# 基于短时傅里叶变换的飞行器故障振动信号分析

黄梦宏[1]，朱令娴[2]，张志勇[1]，韩敬永[1]，刘博[1]
（1.中国运载火箭技术研究院，北京 100076；2.中国航天科工二院706所，北京 100854）

**摘要：目的** 对某飞行器出现故障时的振动信号进行分析，为故障定位提供依据。**方法** 将短时傅里叶变换方法应用于飞行振动信号分析，通过计算故障振动信号和正常振动信号的短时傅立叶变换谱，获取两者之间的不同时频特征。通过分析包括发动机工作、外部气动激励、设备工作、电气干扰在内的各种影响因素的时频变化特征，与故障振动信号的时频特征对比，为故障定位提供依据。**结果** 故障振动信号的时频特征表现为飞行中期突发出现的某一频率的倍频振动响应，且振动频率随时间增加逐渐增大，分析表明只有发动机异常工作才具有此特征。**结论** 短时傅里叶变换可以有效地获取飞行振动信号的时频特征，可以更深入地了解不同振动影响因素的时频特征，为飞行故障定位分析提供了新途径。

**关键词：**短时傅里叶变换；振动信号；故障分析
**中图分类号：**TB112　**文献标识码：**A　**文章编号：**1672-9242(2021)02-0062-04
**DOI：**10.7643/ issn.1672-9242.2021.02.011

## Fault Vibration Signal Analysis of Air Vehicle Flying Based on STFT

*HUANG Meng-hong*[1], *ZHU Ling-xian*[2], *ZHANG Zhi-yong*[1], *HAN Jing-yong*[1], *LIU Bo*[1]
(1. China Academy of Launch Vehicle Technology, Beijing 100076, China;
2. Institute 706, Second Academy of China Aerospace Science and Industry Corporation, Beijing 100854, China)

**ABSTRACT:** This paper analyzes the vibration signal of an aircraft in case of fault, and provides the basis for fault location. The STFT (Short Time Fourier Transform) method is applied to the analysis of flight vibration signals. By calculating the STFT spectrum of fault vibration signals and normal vibration signals, the different time-frequency characteristics between them are obtained. By analyzing the time-frequency characteristics of various influencing factors including engine operation, external pneumatic excitation, equipment operation and electrical interference, and comparing with the time-frequency characteristics of fault vibration signals, the basis for fault location is provided. The time-frequency characteristic of the fault vibration signal is the frequency doubled vibration response of a sudden frequency in the middle of flight, and the vibration frequency increases gradually with the increase of time. The analysis shows that only the abnormal operation of the engine has this characteristic. STFT can effectively obtain the time-frequency characteristics of flight vibration signals, and can better understand the time-frequency characteristics of different vibration influencing factors, which provides a new way for flight fault location analysis.

**KEY WORDS:** STFT; vibration signal; fault analysis

**收稿日期：**2020-10-31；**修订日期：**2020-11-18
**Received：**2020-10-31；**Revised：**2020-11-18
**作者简介：**黄梦宏（1978—），男，博士，高级工程师，主要研究方向为导弹总体设计。
**Biography：**HUANG Meng-hong (1978—), Male, Doctor, Senior engineer, Research focus: missile overall design.
**引文格式：**黄梦宏，朱令娴，张志勇，等. 基于短时傅里叶变换的飞行器故障振动信号分析[J]. 装备环境工程, 2021, 18(2): 062-065.
HUANG Meng-hong, ZHU Ling-xian, ZHANG Zhi-yong, et al. Fault vibration signal analysis of air vehicle flying based on STFT[J]. Equipment environmental engineering, 2021, 18(2): 062-065

振动信号是飞行器飞行时的主要测量参数之一，主要用于检验飞行环境是否满足事先给定的环境试验条件要求，以及辨识飞行器的固有特性。在飞行器振动分析领域，一般采用基于傅里叶变换的加速度功率谱密度对振动信号进行分析，由于揭示了振动信号的频域特征，因此这种方法在国内外标准（如 GJB 150.16A 和 MIL-STD-810F）中被广泛采用。但是这种方法存在一个无法避免的缺陷，就是只能给出一段信号整体的频域特征，而缺少时域定位功能，即对信号的表征要么完全在时域内，要么完全在频域内。对于平稳信号，由于信号的频域特征不随时间变化，因而功率谱方法可以很好地对其进行描述和分析。但是实际工作中测量到的振动信号，往往都是时变的或非平稳的，在这种情况下，只了解信号在时域或频域的特征是远远不够的，必须了解信号频谱随时间变化规律才能完整地掌握信号的特征。

