

# 基于阶次分析的无人机挂飞振动正弦分量幅值准确提取技术

高 鹏<sup>1</sup>, 卫 炜<sup>1,2</sup>, 刘 曦<sup>1</sup>, 巩祥瑞<sup>1</sup>, 封 雷<sup>1</sup>

(1. 西安现代控制技术研究所, 西安, 710065; 2. 西安电子科技大学机电工程学院, 西安, 710071)

**摘要** 传统的快速傅里叶变换分析装备在变转速工况下的振动信号出现“频率模糊”现象, 针对此问题提出一种无键相阶次分析方法。首先通过控制系统或其它途径预估转速变化范围, 确定窄带滤波频带; 然后对信号进行窄带滤波; 之后利用 Hilbert 变换计算滤波后信号的瞬时频率; 最后根据瞬时频率对信号进行重采样得到角度域平稳信号, 对角度域信号傅里叶变换得到阶次谱。通过信号仿真验证了该阶次分析方法有效、准确, 并应用到装备在无人机的挂飞振动信号分析中, 用于准确提取变转速工况下振动信号中正弦分量的幅值, 为准确制定装备的振动环境试验条件奠定基础。该方法是对阶次分析方法的有效补充, 对于相似装备的动力学环境试验条件制定也具有参考和借鉴价值。

**关键词** 无人机; 挂飞振动; 正弦分量; 阶次分析

**DOI** 10.3969/j.issn.1009-3516.2020.02.005

中图分类号 V216 文献标志码 A 文章编号 1009-3516(2020)02-0036-05

## Accurate Amplitude Extraction Technique for the Sine Component of UAV Flying Signal Based on Order Analysis

GAO Peng<sup>1</sup>, WEI Wei<sup>1,2</sup>, LIU Xi<sup>1</sup>, GONG Xiangrui<sup>1</sup>, FENG Lei<sup>1</sup>

(1. Xi'an Modern Control Technology Research Institute, Xi'an 710065, China;  
2. School of Mechanical Electrical Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China)

**Abstract** In order to overcome the “frequency ambiguity” phenomenon by using the traditional Fast Fourier Transform to analyze signals of equipment under the condition of varying rotating speed, this paper presents an order analysis method without phase signal. Firstly, the variation range of rotation speed is estimated by equipment control system or other ways to confirm the filter range; secondly, narrow band filtering is filtered off from the signals; Thirdly, the instantaneous frequency is calculated by Hilbert Transform; Finally, the stationary signal in angular domain is obtained by re-sampling the time-domain signal according to instantaneous frequency, and then the order spectrum is made by Fast Fourier Transform. The validity and accuracy of the order analysis method are verified by the simulation signal. Then, the method used to extract the amplitude of sinusoidal component of signal under variable rotating speed condition is applied in analyzing equipment signals in UAV, laying a foundation for accurately setting up the environment condition of equipment. The method in this paper is an effective supplement to the signal order

收稿日期: 2019-08-27

作者简介: 高 鹏(1993—), 男, 新疆博乐人, 工程师, 硕士, 主要从事装备环境工程研究。E-mail: gaopeng\_xjtu@163.com

**引用格式:** 高鹏, 卫炜, 刘曦, 等. 基于阶次分析的无人机挂飞振动正弦分量幅值准确提取技术[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2020, 21(2): 36-40. GAO Peng, WEI Wei, LIU Xi, et al. Accurate Amplitude Extraction Technique for the Sine Component of UAV Flying signal Based on Order Analysis[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2020, 21(2): 36-40.

analysis, and its application has reference value for the evaluation of dynamic environment of similar equipment.

**Key words** UAV; captive flight vibration; sine component; order analysis

旋翼无人机上挂载装备振动特点为宽带背景上叠加单频尖峰<sup>[1]</sup>,其中单频尖峰主要是由机械或部件旋转产生的正弦波,宽带背景主要为低量级的气动噪声。在挂载装备承受的振动环境中,正弦分量为振动信号的主要成分,因此准确提取正弦分量信号对估计挂载装备的振动环境至关重要。通常提取信号中周期性分量信号的方法为傅里叶分析,它能揭示信号的频率和能量分布,但只适用于平稳信号的分析。对于采用变转速控制的无人机,振动信号中的正弦分量信号频率不断变化,属于典型的非平稳信号。若对此信号直接进行傅里叶分析,会产生频率模糊现象,难以准确识别正弦分量幅值,依据此分析结果制定的环境试验谱不能真实反映设备承受的振动环境。

