

高精度频率分辨在振动信号辨识中的应用

张召磊¹, 孙晓伟¹, 夏德新¹, 李 芳²

(1. 北京航天动力研究所, 北京 100076; 2. 北京宇航系统工程研究所, 北京 100076)

摘 要: 发动机振动信号处理通常采用 DASP 软件进行。由于软件功能限制, DASP 处理采样频率为 50 kHz 发动机振动信号时, 频谱的频率分辨率最高精度仅为 12.2 Hz, 导致对微弱及故障信号的辨识较为困难。本文采用抗混叠低通滤波、信号抽取及短时傅里叶变换相结合的信号分析方法, 有效提高了频率分辨率的精度, 最高精度达到 1.2 Hz, 达到了理想的频率辨识效果。

关键词: 抗混叠低通滤波; 频率分辨率; 信号抽取; 短时傅里叶变换

中图分类号: V434-34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9374 (2017) 02-0066-06

Application of high-precision frequency resolution in vibration signal identification

ZHANG Zhaolei¹, SUN Xiaowei¹, XIA Dexin¹, LI Fang²

(1. Beijing Aerospace Propulsion Institute, Beijing 100076, China;

2. Beijing Institute of Aerospace Systems Engineering, Beijing 100076, China)

Abstract: DASP software is usually adopted to conduct vibration signal processing of rocket engine. Due to the limitation of the software function, the highest accuracy of spectrum frequency resolution is merely 12.2 Hz when the sampling frequency processed by DASP is 50 kHz engine vibration signal, which may cause a difficulty of distinguishing the weak and fault signals. A new signal analysis method that combines anti-aliasing low-passes filtering, signal extraction and short-time Fourier transform is adopted in this paper, which can improve the accuracy of frequency resolution effectively. The highest accuracy of the method can reach up to 1.2 Hz, which achieves the ideal effect of frequency identification.

Keywords: anti-aliasing low-pass filtering; frequency resolution; signal extraction; short-time Fourier transform

0 引言

涡轮泵是火箭发动机的核心, 在低温介质、

高温燃气、高压及高转速工况下工作, 具有结构复杂度高、技术难度大的特点, 因此能否正常工作直接影响发动机试验结果。涡轮泵是发动机振

收稿日期: 2016-09-09; 修回日期: 2017-03-21

作者简介: 张召磊 (1984—), 男, 硕士, 研究领域为转子动力学、振动信号处理

动的主要来源, 据统计, 超过 60% 的发动机故障来源于涡轮增压。涡轮增压频率丰富且广泛, 包含工频、倍频、分数次谐频和某些故障频率等信息, 分布于低频区 0 Hz 到高频区 10 kHz 的频段, 而推力室的振动频率多分布于 4 000 Hz 以上, 这就对发动机振动信号的采样提出了苛刻的要求。目前采样频率为 50 kHz, 可以覆盖发动机各组件的振动频段。然而, 由于与涡轮增压相关的故障频率多数均低于 2 000 Hz, 因此高采样频率一方面满足了频率范围的要求, 另一方面却严重影响频率分辨率的精度, 对涡轮增压频率的准确辨识产生不利影响。

因此, 为了准确提取涡轮增压振动信号频率, 提高信号的频率分辨率, 就需要高效可靠的振动信号处理方法和程序。DASP (Data Acquisition & Signal Processing) 振动分析软件集合了数据采集、信号处理、模态分析等功能, 但没有信号抽取的功能, 对于高频采样信号缺乏有效的高精度频率分辨率的辨识能力, 因此本文提出了一种基于抗混叠低通滤波、信号抽取及短时傅里叶变换相结合的振动信号分析方法, 并通过采用 Matlab 编程实现。

1 振动信号分析流程

发动机试车时振动信号采样频率 f_s 高达 50 kHz, 而频率分辨率正比于采样频率, 因此高采样频率直接导致频率分辨率精度大幅降低。为使信号达到较高精度的频率分辨率, 对振动信号处理时, 本文首先对信号进行抗混叠低通滤波, 之后选择合适的信号抽取倍数 D 进行信号抽取, 此时振动信号的采样频率变为 f_s/D , 再进行短时傅里叶变换 (Short-Time Fourier Transform), 通过选择合适的窗函数和宽度, 准确识别出微弱及故障频率。

