

运用小波变换的飞机管路振动信号降噪方法*

姜宏伟^{1,2}, 袁朝辉¹, 邱雷³

(1. 西北工业大学自动化学院 西安, 710072) (2. 中国飞行试验研究院 西安, 710089)

(3. 南京航空航天大学航空宇航学院 南京, 210016)

摘要 为解决飞行试验管路振动测试信号无法直接进行后继处理得到管路振动的加速度、位移等振动特征参数的问题, 研究了一种基于连续复数小波变换的降噪方法。该方法利用连续复数小波变化提取振动测试信号中管路共振频率范围内的时频成分, 降低谐波和白噪声等主要干扰的幅度以达到降噪效果, 能更有效地获取飞行过程中管路的振动状况。首先, 分析了基于连续复数小波变换的信号降噪原理; 然后, 通过对设计的仿真信号以及某型飞机试飞时的管路振动实测信号的降噪处理, 验证了该方法的可行性和有效性。

关键词 飞机管路; 振动测试; 连续复数小波变换; 降噪
中图分类号 TB302.5; TB33

引言

在我国现役飞机(含发动机)中管路失效的故障占总故障的 52%^[1], 液压管路较其他管路系统的管路容易破裂^[2]; 因此, 飞机管路的振动测试是飞机试飞过程中的重要测试环节。飞行试验的环境比较复杂, 飞机管路振动测试信号中通常含有电压幅值较高、频谱较宽的噪声信号。该类噪声主要以高斯白噪声为主, 另外带有复杂的低频和高频谐波噪声, 这给利用管路振动信号获取管路振动加速度、位移等表征管路振动强度的特征参数计算带来了困难。传统的数字滤波器降噪方法是基于傅里叶变换的降噪方法, 该方法要求有用信号和噪声信号的频带重叠部分尽可能小, 在频域就可以通过时不变的滤波方法将有用信号同噪声分离。基于阈值等参数的离散小波变换降噪方法^[3-8]在滤波参数、小波形式、分解层数的选取等方面存在一定困难, 并且对低频谐波的降噪效果不佳, 不能较好地从中提取出共振频率范围的振动信号。

针对上述问题, 笔者研究了一种基于连续复数小波变换的降噪方法。该方法可以有效地提取出信号中特定尺度下的时频成分, 进而能够从管路振动测试信号中提取出管路共振频率范围内的振动信号。

1 连续复数小波变换降噪方法

信号 $x(t)$ 的连续小波变换定义为

$$WT(a, b) = |a|^{-\frac{1}{2}} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \overline{\Psi\left(\frac{t-b}{a}\right)} dt \quad (1)$$

其中: 符号“—”表示复函数的共轭变换; a 为小波变换的尺度因子; b 为小波变换的时间因子。

由于数学上内积表示两个函数“相似”的程度, 所以式(1)说明了 $x(t)$ 与 Ψ 相似的程度。对式(1)进行分析可知, 基小波在允许条件下通过 a, b 的移动, 就可以得到一个灵活可变的时间-频率窗, 使在高“中心频率”时窗口自动变窄, 而在低中心频率时自动变宽, 通过这样一个窗口来察看信号 $x(t)$, 小波变换就具有局部化特性。对于信号 $x(t)$, 如果是由一些平稳成分组成, 则使用傅里叶分析效果较好; 而对于一个非平稳信号 $x(t)$, 它在时间域上的任一突变, 将扩展到整个频率轴; 因此, 对非平稳信号的分析比傅里叶分析要求更多, 利用局部特性更强的小波变换可以满足对非平稳信号分析的要求。在小波理论中, 引入了时间-尺度的概念。对于非平稳信号, 可以用时频分析的方法, 设计时间和频率的联合函数, 来描述信号在不同时间和频率的能量密度或强度。在小波分析中, 使用另外一个域——尺度域来表征频率域, 用联合的时间和尺度平面来描述信号。当尺度 a 较小时, 小波变换反映的是在 $t=b$ 附近的高频成分特性; 当 a 较大时, 反映的则是 $t=b$ 附近的低频成分特性。

常用的复数小波变换基函数有 Morlet 复数小波和 Shannon 复数小波。

Morlet 复数小波为

$$\Psi_{\text{mor}}(t) = \frac{1}{\sqrt{\pi f_b}} e^{2\pi i f_c t} e^{-t^2/f_b} \quad (2)$$