阶次分析技术通过等角度采样将时域的非平稳信号转换为角度域的平稳信号,消除了转速变化的影响,可准确提取信号中各阶次分量的真实幅值<sup>[2-3]</sup>。阶次分析方法可根据采样方式分为硬件阶次分析、计算阶次分析和无键相阶次分析方法<sup>[4-6]</sup>,其中无键相阶次分析方法不受硬件的制约,是目前应用较广泛的方法。无键相阶次分析方法的核心是从振动信号中获取转速信息,许多学者对此展开了研究<sup>[9-14]</sup>,目前还存在部分问题:基于短时傅里叶变换(Short-Time Fourier Transform, STFT)的时频分析方法中,时间分辨率和频率分辨率不能根据信号本身的时频特性作自适应调节,并且提取瞬时幅值及相位会损失瞬变信息;基于EMD分解的单分量信号存在模态混淆和端点效应等问题。

本文根据变转速工况下无人机挂飞振动信号的特点,提出一种瞬时频率估计算法,实现了快转速波动工况下振动信号的无键相阶次分析。将该阶次方法应用于变转速工况下无人机挂飞振动的振动信号分析,准确提取正弦分量的幅值,为准确制定装备的环境试验条件奠定了基础。

## 1 基于瞬时频率估计的阶次分析方法

### 1.1 阶次的定义

对于旋转机械,阶次定义为参考轴旋转一圈循环振动的次数,可表示成:

$$O = \text{循环振动次数}/\text{转} \quad (1)$$

式中: $O$  为阶次。

某一瞬时振动的阶次与频率的关系可定义为:

$$O = \frac{60f}{n} \quad (2)$$

式中: $f$  为阶次;  $n$  为参考轴当前转速。

### 1.2 瞬时频率估计算法

获取瞬时频率是阶次分析的关键,传统的阶次分析方法中等角度采样所需的瞬时频率由专门的转速测量装置提供。本文提出一种瞬时频率估计算法,无需额外增加转速测量装置,方法简单易行、便于操作。

对于采用变转速控制的无人机,装备的挂飞振动信号主要由旋翼转动引起,主要的频率成分是旋翼的转频。旋翼转速变化范围有限,但瞬时转速变化快。根据振动信号的特点,本文采用零相位带通滤波结合 Hilbert 变换的方法估计信号的瞬时频率。具体分为以下 2 个步骤:

**步骤 1** 信号滤波。根据无人机的旋翼转速变化范围确定滤波范围,滤波器的通带设置为  $[0.9f_{\min}, 1.1f_{\max}]$ ,对信号进行零相位滤波。其中  $f_{\min}$  与  $f_{\max}$  分别是直升机旋翼转频波动范围的最小值和最大值。

**步骤 2** 基于 Hilbert 变换,求信号的瞬时频率。其实现原理如下:

设某信号表示为:

$$x(t) = a(t) \cos(\varphi(t)) \quad (3)$$

式中: $a(t)$  为信号幅值;  $\varphi(t)$  为信号相位。

通过 Hilbert 变换,可得到  $x(t)$  的共轭信号,共轭信号  $\bar{x}(t)$  为:

$$\bar{x}(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{x(\tau)}{t - \tau} d\tau = a(t) \sin t \quad (4)$$

由原始信号及其共轭信号可得解析信号  $z(t)$ :

$$z(t) = x(t) + j \bar{x}(t) = a(t) e^{j\varphi(t)} \quad (5)$$

根据瞬时频率的定义:

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\varphi(t)}{dt} \quad (6)$$

根据式(5)和式(6)可得:

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d}{dt} \arg z(t) \quad (7)$$

式中: $\arg$  是求解析信号  $z(t)$  幅角的运算符。

### 1.3 阶次分析

阶次分析的实质是通过等角度采样的方法将非平稳的等时间间隔采样信号转化为角度域平稳信号,然后对角度域信号做快速傅里叶变换得到阶

次谱。

等角度重采样参考时刻与分析阶次有以下关系:

$$2\pi \int_{t_0}^{T_n} f(t) dt = n \frac{\pi}{O_{\max}} \quad (8)$$

式中: $T_n$  表示第  $n$  个重采样点对应的时刻; $O_{\max}$  为最大分析阶次。

依据重采样的时刻,通过插值实现对原始信号的重采样。本文使用拉格朗日线性插值法对原始信号进行重采样:

$$y(T_n) = x(t_i) + \frac{x(t_{i+1}) - x(t_i)}{t_{i+1} - t_i} (T_n - t_i) \quad (9)$$