为了解决上述问题，在处理时变或非平稳振动信号时必须采用时频分析方法。这种方法的基本思想是设计时间和频率的联合函数，用它同时描述信号在不同时间和频率的能量密度或强度。由于它能反映信号频率随时间变化的情况，因此非常适合处理非平稳信号。时频分析方法有很多种，如短时傅里叶变换（STFT）、Gabor 展开、Wigner-Ville 分布、小波分析和 Hilbert-Huang 变换等，其中短时傅里叶变换由于简单、易用，在国内外各工程领域得到了广泛应用[1-10]。

飞行过程中，飞行器上的振动信号是很复杂的，包括了气动噪声、发动机声腔振动和不稳定燃烧[11-12]等各种振动激励因素。其中气动噪声取决于飞行过程中不断变化的飞行姿态、动压等因素，发动机声腔振动和不稳定燃烧频率取决于随时间变化的发动机燃烧室声场特性。这些激励因素都是时变的，并且随着发动机工作，燃料不断减少，飞行器的固有特性也随时间发生变化，因此飞行过程中飞行器上的振动信号必然具有明显的非平稳特征。

当飞行器出现故障，其上振动信号的时频特性较正常飞行通常出现较为显著的变化，这为故障分析提供了一种新途径。文中基于短时傅里叶变换，对某飞行器飞行故障振动信号进行分析，通过对比正常振动信号和故障振动信号的时频特征，分析引起振动时频特性变化的各种因素，为飞行器故障分析提供依据。

## 1　短时傅里叶变换

短时傅里叶变换（STFT）又称为加窗傅里叶变换，是非平稳信号分析中使用最广泛的方法之一。这种方法将非平稳信号看作是由一系列短时平稳性信号构成，短时性通过在时域加窗来实现，通过平移参数来覆盖信号的整个时域。短时傅里叶变化采用一个窗函数与待分析的非平稳信号作乘积，实现窗口中心附近的开窗和平移，然后再进行傅里叶变换。

对于给定的非平稳信号 $s(t)$，令 $h(t)$是一个时间宽度很短的窗函数，它沿时间轴滑动，信号 $s(t)$的短时傅里叶变换定义为：

$$S(t,\omega)=STFT_s(t,\omega)=\int\left[s(\tau)h^*(\tau-t)\right]\mathrm{e}^{-j\omega\tau}\mathrm{d}\tau \quad (1)$$

式中：*表示复数共轭。

从式（1）可以看出，信号 $s(t)$在时刻 $\tau$ 的短时傅里叶变换，就是信号 $s(t)$与一个以 $\tau$ 为中心的分析窗 $h^*(\tau-t)$作乘积的傅里叶变换，分析窗 $h^*(\tau-t)$将信号 $s(t)$在窗外的部分进行了有效的抑制，因此短时傅里叶变换是 $s(t)$在分析时刻 $\tau$ 附近的局部谱，如图 1 所示。当分析窗函数 $h(t)=1$，$\forall t$，即分析窗为全局的矩形窗时，短时傅里叶变换还原成传统傅里叶变换。