Shannon 复数小波^[10]为

$$\Psi_{\text{shan}}(t) = \sqrt{f_b} (\text{sinc}(f_b x)) e^{2\pi i f_c x} \quad (3)$$

其中: f_b 为小波带宽参数; f_c 为小波中心频率参数。

对 Morlet 复数小波变换 $\Psi_{\text{mor}}\left(\frac{t-b}{a}\right)$ 进行傅里叶变换可以得到

$$\Phi_{\text{mor}}(a\omega) = a e^{-i\omega b} e^{-\frac{1}{2} \frac{\omega_b}{4\pi} (\omega_c - a\omega)^2} \quad (4)$$

其中: $\omega_b = 2\pi f_b$; $\omega_c = 2\pi f_c$ 。

式(2)表明 Morlet 小波的中心在时间 $t=0$, 它的傅里叶变换式(4)的中心在 $\omega = \omega_c$ 。因此, Morlet 复数小波变换 $\Psi_{\text{mor}}\left(\frac{t-a}{b}\right)$ 的中心在时间 $t=b$, 它的傅里叶变换 $a e^{-i\omega b} \Phi(a\omega)$ 的中心在 $\omega = \omega_c/a$, 所以信号 $x(t)$ 的 Morlet 复数小波变换代表了该信号在时间 $t=b$, 频率 $\omega = \omega_c/a$ 附近的时频成分。

对 Shannon 复数小波变换 $\Psi_{\text{shan}}\left(\frac{t-b}{a}\right)$ 进行傅里叶变换可以得到

$$\Phi_{\text{shan}}(\omega) = \begin{cases} \sqrt{\frac{2\pi}{\omega_b}} & (\omega_c - \frac{\omega_b}{2} < \omega \leq \omega_c + \frac{\omega_b}{2}) \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (5)$$

其中: $\omega_b = 2\pi f_b$; $\omega_c = 2\pi f_c$; $\omega_c > \omega_b/2$ 。

式(3)表明 Shannon 复数小波的中心在时间 $t=0$, 它的傅里叶变换式(5)的中心在 $\omega = \omega_c$, 频带宽度为 $(\omega_c - \omega_b/2, \omega_c + \omega_b/2]$ 。因此, Shannon 复数小波变换 $\Psi_{\text{shan}}\left(\frac{t-b}{a}\right)$ 的中心在时间 $t=b$, 它的傅里叶变换 $a e^{-i\omega b} \Phi(a\omega)$ 的中心在 $\omega = \omega_c/a$, 频带为 $(\omega_c/a - \omega_b/2a, \omega_c/a + \omega_b/2a]$ 。所以信号 $x(t)$ 的 Shannon 复数小波变换代表了该信号在时间 $t=b$, 频率 $\omega = \omega_c/a$ 以及频带为 $(\omega_c/a - \omega_b/2a, \omega_c/a + \omega_b/2a]$ 的时频成分。通过上述分析可知, 信号 $x(t)$ 的连续复数小波变换反映的是该信号在尺度为 a 时, 时间 $t=b$ 附近的时频成分。尺度 a 与信号的采样率和时频成分对应的频率 ω 有关。为了能够有效地从管路振动测试信号中提取出管路共振频率范围内的振动信号, 可以根据共振频率和信号采样率构造小波变换尺度, 对振动测试信号进行连续复数小波变换得到此信号在该尺度下的时频成分, 将其变换成对应的时域信号作为降噪后的信号, 参与后续振动强度特征参数的计算。

在具有相同的小波带宽和中心频率的情况下比较上述两种复数小波变换基函数的频谱, 如图 1 所

示。可以看出, Morlet 复数小波的时频局域化性能比 Shannon 小波好。由于噪声的频带很宽, 使用 Morlet 复数小波变换可以更有效地提取出振动信号中共振频率范围内的信号成分, 并且能够更加突出共振频率下的振动信号, 所以笔者选择 Morlet 复数小波变换基函数来进行小波降噪。

实际使用该方法进行降噪时, 实施流程如下:

- 1) 根据信号的采样频率 f_s 和期望提取的信号中心频率 f 得到小波变换的尺度 $a = f_s/f$;
- 2) 定义小波带宽参数 $f_b = 1$, 小波中心频率参数 $f_c = 1$;
- 3) 对信号进行小波变换得到小波变换复系数;
- 4) 得到的小波变换复系数中, 实部代表了频率为 f 的信号成分。