1.1 抗混叠低通滤波器

常用的数字滤波器主要有两种, 无限长单位冲激响应 IIR 滤波器和有限长单位冲激响应 FIR 滤波器。对振动信号而言, IIR 滤波器可以较好的满足抗混叠低通滤波的要求。IIR 滤波器设计一般利用模拟滤波器的设计资源, 变换成满足预定指标的数字滤波器, 该方法方便、准确; 设计方法上通常采用切比雪夫 (Chebyshev) I 型滤波器, 其在通带内具有等波纹起伏特性, 而在阻带

内则单调下降, 且具有较大的衰减特性, 传递函数没有零点。阶数越高, 频率特性曲线越接近矩形, 如图 1 所示。根据振动信号处理的需要, 选取 8 阶 Chebyshev I 型滤波器作为原型滤波器设计 IIR 数字低通滤波器。

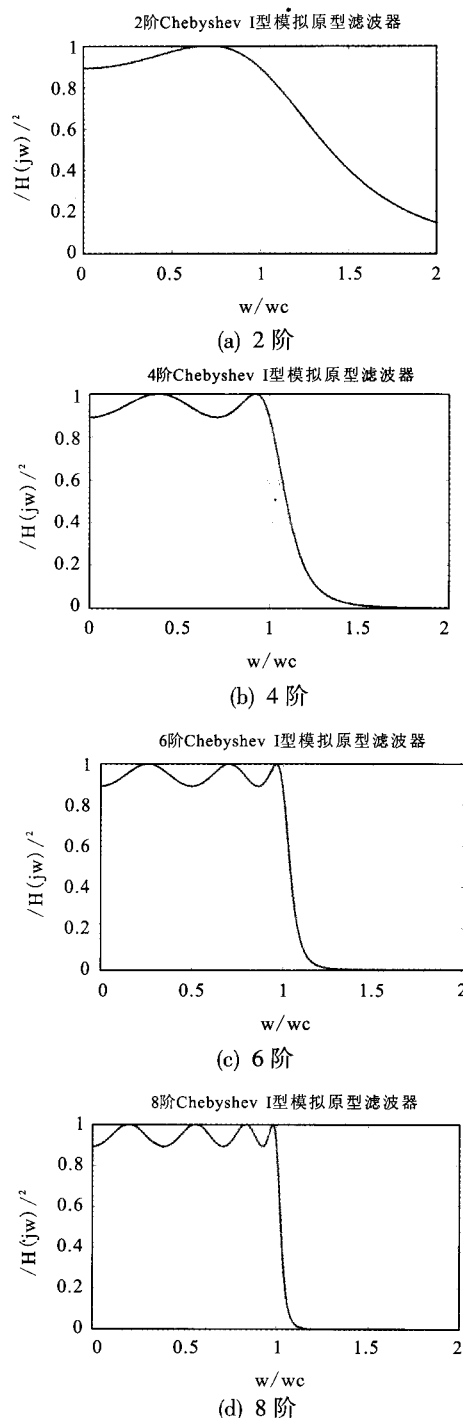


图 1 不同阶次的 Chebyshev I 型模拟原型滤波器

Fig. 1 Chebyshev I type analog prototype filter with different orders

1.2 频率分辨率与信号抽取

信号分析中, 频率分辨率是一个重要的概念。一般是指所用的算法能将信号中两个靠得很近的谱峰保持分开的能力。实际应用时, 可理解为频谱图中频率轴上所能得到的最小频率间隔。反映频率分辨率能力的 Δf 由下式决定:

$$\Delta f = f_s / (2.56 * M) = f_s / N$$

式中: f_s 为采样频率; M 为谱线数; N 为采样点数。

发动机试车时采样频率 f_s 为 50 kHz, DASP 软件频谱分析时的谱线数 M 最大为 1 600, 对应的采样点数 N 为 4 096, 因此, 频率分辨率 $\Delta f = 50 \text{ kHz} / 4\,096 = 12.2 \text{ Hz}$ 。为了提高频率分辨率的精度, 需降低采样频率 f_s 或者增加采样点数 N 。而根据《航空发动机设计手册》发动机整机振动测试和分析技术中信号处理的相关说明, 采样点数 N 不能任意增大, 通常以 4 096 为限, 因此只能通过降低采样频率实现提高频率分辨率的能力。