式中: $y$  为等角度重采样之后的信号; $x$  为原信号; $t_i$  为第  $i$  个采样点对应的时刻。

对等角度重采样之后的信号进行快速傅里叶之后可得到阶次谱,对于离散信号有:

$$Y(k) = \sum_{n=1}^N y(T_n) e^{-j2\pi \frac{n}{N} k} \quad (10)$$

式中: $Y(k)$  为离散阶次序列。

本文实现阶次分析的过程包含以下几个主要步骤:①测试人员确定转速的大致变化范围;②根据滤波频带对振动信号做零相位滤波;③估计瞬时频率,并生成键相时标;④利用键相时标对原信号进行重采样;⑤对重采样信号进行快速傅里叶变换,得到阶次谱。

## 2 仿真分析

对变转速工况下的无人机挂飞振动信号进行仿真:

$$x(t) = \sum_{m=1}^M A_m \cos(2\pi m f(t)t + \varphi_{m_0}) + \omega(t) \quad (11)$$

式中: $m$  为阶次,取值为正整数; $A_m$  为  $m$  阶分量的幅值; $\varphi_{m_0}$  为  $m$  阶分量的初相位; $\omega(t)$  为信号的宽带随机噪声成分。

本文在仿真信号中将转频  $f(t)$  随时间的变化规律设置为:

$$f(t) = \begin{cases} 100, & 0 \leq t < 0.2 \\ 100 + 30(t - 0.2), & 0.2 \leq t < 0.3 \\ 103 - 60(t - 0.3), & 0.3 \leq t < 0.35 \\ 100 + 40(t - 0.35), & 0.35 \leq t < 0.5 \\ 103 - 60(t - 0.5), & 0.5 \leq t < 0.6 \end{cases} \quad (12)$$

转频最大变化速率为 60 Hz/s,对应转轴转速变化率达 3 600 Hz/s, $\omega(t)$  表示服从  $U(-5,5)$  的噪声信号。仿真模型的具体参数设置见表 1。

表 1 仿真模型参数设置

参数	数值
最大阶次 $M$	3
幅值系数 $A_m$	$A_1 = 3, A_2 = 1.5, A_3 = 0.5$
信号时长 $t/s$	0.6
初相位 $\varphi_{m_0}/rad$	$\varphi_{10} = 0, \varphi_{20} = \pi/3, \varphi_{30} = \pi/6$

根据式(11)及表 1 中的参数构造仿真信号时域波形如图 2 所示,若对仿真信号直接进行快速傅里叶变换可以得到频谱见图 3,从图 3 中可以识别相应的频带,但幅值已失真,并且从图中容易将频谱中的窄带误认为是随机信号。

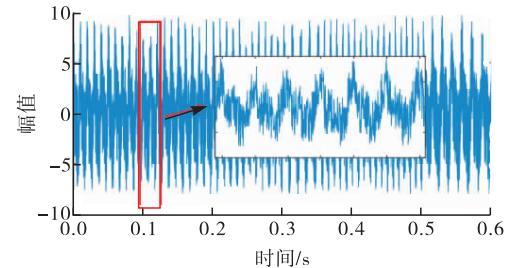


图 2 仿真信号时域波形

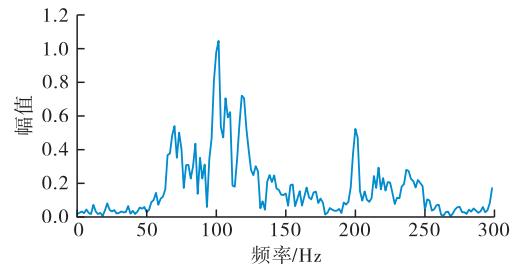


图 3 仿真信号频谱

按照图 1 所示的流程,若已知转频变化范围大约在 100~106 Hz,设置带通滤波的截止频率为 [90 Hz, 117 Hz],对原始信号进行时域的窄带滤波,滤波器系数由 Matlab 中 butter 函数得到。将滤波后的信号代入式(4)、式(5)、式(7)可求得瞬时频率。瞬时频率的计算值与理论值的对比结果如图 4 所示。

