

文章编号:1000-582X(2002)05-0017-04

时频分析阶比跟踪技术*

郭瑜, 秦树人, 梁玉前

(重庆大学机械学院测试中心, 重庆 400044)

摘要: 旋转机械运转时其旋转部件引起的故障,其产生的振动和噪声所表现出的特征和轴的转速有密切关系。在这类故障的特征分析中,使用阶比谱分析比一般的频域分析更具有优势。文中对两种典型的阶比跟踪法进行了较为系统的论述。在此基础上提出并介绍了正在研究的时频分析阶比跟踪技术,时频分析阶比跟踪技术用纯软件的方法实现阶比跟踪,是对原有技术的有力补充,特别适合于虚拟测试仪器发展的要求,有很好的应用前景。

关键词: 旋转机械; 阶比跟踪; 时频分析; 虚拟仪器

中图分类号: TH115

文献标识码: A

振动分析是旋转机械现代状态监测和故障诊断的重要组成部分。旋转机械运转时其旋转部件引起的故障,如轴的缺陷,齿轮、轴承的磨损、失效等,其产生的振动和噪声所表现出的特征和轴的转速有密切关系。在这类故障的特征分析中,使用阶比谱分析比一般的频域分析更易于检测出和转速相关的振动信号。作者对阶比谱分析极其实实现方法作了较为系统的介绍,并在此基础上提出了崭新的时频分析阶比跟踪技术,为正在开发的虚拟旋转机械特征分析仪的实现奠定了基础。

1 阶比分析

1.1 提出阶比分析的背景

出于经济和安全的考虑,状态监测成为许多复杂过程的基本组成部分。状态监测系统必须计算高效并可靠,以使被监测对象的故障保持在最低水平。振动分析是机械状态监测中常用的方法,通过分析机械设备运行时产生的振动信号的谱的成分,可作为被监测对象当前状况的评判依据。旋转机械的振动信号和转速有关,因此就如在频域中使用频率一样,在旋转机械振动信号分析中经常使用到阶比这个概念。

振动信号的谱分析通常是将时间波形变换到频域,进而提取状态监测所需的特征参数;所用到的谱估计技术一般是基于振动信号时间序列的离散傅立叶变换(DFT),而在原理上 DFT 仅实用于稳定信号。旋转机械运行时,其转速在严格意义上是波动的,特别在升、降速阶段尤其明显,这些状态下对应的振动信号属

于非平稳信号,并不直接满足傅立叶变换对信号的平稳性要求,因此严格说来并不适合用常规的频谱分析法分析,若人为地在应用中将这类信号假定为平稳信号进行分析必然会导致较大的误差甚至错误。

对非平稳信号的分析需用专门的非平稳信号的分析技术,近年来在这一领域的研究很多,常见的有短时傅立叶变换(STFT)、Gabor 变换、Wigner-Ville 分布、小波变换(WT)和阶比分析等,而在对旋转机械的振动分析中,其信号与机器的转速有密切关系,采用阶比分析更具优势。阶比代表每转的循环次数(也可理解为对应转速的倍数,例如某信号的振动频率为对应转轴旋转频率的4倍,则其阶比为4),可很好地表示和转速有关的振动。

1.2 阶比谱分析仿真

在如下示例中仿真了一个频率 f 随主轴转速 n 变化的变频振动信号(例如旋转机械启动升速阶段),为简化,设其幅值恒为1,且频率与时间、转速有如下关系:

信号: $x(t) = \sin 2\pi t^2$, 式中:频率 $f(t) = 2t$ Hz; 转速: $n(t) = 60 \times f(t)$ rpm。

说明:1) 采样触发速度为 $n = 300$ rpm ($f = n/60 \approx 3.33$ Hz), 即当转速达 $n = 300$ rpm 时开始采样,共采样 1 024 点,如图 1(a)、(c) 所示;FFT 算法中所用信号不加窗(相当于加宽度为 1 024 点的矩形窗),由于对时域信号非整周期截断,对应谱图中存在能量泄漏;谱为单边功率谱。2) 在频域分析中常规等间隔采样,采样频率为 250 Hz;阶比分析中取最大分析阶比为 6,则

* 收稿日期:2002-02-12

作者简介:郭瑜(1971-),男,云南昆明人,昆明理工大学讲师,重庆大学博士研究生,主要从事现代测试技术与虚拟仪器技术的研究。

对应信号的采样率为 12 点 / 转,即轴(或信号相位)每变化 $\pi/6$ 弧度采 1 个值;