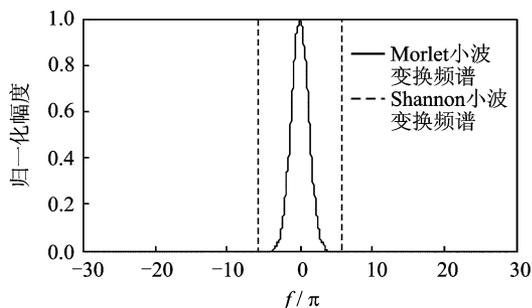


图1 Morlet 与香浓复数小波变换基函数频谱的比较

2 功能验证

2.1 仿真信号的降噪

首先对软件仿真噪声信号进行降噪处理, 对本研究的降噪方法进行测试。设计的仿真噪声信号的组成为: 5 V, 100 Hz 基准正弦波; 在基准正弦波上叠加 3 V, 150 Hz 正弦波和 1 V, 50 Hz 正弦波模拟信号中的谐波; 在此基础上增加高斯白噪声。利用本研究方法对其进行降噪, 提取 5 V, 100 Hz 的基准正弦波。图 2 给出了设计的噪声信号及其频谱, 图 3 给出了利用本研究方法降噪的情况。降噪后的信号与仿真信号中 100 Hz 的基准正弦波的幅值和相位一致, 可以看出, 采用本研究方法可以保证噪声信号的有效降低且不影响实际信号的大小, 没有端点效应。

2.2 实测信号的降噪

图 4(a) 中的虚线标明的信号是在某型飞机试飞过程中处于平飞状态时某液压管路振动加速度传感器的响应信号。在试飞之前的地面测试中, 确定了该管路测点在 600 Hz 的振动频率附近存在一个低

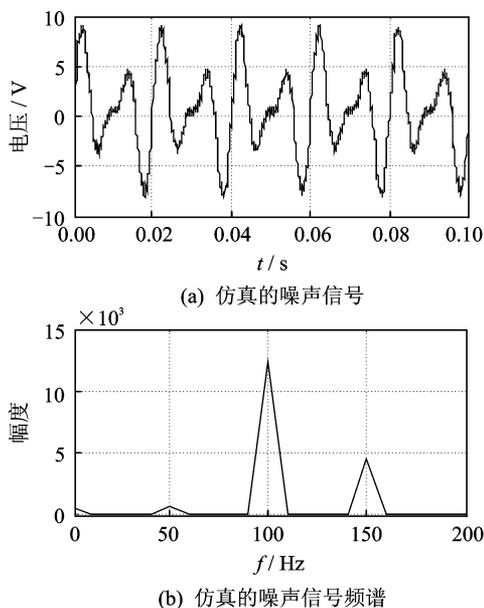


图 2 设计噪声信号及其频谱

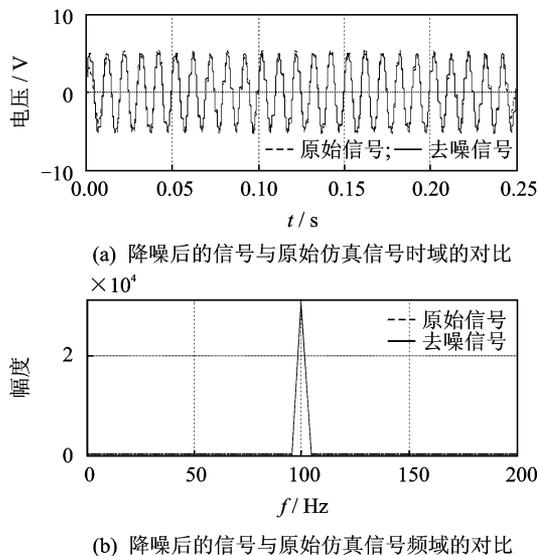


图 3 仿真噪声信号的降噪结果

频大应变共振点。从图 4(b)中原始测试信号的频谱可以看出,管路在 630 Hz 的振动幅度较大,与地面测试情况基本吻合。

为了得到管路在该共振频率段振动下的真实数据,利用本研究降噪方法对其进行降噪。从图 4 的对比可以看出,降噪后的信号高低频噪声得到了极大的抑制,而频率为 630 Hz 的振动信号没有衰减。

