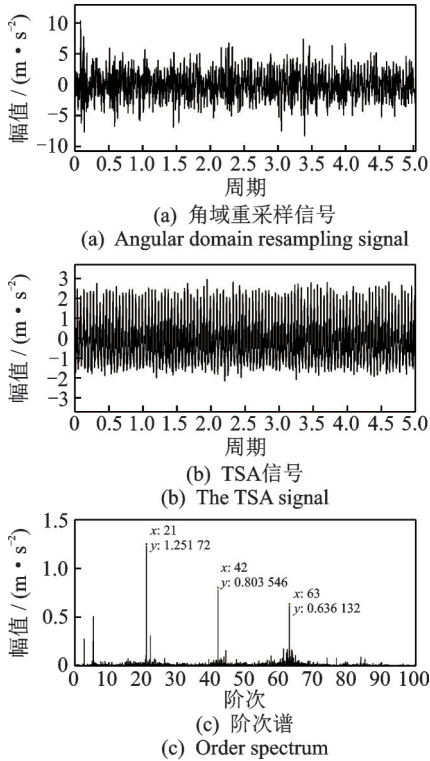


图 15 平行齿轮级同步分析

Fig.15 Parallel stage synchronous analysis

应成分,与中间轴同步的响应成分得以保留。此外,中间级齿轮 TSA 阶次谱未见显著调制边带,因此判定中间齿轮级未出现明显损伤。

图 16 为行星齿轮同步分析。由图发现,面齿轮存在显著的速度调制旁瓣,表明面齿轮存在损伤。上述同步分析结果与传动系统检查的结果一致。

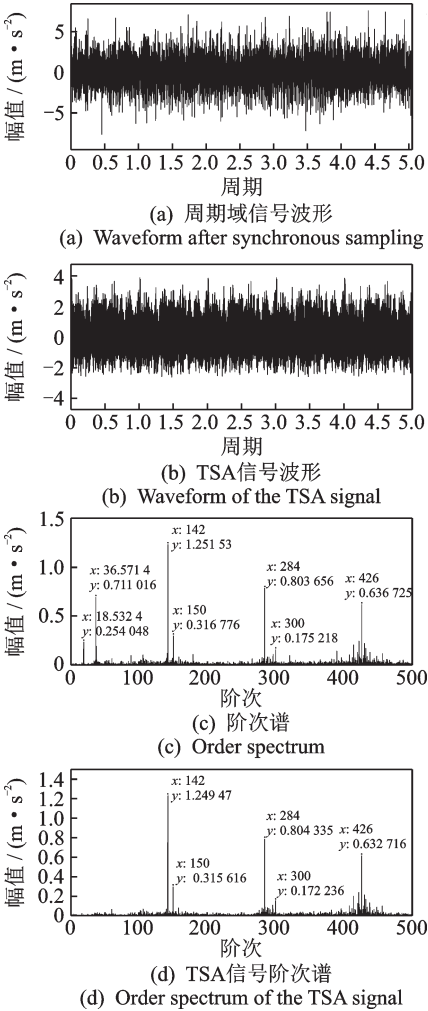


图 16 行星齿轮同步分析

Fig.16 Planetary synchronous analysis

4 结 论

1) 将广义解调和 STFT 方法结合,提升非平稳

信号时频分析精度。针对传统STFT分析非平稳信号精度较低的问题,利用广义解调将强非平稳信号解调为低频的近似平稳信号,开发了细化频谱的STFT时频分析方法。

2) 利用迭代计算改善瞬时频率提取精度。将解调信号瞬时频率标准差作为迭代是否终止的判断标准。仿真信号分析结果表明,迭代计算收敛。

3) 基于新的瞬时频率估计方法开展无转速计的同步分析。从振动信号中提取准确的轴转速信息,该方法被成功应用在直升机传动系统部件振动信号的同步分析中。

4) 与传统的基于谱分析的方法相比,所提出方法虽然具备较高速度提取精度,但需要提前获得先验知识。

参 考 文 献

- [1] 龙海军,孙灿飞,莫固良.直升机振动检测通用算法的研究与实现[J].振动、测试与诊断,2016,36(3): 524-528.
LONG Haijun, SUN Canfei, MO Guliang. Research and implementation of a general algorithm for helicopter vibration detection [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2016, 36(3): 524-528. (in Chinese)
- [2] XIA Y, LIANG D, ZHENG G, et al. Helicopter main reduction planetary gear fault diagnosis method based on SVDD[J]. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 2020, 64(1/4): 137-145.
- [3] ELASHA F, LI X C, MBA D, et al. A novel condition indicator for bearing fault detection within helicopter transmission[J]. Journal of Vibration Engineering & Technologies, 2021, 9(2): 215-224.
- [4] MCFADDEN P D, SMITH J D. Model for the vibration produced by a single point defect in a rolling element bearing [J]. Journal of Sound and Vibration, 1984, 96(1): 69-82.
- [5] MCFADDEN P D, SMITH J D. The vibration produced by multiple point defects in a rolling element bearing[J]. Journal of Sound and Vibration, 1985, 98(2): 263-273.
- [6] ANTONI J, BONNARDOT F, RAAD A, et al. Cyclostationary modelling of rotating machine vibration signals[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2004, 18(6): 1285-1314.
- [7] YANG X K, WEI D D, ZUO M J, et al. Analysis of vibration signals and detection for multiple tooth cracks in spur gearboxes [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2023, 185: 109780.
- [8] PEETERS C, LECLÈRE Q, ANTONI J, et al. Review and comparison of tachless instantaneous speed estimation methods on experimental vibration data [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2019, 129: 407-436.
- [9] LU S L, YAN R Q, LIU Y B, et al. Tachless speed estimation in order tracking: a review with application to rotating machine fault diagnosis[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2019, 68(7): 2315-2332.
- [10] FELDMAN M. Hilbert transform in vibration analysis [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2011, 25(3): 735-802.
- [11] BOUDRAA A O, CEXUS J C, SALZENSTEIN F, et al. IF estimation using empirical mode decomposition and nonlinear Teager energy operator [C]//First International Symposium on Control, Communications and Signal Processing, 2004. Hammamet, Tunisia: IEEE, 2004: 45-48.
- [12] BONNARDOT F, EL BADAOUIM, RANDALL R B, et al. Use of the acceleration signal of a gearbox in order to perform angular resampling (with limited speed fluctuation)[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2005, 19(4): 766-785.
- [13] URBANEK J, BARSZCZ T, ANTONI J. A two-step procedure for estimation of instantaneous rotational speed with large fluctuations [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2013, 38(1): 96-102.



第一作者简介:汤勇,男,1992年7月生,硕士、工程师。主要研究方向为航空发动机振动分析与故障诊断。
E-mail:2814641135@qq.com

通信作者简介:吴太欢,男,1995年8月生,博士生。主要研究方向为航空发动机振动分析与故障诊断、非平稳信号处理。
E-mail:douglas_th_wu@163.com