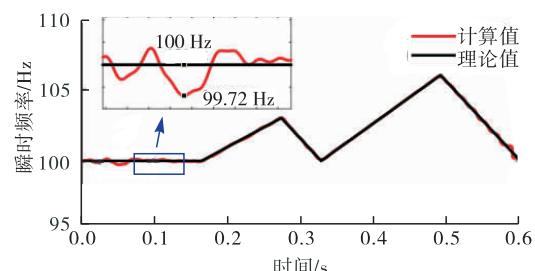


图 4 瞬时频率计算值与理论值的对比

从图中可以观察到瞬时频率的估计值与理论值基本吻合,误差不超过 0.28 Hz。将瞬时频率的计算结果代入式(8)、式(9)进行重采样,将重采样后的

信号代入式(10),可得到仿真信号的阶次谱,见图5,阶次谱中各阶分量的幅值与图5中的幅值系数一致。各阶分量幅值系数的误差见表2,误差最大值为8.7%。

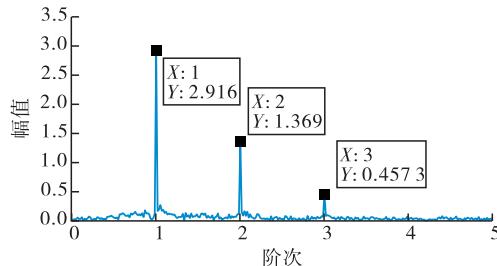


图5 仿真信号阶次谱

表2 仿真信号各阶分量幅值系数误差

阶次	理论值	计算值	相对误差
1	3.000	2.916	2.8%
2	1.500	1.369	8.7%
3	0.500	0.457	8.6%

上述仿真信号分析结果说明本文的瞬时频率估计方法准确,通过阶次分析能准确提取信号中各阶分量的幅值,为工程实例分析奠定了前提基础。

### 3 工程应用

#### 3.1 实验介绍

如图6所示某型装备挂载到某型无人机,振动是其使用过程主要的环境应力,需通过对实测数据的分析制定准确的环境试验条件。本文以装备头部某部件的实测数据为例,装备安装在某型无人机挂架上,传感器安装在装备头部某部件的端面圆心位置。无人机旋翼采用变转速控制,飞行过程中旋翼转速变化的参考范围是3 000~5 000 r/min。

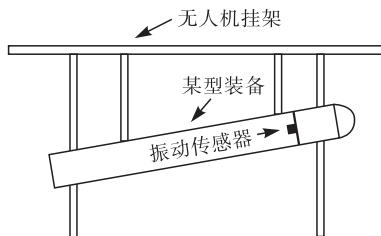


图6 传感器测点位置示意图

#### 3.2 实验数据分析

使用本文的阶次分析方法对变转速工况下无人机挂飞振动数据进行分析。无人机转速变化参考范围对应的转频变化范围是50~78 Hz,阶次分析时设置带通滤波的截止频率为[45 Hz, 86 Hz]。信号的采样频率为10 kHz,采样时长10 s。原始信号时域波形见图7,频谱见图8。从图8可观察到转频对

应的特征频带处出现了“频率模糊”现象,导致无法准确提取信号正弦分量的幅值,根据此结果制定的试验条件不能反映产品经历的真实振动环境。

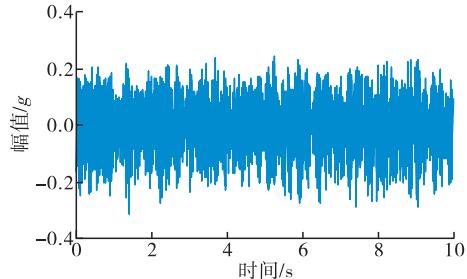


图7 原始信号时域波形

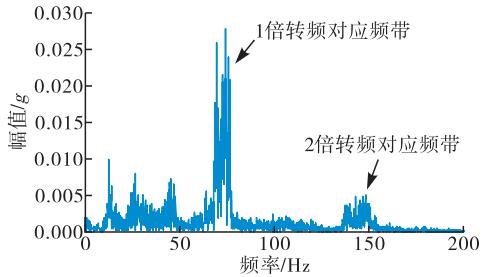


图8 原始信号频谱

利用阶次分析方法对原始信号进行分析。首先对原始信号进行带通滤波并计算瞬时频率,无人机旋翼转频变化曲线如图9所示,图中显示旋翼转频变化范围是68~80 Hz。根据瞬时频率对原始信号进行角度域重采样,对重采样信号进行短时傅里叶变换得到原始信号的阶次谱如图10所示,图中显示阶次分析消除了因转速变化引起频谱中正弦分量幅值失真问题,从而能根据分析结果准确制定挂飞振动试验条件。