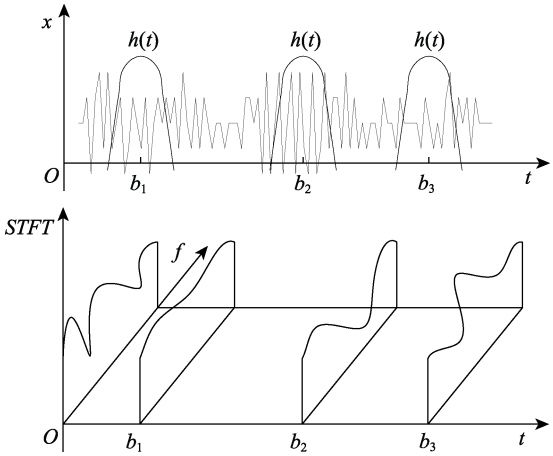


图 1　短时傅里叶变换示意

Fig.1 STFT schematic diagram

在应用短时傅里叶变换对信号进行分析时，通常希望分析结果的时域和频域分辨率越高越好。但不确定原理表明，时域分辨率和频域分辨率不能同时任意地窄[13]，即时域和频域分辨率不能同时减小，其一方的减小必引起另一方的增大。因此对于给定信号，如何选择窗函数 $h(t)$应视信号的频率特性而定。一般而言，对于高频信号，希望要有好的时间分辨率，以观察信号的高频部分（如冲击、尖脉冲等），即窗函数 $h(t)$的时间宽度要小，此时对应的频率分辨率自然要下降。同理对于低频信号，则应降低其时间分辨率，以便在低频处获得较好的频率分辨率。此外，时间窗宽度的选取应确保在时间窗内的信号是局部平稳的，这是采用短时傅里叶变换处理实际信号的一个重要原则。

## 2　飞行器振动信号的短时傅里叶变换分析

以某飞行器飞行时的振动信号为研究对象，振动传感器安装于飞行器内壁，测量从飞行器起飞至发动机关机的振动数据。通常进行振动信号分析时，从测量信号中选取一段振动量级较大且近似平稳的数据

作为分析样本。分析前采用滤波或消除趋势项等方法减少或消除信号中的长周期趋势项或高频噪声，使信号尽可能接近其真实值。两次飞行试验飞行器内壁同一位置的测量数据如图 2 所示，无论是否出现飞行故障，振动量级随时间均明显发生变化，振动信号具有明显的非平稳特性。从振动信号中可见，飞行器飞行中的各种物理现象，如发动机点火时的冲击，振动量级随飞行动压的变化规律等。此外，飞行器出现故障后的振动信号和正常飞行时的振动信号明显不同。正常振动信号在发动机点火之后，振动量级随时间先增大后减小，符合振动量级随动压变化的规律；但出现故障时的振动信号，在某个时刻点振动量级突然剧烈增大，没有反映出振动量级随动压变化的规律，与正常飞行时的振动信号差异较大。

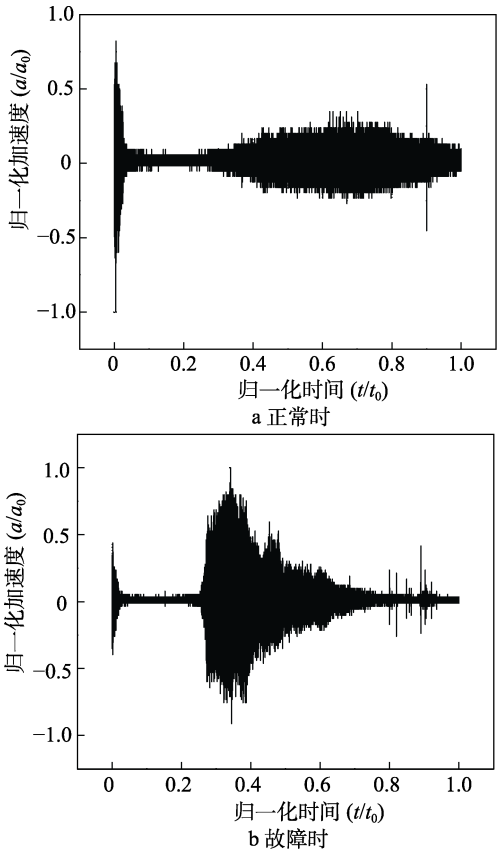


图 2　飞行振动信号

Fig.2 Flight vibration signal: a) normal; b) in case of fault

## 2.1　短时傅里叶变换分析

在时间窗内信号平稳的原则下，对飞行振动信号时间历程进行了分析，确定了进行短时傅里叶变换的时间窗宽度以及对应的频率分辨率。故障振动信号和正常振动信号短时傅里叶变换谱如图 3 所示。正常振动信号表现的特征为飞行初期飞行器受外激励较小，各频段响应均较小；飞行中后期飞行器受外激励为高频段的宽频激励，各频段内的响应相差不大。故障振动信号在飞行初期的表现与正常振动信号相同，但在飞行中期出现某一频率及其倍频的突出响应，且这些响应的频率随时间逐渐增大，飞行后期这些倍频响应逐渐消失。可见飞行故障振动信号与正常振动信号主要不同在于飞行中期出现某一频率及其倍频的突出响应。