在进行模拟/数字信号的转换或数字信号抽取过程中, 信号采样时只有满足采样定理, 数字信号才能完整表征并能反映原始信号。以氢涡轮泵振动信号为例, 主要关注频段为 0~4 500 Hz, 根据耐奎斯特采样定理, f_s 需大于 2 倍的最高分析频率, 也即 $f_s > 9\,000 \text{ Hz}$, 因此, 10 kHz 的采样频率可满足 0~4 500 Hz 的频段; 重点频段为 0~2 000 Hz, f_s 需大于 2 倍的最高分析频率, 也即 $f_s > 4\,000 \text{ Hz}$, 因此, 5 kHz 的采样频率可满足 0~2 000 Hz 的重点频段。

通过对振动信号进行抗混叠低通滤波及信号

抽取, 将采样频率由 50 kHz 不失真的降为 10 kHz, 其他分析参数保持不变, 那么就可以实现频率分辨率精度由 12.2 Hz 提高到 2 Hz; 将采样频率由 50 kHz 不失真的降为 5 kHz, 其他分析参数保持不变, 那么就可以实现频率分辨率精度由 12.2 Hz 提高到 1.2 Hz。

1.3 短时傅里叶变换

随机信号在理论上可以分为平稳和非平稳两大类, 涡轮泵振动信号属于非平稳信号。如对其直接进行傅里叶变换, 就无法了解不同时段内信号频谱的变化情况。短时傅里叶变换是一种把时域分析和频域分析结合起来的分析方法, 既能反映信号的频率, 又能反映频率随时间变化的规律。当试车过程中的某时刻出现故障时, 振动信号经短时傅里叶变换后, 既可以分辨出故障频率大小, 又可以识别故障频率发生的时刻。

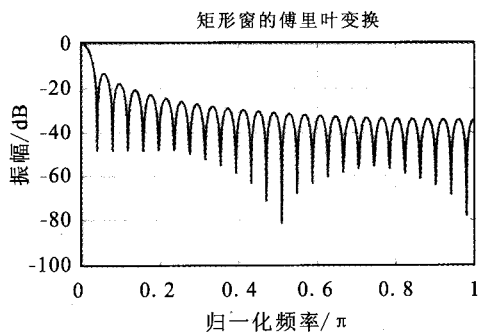
离散时间信号 $x(n)$ 的短时傅里叶变换, 定义为

$$\text{STFT}_x(n, \Omega) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} x(m) \omega(n-m) e^{-j\Omega m}$$

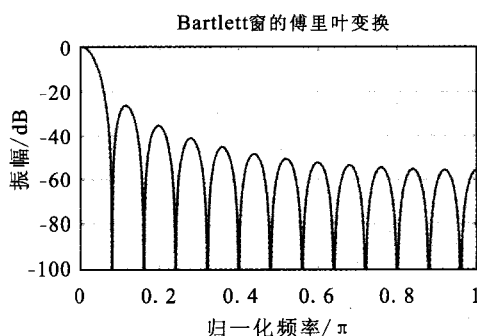
式中: $\omega(n)$ 为实窗函数, 离散 STFT 可以看做加窗序列 $x(m)\omega(n-m)$ 的傅里叶变换。