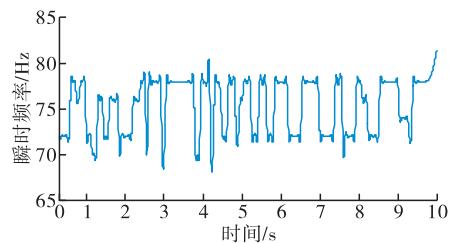


图9 旋翼转频变化

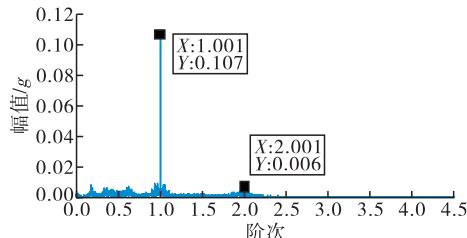


图10 阶次谱

从阶次谱分析结果可知,无人机挂飞振动信号中正弦分量主要由旋翼旋转引起,依据阶次谱分析结果,可得出以下结论:

1) 变转速振动工况下装备的挂飞振动实验室模拟应使用正弦扫频与随机振动结合的方式;  
2) 扫频区间应根据转速波动范围确定;  
3) 扫频正弦分量的量值应根据阶次谱对应阶次的幅值确定。

## 4 结语

本文提出一种基于窄带滤波与 Hilbert 解调的阶次分析方法,首先根据目标的转频变化范围确定滤波频带,然后利用 Hilbert 变换求出目标的瞬时频率变化曲线,根据瞬时频率对信号角度域重采样,最后对重采样信号做快速傅里叶变换得到阶次谱。仿真信号验证本文提出的阶次分析方法能从变转速信号中准确提取正弦分量的幅值。

本文提出的阶次分析方法可应用于无人机变转速工况装备挂飞振动信号分析,结果表明本方法准确有效。

### 参考文献(References):

- [1] 施荣明. GJB150.16A—2009, 军用设备环境试验方法 [S]. 北京: 国防科学技术工业委员会军用标准化中心研究室, 2009.
- [2] 赵晓平, 张令弥, 郭勤涛. 旋转机械阶比跟踪技术研究进展综述[J]. 地震工程与工程振动, 2008, 28(6): 213-219.
- [3] POTTER R. A New Order Tracking Method for Rotating Machinery[J]. Sound and Vibration, 1990, 24(9), 7; 30-34
- [4] 林京, 赵明. 变转速下机械设备动态信号分析方法的回顾与展望[J]. 中国科学(技术科学), 2015, 45(7): 669-685.
- [5] 孔庆鹏, 宋开臣, 陈鹰. 发动机变速阶段振动信号时频分析阶比跟踪研究[J]. 振动工程学报, 2005, 18: 448-452.
- [6] POTTER R. New Order Tracking Method for Rotating Machine[J]. Sound Vib Mag, 1990, 24; 30-34.
- [7] BOSSLEY K M, MCKENDRICK R J. Hybrid Computed Order Tracking[J]. Mech Syst Signal Process, 1999, 13(4); 627-641.
- [8] FYFE K R, MUNCK E D S. Analysis of Computed Order Tracking[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 1997, 11(2): 187-205.
- [9] BLOUGH J R. Development and Analysis of Time Variant Discrete Fourier Transform Order Tracking[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2003, 17(6): 1185-1199.
- [10] 郭瑜, 秦树人, 汤宝平, 等. 基于瞬时频率估计的旋转机械阶比跟踪[J]. 机械工程学报, 2003, 39(3): 32-36.
- [11] 赵晓平, 张令弥, 郭勤涛. 基于瞬时频率估计的自适应 Vold-Kalman 阶比跟踪研究[J]. 振动与冲击, 2008, 27(12): 32-36.
- [12] 丁雪娟, 王红星. 基于基于阶次窄带包络分析的直驱风机构轴承微弱故障诊断[J]. 噪声与振动控制, 2016, 36(3): 159-163.
- [13] WANG K S, HEYNS P S. An Empirical Re-sampling Method on Intrinsic Mode Function to Deal with Speed Variation in Machine Fault Diagnostics[J]. Appl Soft Comput, 2011, 11: 5015-5027.
- [14] 李辉, 郑海起, 唐力伟. 瞬时频率估计的齿轮箱升降速信号阶次跟踪[J]. 振动·测试与诊断, 2007, 27(2): 125-128.

(编辑:徐敏)