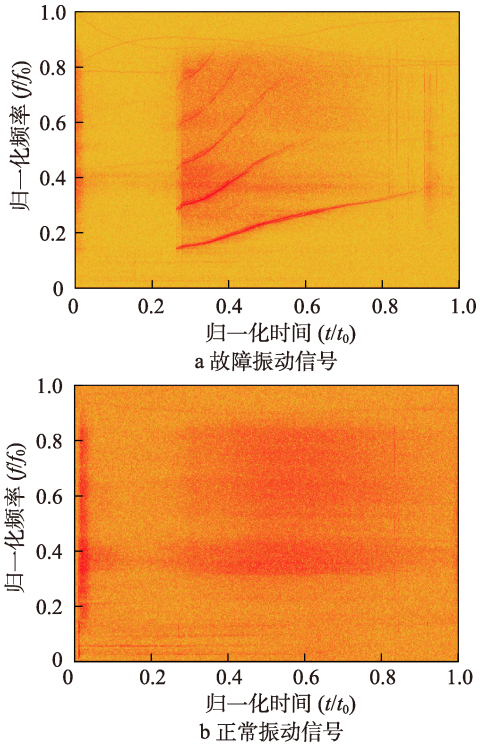


图 3　短时傅里叶谱

Fig.3 STFT spectrum: a) fault vibration signal; b) normal vibration signal

根据故障振动信号的时频特征，结合可能引起这些特征的因素进行分析，可以对故障分析提供依据。由于振动传感器测量到的信号主要受三方面影响：一是各种激励，如气动噪声、发动机异常工作；二是飞行器固有特性；三是飞行器内设备工作或者电干扰。根据试验和计算获得的飞行过程中飞行器三方向的固有频率变化范围可以排除固有特性的影响。另一方面，由于气动噪声为高频段宽频激励，激励能量不会集中在某一频率及其倍频上，可以排除气动噪声的影响。此外，考虑到设备工作或者电干扰引起的频率在飞行器飞行中不会改变，可以排除设备工作或者电干扰引起故障信号时频特征的可能性。因此，在可能引起故障振动信号各种因素中，只有发动机异常工作因素不能排除，这一结论为故障定位提供了依据。

## 2.2　STFT 与传统加速度功率谱对比分析

对飞行故障振动信号全程进行的加速度功率谱计算，结果如图 4 所示。对比图 3a 可见，采用加速度功率谱可以分析得到飞行中期出现的突出频率，这与短时傅里叶变化的结果一致。但加速度功率谱给不出上述频率成分的出现时间，以及随时间变化的关系，因此难以对故障定位提供支撑。

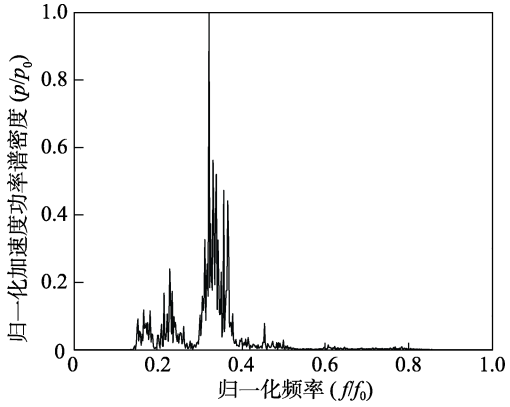


图 4　故障振动信号加速度功率谱

Fig.4 Acceleration power spectrum of fault vibration signal

## 3　结语

飞行器飞行振动信号具有明显的非平稳特征，尤其是出现飞行故障时，其上振动信号的时频特性较正常飞行通常出现较为显著的变化，采用传统的基于傅里叶变换的加速度功率谱密度分析方法难以给出信号的完整特征。文中采用短时傅里叶变换方法对某飞行器出现故障时的振动信号进行了分析，克服了传统分析方法不能给出振动信号频率随时间变化关系的不足，给出了故障振动信号时频特征，为飞行故障分析提供了新途径。

**参考文献：**

[1] 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, 33(5): 20-23.
HU Zhen-bang, XU Mu-xun, JIANG Ge-dong, et al. Analysis of non-stationary signal of a sudden unbalanced spindle based on wavelet noise reduction and short-time Fourier transformation[J]. Journal of vibration and shock, 2014, 33(5): 20-23.