为了对比降噪效果,采用了离散小波降噪和数字带通滤波器方法对其进行降噪。离散小波降噪的参数选取比较困难,需要多次尝试后选取一组较好的参数得到滤波结果。针对图 4 的实测信号,经过调试,选用 Daubechies 小波,尺度为 5,分解层数设置为 5 层。降噪对比结果见图 5。从图 5 可以看出,高

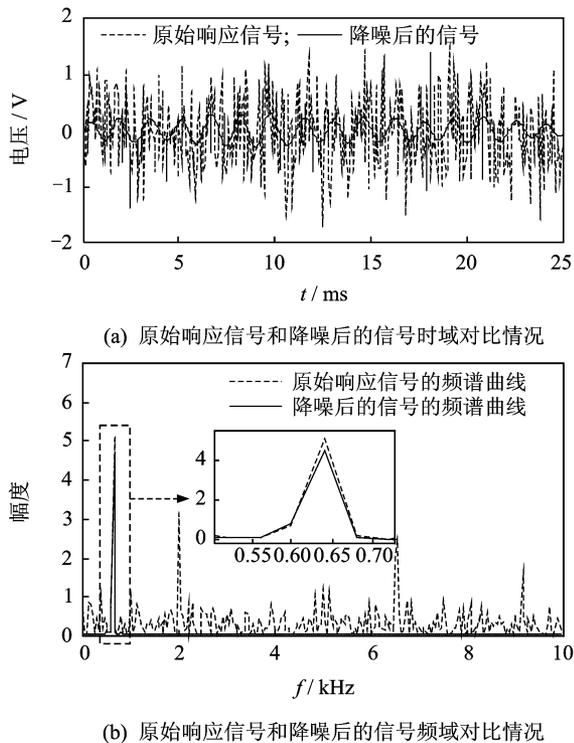


图 4 采用本研究方法对实测信号的降噪情况

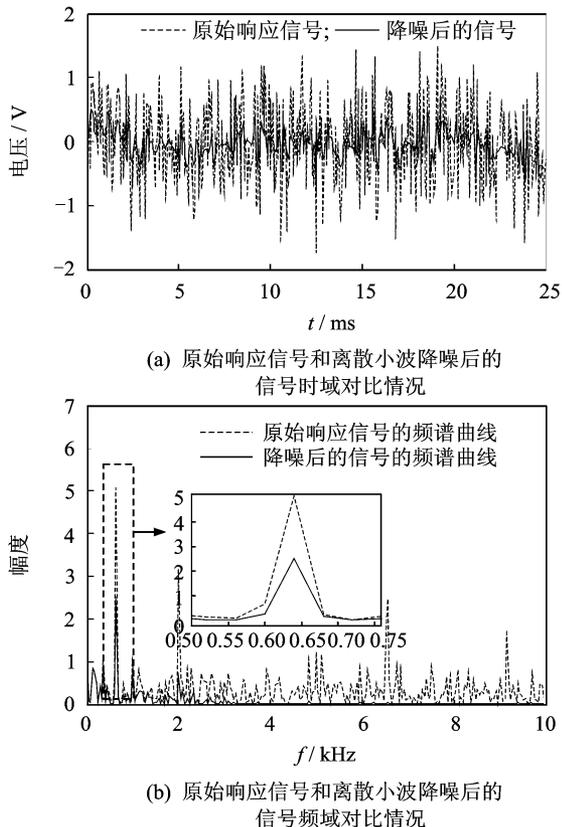
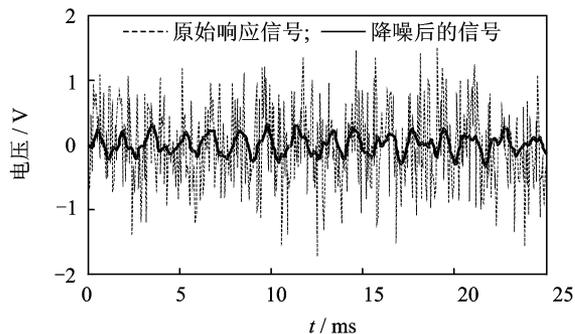