由图 1 不难发现,该信号用常规的频域分析法分析时,会产生“频率模糊”现象,原因是:该时域采样信号是一非稳定信号,由图 1(a)可清晰地看出在 1 024 个采样点显示的波形中频率是逐渐增加的,而用 DFT 计算时,总是假设窗内的信号是稳定的,得到的谱线反映的是在窗内信号所有的频率成分,于是窗中信号频率变化造成了“频率模糊”,如图 1(b)。显然这一假设对此类信号是不成立的,由此可见用常规频域分析法不适合分析变速机械的振动信号。与此形成鲜明对比的是基于等角度采样的阶比分析可以得到很好的结果,在角度域信号变成了正弦信号,如图 1(c)所示,其阶比谱清楚地反映了信号随转速变化的情况,如图 1(d)所示,一个与 1 阶(倍)转速有关的信号被清晰地显示了出来。

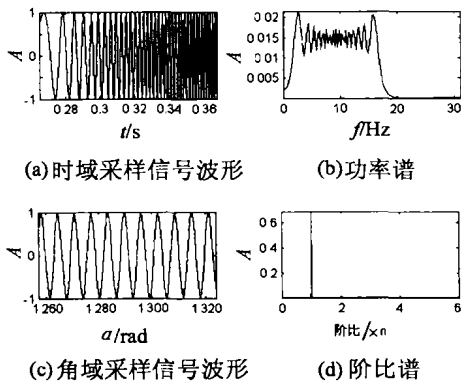


图 1 变频信号的频域分析与阶比谱分析对比

1.3 阶比谱分析实现方法介绍

精确的阶比分析要求对振动信号进行同步采样,监测系统的精确和可靠性取决于同步采样的质量。当运用于旋转轴时,同步采样又被称为等角度采样。

1.3.1 传统阶比跟踪方法

传统的阶比跟踪方法是直接通过模拟设备实现对振动信号的恒定角增量(例如 $\Delta\theta$) 采样。通常包括一个采样率合成器和一个抗混叠跟踪滤波器,还可用一个频率计数器监测转轴的速度。组织框图如图 2 所示。

采样率合成器产生一个与机器转轴成比例的信号来控制采样速率和模拟跟踪滤波器(一个可调截止频率的低通滤波器)的截止频率。一旦获得具体的恒角度采样数据(角域采样),可用 FFT 算法计算出阶比谱。

常规的同步采样数据靠特定的硬件装置获得,该装置可调节采样速率,使振动信号的采样对应恒定的角增量。通常一个计数器被用于计算两个连续的转速脉冲并由此估计出轴的转速。由该转速再算出对振动信号的新采样速率并在下一个转速脉冲间隔期间保持固定。由于定时的限制,新的采样速率不能被立即应

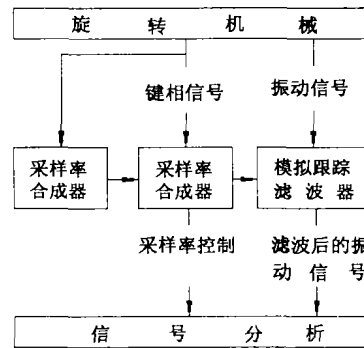


图 2 传统阶比跟踪原理

用,通常有一个转速间隔的延时,因此,采样速率的调整滞后两转。在正常运行状态下,轴速趋于恒定时,这种方法可以较好的工作,进行精确的同步采样。然而,在加速或减速期间,例如启动和惯性减速阶段,采样的精度会显著降低^[1]。此外,由于相关设备的成本和复杂性限制了其使用的范围。

1.3.2 计算阶比跟踪法

近来,如何从异步采样数据中计算同步采样信号一直备受关注。振动信号和转速信号在相同的时间间隔被异步采样。用这些信号,通过数字信号处理算法用软件的形式合成同步采样振动数据。这个过程就是众所周知的计算阶比跟踪(Computed Order Tracking)法,简称 COT 法,该法比传统的方法更加灵活,并可产生相同或更好的精度。另一个附加的优点是它无需特定的硬件,这一点对许多状态监测的应用都是重要的。

COT 系统通常基于 3 个不同的模块:转速脉冲触发器,角度估算模块和信号插值模块,参见图 3。初始模块计算出转速脉冲的到达时刻,并由这些时刻估算轴的角位移,最终算出重采样时刻。通过对异步采样振动信号的内插,和在计算出的时刻重采样生成同步采样信号。具体步骤如图 4 所示:

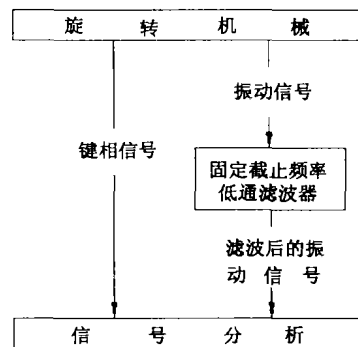


图 3 计算阶比跟踪原理

1) 对原始振动信号和键相信号分两路同时进行等间隔采样,得到异步采样信号。

2) 通过采集的键相脉冲序列(通常是每转一个脉冲),进行转速估计,并作为振动相角的测量基准。

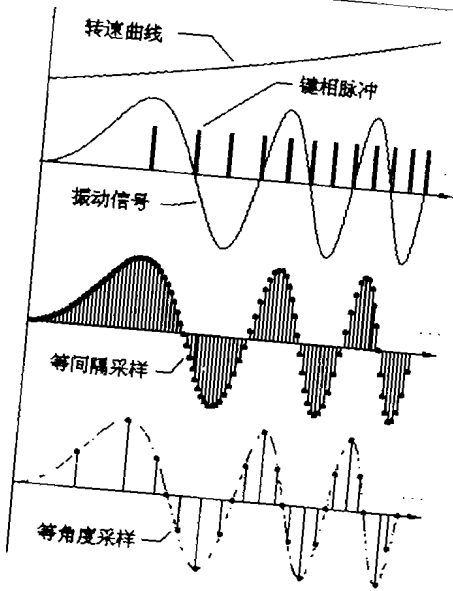


图 4 计算阶比跟踪重采样

- 3) 由转速估计计算等角度采样发生的时刻序列。
- 4) 在计算出的等角度采样发生时刻附近时间区内对异步采样振动信号进行插值计算,最后通过重采样生成同步采样信号。

和传统的方法相比, COT 几乎全由数字方式实现。图 3 所示, 振动信号通过一个固定频率的低通滤波器, 以等间隔 (Δt) 采样, 从该点看来, 该法更象传统频率分析而非阶比跟踪。然而一旦信号被采样后, 利用转速 (键相) 信号, 由软件实现等度增量 ($\Delta \theta$) 信号幅度的重采样。在计算上可借助于专门的 DSP 芯片或高性能计算机实现, 以达到实时监测的目的。此外在 COT 实现中可使用价格低廉的模拟低通滤波器, 它通常比对应的跟踪滤波器有更好的品质, 因为后者在设计时为了保证有宽的工作频率范围, 对滤波器在特定频率执行效率进行了折中。相比之下, 单一频率滤波器优化使得其在特定的频率工作得相当好^[1]。值得一提的是, 研究发现 COT 的精度主要由插值精度和键相脉冲提供的合成同步采样时标的精度而定。选用适当的算法, COT 可获得相当高的插值精度。采用硬件计算转速脉冲到达时间可显著提高合采样的精度这是传统阶比跟踪的优势。在此基础上, M. Bossley 等在近来提出组合阶比跟踪方法, 高精度的插值算法和硬件脉冲计数器实现了高精度跟踪^[2]。

时频分析阶比跟踪法

时频分析基本概念

时频分析是对非稳态信号进行分析的有力手段, 得到了很大发展。传统的 Fourier 是一种整体变换, 能获得信号在时域或频域的全局特性。而实际遇到的非平稳信号其统计量是时变的, 最希望

得到的是信号频谱随时间的变化情况, 为此, 需要使用时间和频率的联合函数来表示信号, 而时频分析正是在这样的背景下产生的。常见的时频分析技术有: 短时傅立叶变换 (STFT)、Gabor 变换、Wigner - Ville 分布和小波变换 (WT) 等。对时频分析的详尽论述可参阅相关资料, 这里用一含有四阶成分的气轮机仿真振动信号^[2]的分析加以说明。设气轮机在额定速度 (3 000 rpm) 时, 阶次的幅值分别为 20 dB, 0 dB, -10.45 dB 和 -20 dB。当停机降速时其幅值与轴的转速成平方比例减速。为了简化, 轴的角速度 (r/min) 由下式给定:

$$r(t) = 3000 \exp(-kt) \quad (1)$$

上式中 k 决定减速率, 在此值取 0.1, 表示一个快速的降速过程。图 5 为由 STFT 得到的时 - 频谱, 从中可以清楚的看到信号的各阶比成分及其幅值随时间变化的情况。