窗函数的选择是短时傅里叶变换分析的前提, 不同窗函数对其频谱分析有直接影响。窗函数选取要与信号匹配, 且窗口长度选的恰当才能够得到合适的频率分辨率性能。

常见窗函数有矩形窗、Bartlett 窗、Hanning 窗和 Hamming 窗, 对窗函数进行傅里叶变换可得其幅频特性曲线, 如图 2 所示。



(a) 矩形窗



(b) Bartlett 窗

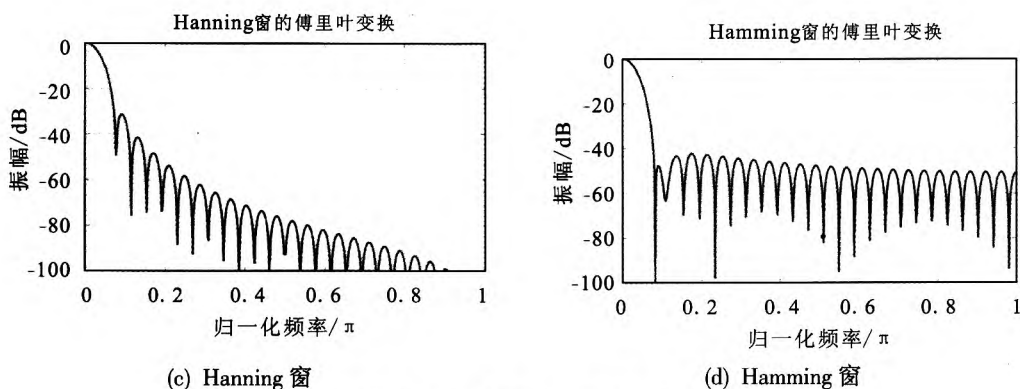


图 2 不同窗函数的幅频特性

Fig. 2 Amplitude frequency characteristics of different window functions

理想的最佳分析窗函数应具有最窄的主瓣宽度、最小的旁瓣峰值和最大的衰减速度, 在对振动信号处理时需选择最合适的分析窗函数。可以看出各种窗函数都具有明显的主瓣和旁瓣, 矩形窗具有最窄的主瓣宽度, 但也有最大的旁瓣峰值, 第一旁瓣衰减为-13 dB, 也具有最慢的旁瓣峰值衰减速度, 矩形窗存在的边界效应会造成频谱泄露, 大大影响其分析性能; Bartlett 窗主瓣宽度较宽, 旁瓣峰值也较大, 衰减速度较慢; Hanning 窗又称升余弦窗, 主瓣宽于矩形窗, 频率分辨率下降, 但旁瓣则显著降低, 可有效减少频谱泄露; Hamming 窗又称改进的升余弦窗, 主瓣宽于矩形窗但优于 Hanning 窗, 有较好的频率分辨率和较小的过渡带。Hamming 窗与 Hanning 窗都是余弦窗, 只是加权系数不同。Hamming 窗的加权系数能使第一旁瓣衰减为-42 dB, 具有较小的旁瓣峰值和较大的旁瓣峰值衰减速度, 但比 Hanning 窗衰减速度慢。综合对比分析, Hamming 窗性能更加优异。在进行短时傅里叶变换时, Hamming 窗大大减少了频谱泄露, 具有良好的分析性能。

2 抗混叠低通滤波及抽取在信号分析中的作用

以某型发动机涡轮泵试车振动信号为例, 研究抗混叠低通滤波、抽取在信号分析中的作用, 以及该时频谱分析方法与 DASP 软件相比较的优势。

方法 1, 不进行抗混叠低通滤波, 对原始信

号直接进行降采样, 以 5 kHz 采样频率重新输出, 再利用 DASP 分析得到的 0~2 000 Hz 时频谱图, 如图 3 所示。由于直接降低采样频率, 造成严重的频率混叠, 高频信号混叠为低频信号, 而低频区的真实频率却丢失, 信号严重失真。

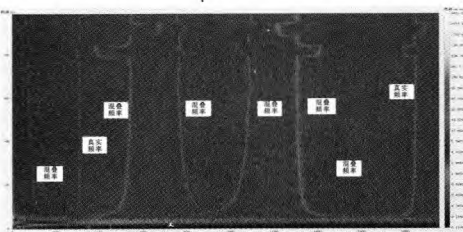


图 3 方法 1 涡轮泵径向信号时频谱图(DASP 软件)

Fig. 3 Turbopump radial signal time spectrum obtained by Method 1 (with DASP software)

方法 2, 由于 DASP 软件无法实现抽样功能, 因此信号按原采样频率 50 kHz 进行分析, 经 DASP 处理后的 0~2 000 Hz 频谱图如图 4 所示。可以看出, 300 Hz 及 1 800 Hz 频率清晰可见, 此时信号各频率无混叠无失真, 频率准确。