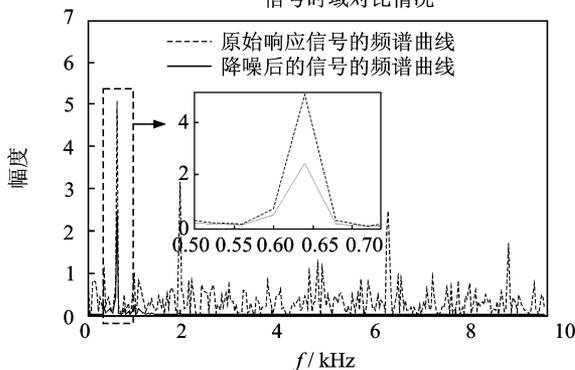
图 5 离散小波变换方法对实测信号的降噪情况

频噪声得到了抑制,但是低频噪声的降噪效果不好,并且降噪后的信号相对于原始信号中的 630 Hz 的信号成分幅度降低了约 1/2。

图6给出了数字带通滤波器的降噪对比情况。数字带通滤波器由一个2阶巴特沃斯低通滤波器和一个2阶巴特沃斯高通滤波器组成,低通滤波器的-3dB截止频率为800 Hz,高通滤波器的-3dB截止频率为500 Hz。从降噪结果可以看出,高、低频噪声得到了较好的抑制,但是频率为630 Hz的振动信号衰减较大。



(a) 原始响应信号和数字带通滤波器降噪后的信号时域对比情况



(b) 原始响应信号和数字带通滤波器降噪后的信号频域对比情况

图6 数字带通滤波器方法对实测信号的降噪情况

3 结束语

笔者研究了一种基于连续复数小波变换的信号降噪方法,分析了该方法的降噪机理,并通过仿真信号的降噪处理对其进行了测试。通过对实测的某型飞机管路振动测试信号进行降噪,对比了数字滤波器和离散小波变换方法的降噪效果,验证了该方法的可行性和有效性。

参 考 文 献

[1] 许锴俊. 航空发动机导管结构完整性要求的初步研究[J]. 航空发动机, 1994(3): 53-62.
Xu Ejun. A preliminary study of the structural integrity requirements of aviation engine pipeline[J].

Aeroengine, 1994(3): 53-62. (in Chinese)

- [2] 唐有才. 飞机液压导管破裂分析故障及措施[J]. 航空工程与维修, 2001(2): 19-20.
Tang Youcai. Analysis and remedy for faults of cracks on aircraft hydraulic tubes[J]. Aviation Maintenance & Engineering, 2001(2): 19-20. (in Chinese)
- [3] Giaouris D, Finch J W. Denoising using wavelets on electric drive applications[J]. Electric Power Systems Research, 2008, 78: 559-565.
- [4] 侯新国, 刘开培, 魏建华. 最佳小波包基改进软阈值的消噪方法及应用[J]. 振动、测试与诊断, 2008, 28(4): 366-368, 413.
Hou Xinguo, Liu Kaipei, Wei Jianhua. Application of improved soft threshold noise eliminating method based on optimal wavelet packet[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2008, 28(4): 366-368, 413. (in Chinese)
- [5] Poornachandra S. Wavelet-based denoising using sub-band dependent threshold for ECG signals[J]. Digital Signal Processing, 2008, 18: 49-55.
- [6] To A C, Moore J R, Glaser S D. Wavelet denoising techniques with applications to experimental geophysical data[J]. Signal Processing, 2009, 89: 144-160.
- [7] 唐进元, 陈维涛, 陈思雨, 等. 一种新的小波阈值函数及其在振动信号去噪分析中的应用[J]. 振动与冲击, 2009, 28(7): 118-121.
Tang Jinyuan, Chen Weitao, Chen Siyu, et al. Wavelet-based vibration signal denoising with a new adaptive thresholding function[J]. Journal of Vibration and Shock, 2009, 28(7): 118-121. (in Chinese)
- [8] 汤宝平, 何启源, 蒋恒恒, 等. 利用小波去噪和HHT的模态参数识别[J]. 振动、测试与诊断, 2009, 29(2): 197-200.
Tang Baoping, He Qiyuan, Jiang Hengheng, et al. Modal parameter identification based on Hilbert Huang transform and wavelet de-noising[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2009, 29(2): 197-200. (in Chinese)



第一作者简介: 姜宏伟, 女, 1969年12月生, 研究员。主要从事机载测试工作。曾发表《飞行试验冲击参数测试技术研究》(《测控技术》2010年第6期)等论文。

E-mail: kid_chao@yahoo.com.cn