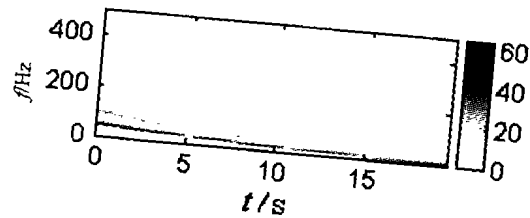


图 5 仿真气轮机振动信号 STFT 时 - 频谱

2.2 基于时频分析的瞬时频率估计

瞬时频率是非平稳信号分析中的一个重要概念, 定义为信号 $s(t) = a(t)\cos\varphi(t)$ 的瞬时相位的导数^[3,4]

$$f_i = \frac{1}{2\pi} \frac{d}{dt} [\arg z(t)] \quad (2)$$

式中 $z(t)$ 为信号 $s(t)$ 对应的解析信号, 瞬时频率的计算方法很多, 但应注意的是瞬时频率只对单分量信号有意义, 因此首先要将多分量信号分为单分量信号。时频分析的典型应用之一就是可以得到瞬时频率估计, 且在时频面中容易实现不同信号分量 (多分量) 的分离。时频分析的特点在于通过某种变换可将时间信号表示为时间和频率的函数由时频分析可得到信号在某个时刻的“局部频谱”, 进而得到瞬时频率估计^[4], 以 STFT 时 - 频谱计算瞬时频率估计为例, 有:

$$\langle \omega \rangle_t = \frac{1}{P(t)} \int \omega |S_i(\omega)|^2 d\omega \quad (3)$$

式中, $\langle \omega \rangle_t$ 为 t 时刻时窗区间内的频率均值, 对单分量信号就是 t 时刻的瞬时频率估计; $P(t)$ 为加窗信号的能量

$$P(t) = \int |s(\tau)h(\tau - t)|^2 d\tau \quad (4)$$

$S_i(\omega)$ 为短时傅立叶变换, 和加窗信号 s_h 构成关于执行时间 τ 的傅立叶变换对, 即:

$$s(\tau)h(\tau - t) \xrightarrow{FT} S_i(\omega) \quad (5)$$

其中 $h(t)$ 为时窗函数,通过对 $h(t)$ 的选择可获得不同的时频积聚性。

2.3 时频分析阶比跟踪原理

从第一节介绍的两种阶比计算方法中不难得到这样的结论:在阶比分析中最关键技术是要能准确获得阶比(或角域等角度)采样的时刻及相应的基准转速(或频率),即实现所谓的阶比跟踪。在传统方法中阶比跟踪的实现是用硬件(编码器、采样率合成器、模拟跟踪滤波器等)手段来保证的;在计算阶比跟踪法中则采用键相装置和内插算法实现相同目的。计算阶比跟踪法在成本和使用上比传统方法已大为简化,并成功地用于工程实际,但应该看到计算阶比跟踪法中仍要用到键相装置进行转速跟踪,这使得阶比谱的测量还是较为烦琐,特别在不方便安装键相装置的场合,以上两种方法都无能为力。

一个值得深入研究的方法是利用时频分析技术来实现阶比跟踪,本人正在从事这方面的研究工作,并已取得一定进展。前面已指出通过对信号时频分析可得到信号的瞬时频率估计,而瞬时频率(转速)的获得正是阶比分析的关键。瞬时频率的估计有多种方法^[5],在此选用基于信号的时频表示(TFR)峰值搜索的瞬时频率估计方法^[6]。该法较直观,同时实现上也简单有效。由于不希望过多地涉及所用到对象的时频表示的确切含义,在此使用较简单的,同时也是较流行的 STFT 技术来说明时频分析阶比跟踪的实现原理,其过程如图 6 所示:图 1(a) 为对 1 阶信号的短时傅立叶时频谱得到的瞬时转速(频率)估计,参见图 5;图 6(b) 对其进行最小二乘拟合得到的拟合瞬时转速曲线;图 6(c) 为理论转速曲线和拟合转速曲线的比较,可看出拟合精度很高;最后由拟合瞬时转速曲线得到短时傅立叶变换阶比谱,清晰地反映了各阶比分量随转速的变化情况,见图 6(d),用最小平方根误差作评价指标

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^N (x(i) - \hat{x}(i))^2 \quad (6)$$

上式中 $\hat{x}(i)$ 是 $x(i)$ 的(瞬时频率或转速)估计值,算得 MSE 为 8.6×10^{-3} ,有很好的精度,完全可满足工程实际需要。