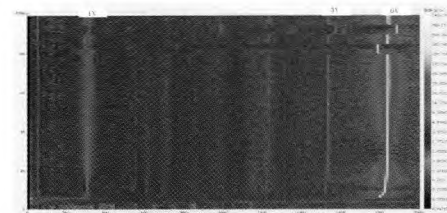


图 4 方法 2 涡轮泵径向信号时频谱图(DASP 软件)

Fig. 4 Turbopump radial signal time spectrum obtained by Method 2 (with DASP software)

方法3, 信号经过 Matlab 程序经过抗混叠滤波及抽取, 采样频率由 50 kHz 变为 5 kHz, 再进行短时傅里叶变换, 0~2 000 Hz 的时频谱如图 5 所示。可看出, 与 DASP 处理结果相比, 频率更加清晰, 频率分辨率精度更高, 且信号未发生混叠, 无失真。该方法频率分辨率为 1.2 Hz, 与 DASP 的频率分辨率 12.2 Hz 相比, 该方法极大提高了频率的辨识度。

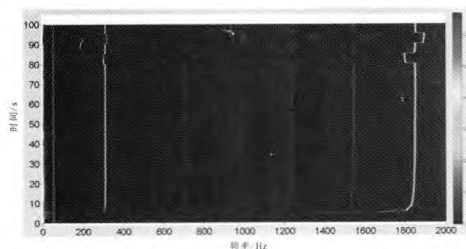


图5 方法3涡轮泵径向信号时频谱图(Matlab 程序)

Fig. 5 Turbopump radial signal time spectrum got by Method 3 (with Matlab program)

因此, 为了不失真的得到低频区的振动信号时频谱图, 原始信号必须进行抗混叠低通滤波处理, 经过信号抽取后, 再进行短时傅里叶分析才能保证振动信号处理的正确性。

3 该方法在涡轮泵故障频率识别中的应用

某型发动机试车后进行数据分析, 通过对涡轮泵所有压力及温度数据分析, 参数均未发现有任何异常; 采用 DASP 对涡轮泵轴向振动数据进行分析时, 发现异常频率, 如图 6 所示。为了更清晰辨别信号中的异常频率, 采用文中方法对涡轮泵轴向振动信号进行分析。为便于比较, 选取频带范围为 1 000~2 000 Hz, 与 DASP 时频谱图横坐标频率值保持一致, 结果如图 7 所示。

图 6 中, DASP 处理该数据时所能达到的最高频率分辨率为 12.2 Hz, 可以看到涡轮泵六倍频 1 800 Hz 的频率较为清晰; 在 1 550 Hz 及 1 250 Hz 左右存在一条下降的频率, 但频率细节无法显示; 而 1 550 Hz 左右的频率重叠在一起, 无法分辨, 这是由于 DASP 频率分辨率精度较低, 无法将邻近的频率有效分开所致。

图 7 中, 1 800 Hz 频率清晰可见, 且附近存在斜向下频率; 1 500 Hz 附近存在 4 条频率, 其中一条频率斜向下方, 频率越来越低; 1 200 Hz 左右也存在一条频率越来越低的异常频率, 这三条斜向下方的异常频率较为清晰。而这在 DASP 结果中无法清晰显示或者无法显示。

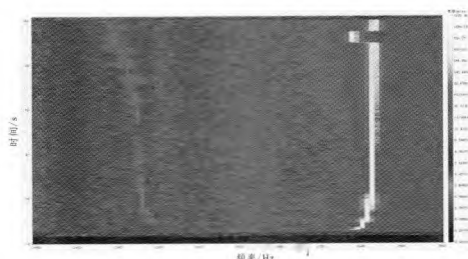


图6 某发动机涡轮泵轴向信号低频区 1 000~2 000Hz 时频谱图(DASP 软件)

Fig. 6 Time spectrum in low frequency region (1 000~2 000 Hz) of turbopump axial signal of some engine (got by DASP software)

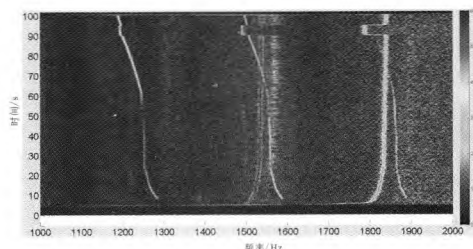


图7 某发动机涡轮泵轴向信号低频区 1 000~2 000 Hz 时频谱图(Matlab 程序)