[2] 冀翔, 夏洁. 基于短时傅里叶变换的飞控纵向频域等效拟配[J]. 北京航空航天大学学报, 2011, 37(7): 872-876.
JI Xiang, XIA Jie. Longitudinal frequency-domain equivalent matching method for flight control system based on short time Fourier transform[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2011, 37(7): 872-876.

[3] 周浩, 袁志勇. 基于短时傅里叶变换的鱼雷自导信号参数实时估计及应用[J]. 武汉理工大学学报, 2009,33(6): 1120-1123.
ZHOU Hao, YUAN Zhi-yong. Real-time parameter estimation of torpedo homing signal based on STFT and its application[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2009, 33(6): 1120-1123.

[4] 牛德智, 陈长兴, 陈婷, 等. 基于短时傅里叶变换的 Duffing 振子微弱信号检测[J]. 航空学报, 2015, 36(10): 3418-3429.
NIU De-zhi, CHEN Chang-xing, CHEN Ting, et al. Weak signal detection with Duffing oscillator based on short time Fourier transform[J]. Acta aeronautica ET astronautica sinica, 2015, 36(10): 3418-3429.

[5] 刘世官, 王勤, 杨学广. 短时傅里叶变换在压气机气动失稳分析中的应用[J]. 航空发动机, 2003, 29(2): 8-10.
LIU Shi-guan, WANG Qin, YANG Xue-guang. Application of short time fourier transform to LP compressor aerodynamic unstability analysis[J]. Aeroengine, 2003, 29(2): 8-10.

[6] 史林, 鞠峰, 胡文华, 等. 基于短时傅里叶变换的高射速火炮弹丸出膛时刻测试方法[J]. 火炮发射与控制学报, 2014, 35(2): 35-39.
SHI Lin, JU Feng, HU Wen-hua, et al. A test method based on STFT about high firing rate gun projectile at moment of projectile muzzle-leaving[J]. Gun launch & control journal, 2014, 35(2): 35-39.

[7] 张建海, 韩迎春, 曾艳艳, 等. 时频分析方法及其在火箭振动数据分析中的应用[J]. 四川兵工学报, 2015, 36(11): 86-90.
ZHANG Jian-hai, HAN Ying-chun, ZENG Yan-yan, et al. Time-frequency analysis application on rocket vibration data[J]. Journal of Sichuan Ordnance, 2015, 36(11): 86-90.

[8] 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(增刊): 163-166.
WANG Ya-bo, SHEN Lin, LIU Zheng-yong. Application of STFT to telemetry data processing of launch vehicles[J]. Journal of data acquisition & processing, 2012, 27(S1): 163-166.

[9] ASTRID Rother, MOHIEDDINE Jelali, DIRK Söffker. A brief review and a first application of time-frequency-based analysis methods for monitoring of strip rolling mills[J]. Journal of process control, 2015, 35: 65-79.

[10] JOSEPH D N, CHOKANI N. Identification of nonlinear interactions in hypersonic boundary layers using STFT[C]// 39th Aerospace sciences meeting and exhibit. Reno, N V: AIAA, 2001.

[11] 王宁飞, 张峤, 李军伟, 等. 固体火箭发动机不稳定燃烧研究进展[J]. 航空动力学报, 2011, 26(6): 1405-1413.
WANG Ning-fei, ZHANG Qiao, LI Jun-wei, et al. Progress of investigation on combustion instability of solid rocket motors[J]. Journal of aerospace power, 2011, 26(6): 1405-1413.

[12] 陈晓龙, 何国强, 刘佩进, 等. 固体火箭发动机燃烧不稳定性的影响因素分析和最新研究进展[J]. 固体火箭技术, 2009, 32(6): 600-605.
CHEN Xiao-long, HE Guo-qiang, LIU Pei-jin, et al. Analysis of influencing factors of combustion instability in SRM and current progress[J]. Journal of solid rocket technology, 2009, 32(6): 600-605.

[13] 秦树人, 李忠, 尹爱军. 工程信号处理[M]. 北京: 高等教育出版社, 2008: 281-292.
QIN Shu-ren, LI Zhong, YIN Ai-jun. Engineering signal processing[M]. Beijing: Higher Education Press, 2008: 281-292.