当然,在实际应用中时频分析阶比跟踪并不简单,要考虑很多诸如时频分析法的优化选择,非阶比信号、高次阶比谐波的影响,噪声的干扰等,且目前还达不到前面两种方法的精度,有很多善需深入研究的课题。但应该看到,这种方法有很大的实用价值,因为它仅需一个振动传感器采集信号,而用纯软件的方法实现阶比跟踪。

3 结 语

在旋转机械的故障诊断中,往往对其启动升速和停机降速阶段特别感兴趣,因为在这些操作模式下更

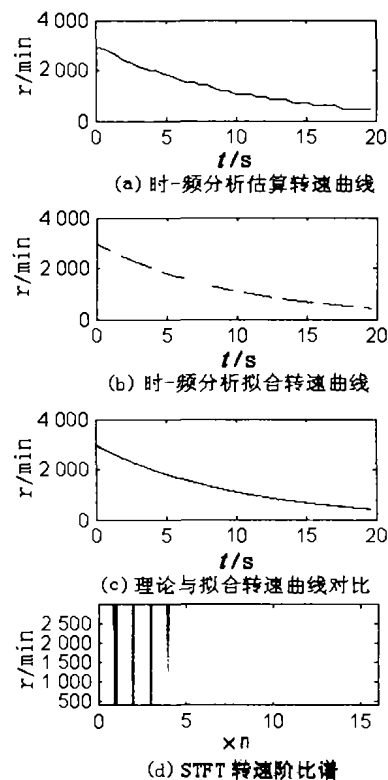


图 6 时频分析阶比跟踪示谱

容易发现通常难以发现的系统缺陷。传统的频域分析法存在明显的不足,而用阶比分析的方法可以有效的分析出和设备转速有关的振动信号,为旋转机械的故障诊断提供了有力的支持。

本文提出的时频分析阶比跟踪技术用软件的方法实现阶比跟踪是对原有技术的有力补充,特别适合于虚拟测试仪器发展的要求:最大限度地以软件替代硬件的功能,值得进一步深入研究并具有很好的应用前景。

参考文献:

- [1] FYFE K R, MUNCK E D S. Analysis of computed order tracking [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 1997, 11(2): 187 - 205.
- [2] BOSSLEY K M, MCKENDRICK R J, HARRIS C J, et al. hybrid computed order tracking [J]. *Mechanical systems and signal processing*, 1999, 13(4): 627 - 641.
- [3] 张贤达, 保铮. 非平稳信号分析与处理 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1999.
- [4] L. 科恩 著, 白宪居 译. 时 - 频分析. 理论与应用 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1998.
- [5] BOASHASH B. Interpreting and estimating the instantaneous frequency of a signal - Part 1: Fundamentals [J]. *Proc. IEEE*, 1992(4): 520 - 538.
- [6] BOASHASH B. Interpreting and estimating the instantaneous frequency of a signal - Part 2: Algorithms and Applications [J]. *Proc. IEEE*, vol. 1992, (4): 540 - 568. (下转第 24 页)

Synthetic Application for Analysis Methods of the Planar Mechanism Overconstraints

AN Pei - wen, HUANG Mao - lin

(College of Mechanical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: Overconstraints exist widely in planar closed chain mechanisms and mechanical systems result in a series of detrimental influences on behavior of machines, and attention is given to them by machine designer. Some analysis methods of overconstraints in planar closed chain mechanisms are presented, and more study due to the faultiness of these methods. In accordance with faultiness of two common kind of methods, formulas method and loop analysis method of degrees of freedom, and by combining these two methods, an useful mechanism overconstraints analysis method which is convenient for computer aided overconstraints analysis is gained via research on the two methods thoroughly and systematically, and some new views about mechanism overconstraints analysis are presented.

Key words: mechanisms overconstraints; formulas method; loop analysis method of degrees of freedom

(责任编辑 张小强)

~~~~~  
(上接第 20 页)

## Order Tracking Method Based on Time-Frequency Analysis

*GUO Yu, QIN Shu - ren, LIANG Yu - qian*

(College of Mechanical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**Abstract:** The fault character of moving parts of rotating machinery most time is speed-related. The method of order spectrum analysis is more efficient than usual frequency analysis. Two general methods for realizing order tracking are discussed, and a new order tracking method based on time - frequency analysis is proposed. The time-frequency order tracking method only depends on software for order tracking, which is a strong supplement to traditional methods, and specially satisfied the require of virtual instruments, so there is a good prospect for its using.

**Key words:** rotating machinery; order tracking; time-frequency analysis; virtual instruments

(责任编辑 成孝义)