Fig. 7 Time spectrum in low frequency region (1 000~2 000 Hz) of turbopump axial signal of some engine (got by Matlab program)

通过 Matlab 的时频谱图分析, 结合涡轮泵已有的振动信号时频谱图数据库, 根据以往研制经验, 推断涡轮泵涡轮盘很可能发生了裂纹故障。对涡轮泵下台后经分解检查, 发现涡轮盘音叉处产生周向裂纹, 裂纹占盘面的五分之四左右, 部分裂纹深度达 10 mm, 贯穿盘面, 如图 8 所示。

通过 Matlab 程序的时频谱图分析, 已经有效识别出两次涡轮盘裂纹故障, 为故障定位和产品改进提供了可靠依据。



图 8 某型发动机涡轮泵涡轮盘裂纹形貌(荧光检查状态下)

Fig. 8 Crack morphology on turbine disc of turbopump in some engine

4 结论

采用基于抗混叠低通滤波、信号抽取及短时傅里叶变换相结合的时频谱信号处理方法,有效解决了 DASP 软件频率分辨率低导致频率辨识度差的问题,并得到以下结论:

1) 以 8 阶切比雪夫 I 型原型滤波器构造的 IIR 适用于涡轮泵振动信号的抗混叠低通滤波,可实现良好的低通滤波效果。

2) Hamming 窗主瓣窄,能量集中,旁瓣峰值小,衰减速度快,可有效减少泄漏,是良好的振动信号分析窗函数。

3) 振动信号经该方法分析后,可有效避免频率混叠现象,且频率分辨率精度由 12.2 Hz 提高至 1.2 Hz,精度提高约 10 倍,该方法对异常及微弱频率可实现有效辨识。

4) 该方法分析频段广,通用性强,可推广应用到各型号产品的振动信号分析、健康监测及故障诊断系统中。

参考文献:

- [1] 许勇, 欧勇鹏, 董文才. 基于低通滤波和经验模态分解的舰船耐波性试验信号分析方法研究[J]. 船舶力学, 2009 (5): 47-51.
- [2] 柴晓东, 袁晓. 数字信号抽取与插值不同次序的频域分析[J]. 通信技术, 2009 (2): 47-49.

- [3] 胡振邦, 许睦旬, 姜歌东, 等. 基于小波降噪和短时傅里叶变换的主轴突加不平衡非平稳信号分析[J]. 振动与冲击, 2014 (5): 1-3.
- [4] 张新军. 低通和带通信号采样的频谱混叠分析[J]. 上海交通大学学报, 2002, (36)6: 745-747.
- [5] 谢黎明, 郑锐. 基于 Matlab 的 IIR 数字滤波器设计[J]. 机械与电子[J]. 2011 (1): 28-30.
- [6] 顾家柳, 郑大平, 张元周, 等. 航空发动机设计手册第十九分册转子动力学[M]. 北京: 航空工业出版社, 2000.
- [7] 黄智勇, 胡钟兵, 李惠敏. 大功率、高转速、高扬程涡轮泵振动分析与减振研究[J]. 火箭推进, 2005, 31(6): 1-6.
HUANG Zhiyong, HU Zhongbing, LI Huimin. Analysis of vibration and vibration reduction for turbopumps with high-power, high-rotation speed and high-delivery-head [J]. Journal of rocket propulsion, 2005, 31(6): 1-6.
- [8] 李国鸿, 李飞行. STFT 在航空发动机振动信号处理中的应用[J]. 测控技术, 2013(4): 45-49.
- [9] 王亚波, 沈林, 柳征勇. 短时傅里叶变换在火箭遥测数据处理中的应用[J]. 数据采集与处理, 2012(27): 163-166.
- [10] 杨懿, 李薇. 液体火箭发动机启动段振动信号的小波去噪[J]. 火箭推进, 2012, 38(5): 77-80.
YANG Yi, LI Wei. Wavelet transform based denoising of vibration signal generated in ignition shock section of liquid rocket engine[J]. Journal of rocket propulsion, 2012, 38(5): 77-80.
- [11] 夏松波, 姜兴渭, 徐世昌. 振动与冲击手册, 第三卷: 工程应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2003.

(编辑: 王建喜)