

# 基于组态技术的虚拟阶比分析仪开发及应用\*

尹爱军<sup>1,2</sup>, 陈本乾<sup>1,2</sup>, 黄胜坡<sup>1,2</sup>, 朱长林<sup>1,2</sup>

(1. 重庆大学机械传动国家重点实验室 重庆, 400044) (2. 重庆大学机械学院 重庆, 400044)

**摘要** 针对传统虚拟仪器结构封闭、缺乏开放性和扩展性等问题,研究了基于组态软件技术的虚拟仪器开发模式,构建了该模式下的系统结构、双驱动运行机制及仪器系统的功能模型等内容;介绍旋转机械阶比分析的基本理论;建立基于瞬时频率估计的阶比分析基本功能包;开发了基于组态技术的可在线功能重构的虚拟式旋转机械阶比分析仪。对所开发的阶比分析仪进行了试验及现场验证,并与LabVIEW系统中的阶比分析工具进行了对比分析。结果表明,该仪器在提高扩展性和开放性的同时,使用简便,分析结果准确,实际应用性能优良。

**关键词** 组态软件; 虚拟仪器; 旋转机械; 阶比分析

**中图分类号** TH7; TP3

## 引言

组态软件是近年来在工业自动化领域兴起的一种软件开发技术,它具有二次开发简便、开发周期短、通用性强和可靠性高等优点。虚拟仪器(virtual instrument,简称VI)是20世纪70年代提出的一种仪器概念,倡导“软件即为仪器”的思想。研究人员对组态技术在虚拟仪器开发中的应用作了一些有益的尝试<sup>[1-3]</sup>。

阶比分析是旋转机械升、降速阶段非平稳信号分析的重要分析方法,通过阶比分析可以提取与转速有关的故障特征。笔者研究了基于组态技术的虚拟式阶比分析仪的开发。该仪器可实现在线功能重构、有效完成旋转机械的阶比分析。

## 1 基于组态技术的虚拟仪器开发

### 1.1 系统结构

基于组态技术的虚拟仪器系统软件结构如图1所示。系统由控件库、功能库、数据池、界面层(拼搭场)、传感器和数据采集器组成。传感器和数据采集器是系统的硬件部分,负责采集数据,并将数据存储至数据池;数据池与拼搭场双向数据传输,存储实时数据、仪器组态文件;功能库输出端与拼搭场第1输入端连接,为控件拼搭提供仪器功能资源;控件库输

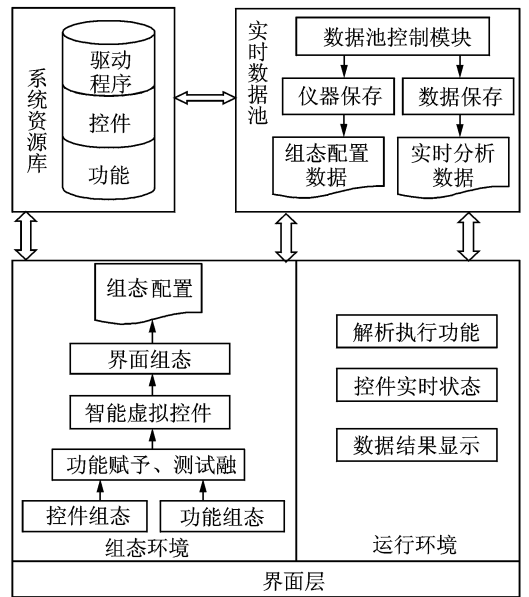


图1 基于组态的虚拟仪器软件结构

出端与拼搭场第2输入端连接,为控件拼搭提供控件实例,拼搭场是拼搭虚拟控件并将虚拟控件组建成仪器成品的“厂房”<sup>[4-5]</sup>。

### 1.2 系统运行机制

系统同时采用了事件驱动运行方式和数据驱动运行方式,如图2所示。

事件驱动方式中,系统会等待并响应用户或其他触发事件的对象发出消息,并对消息作出响应。采

\* 国家自然科学基金资助项目(51105396,50905192)  
收稿日期:2011-07-11;修改稿收到日期:2011-09-26

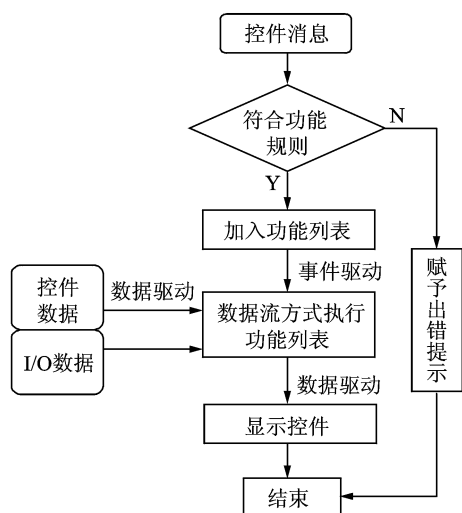


图2 组态虚拟仪器的驱动运行机制

用这种方式的程序以事件作为中心聚散,模块化结构非常明显,可维护性高。事件驱动程序结构组织方式在人机交互比较频繁的应用软件、管理软件中得到了广泛应用,但是这个驱动方式在设计时间顺序类程序时,面临着高复杂性和低可读性的困难<sup>[5-6]</sup>。

数据驱动方式是将整个程序看作是一个数据流通的通道,以数据输入为起点,按照数据处理的自然先后顺序编写程序流程。其基本思想是程序流与数据流对应,不同数据处理中的程序流相互独立。数据流驱动方式使程序流程简单明了,广泛用于用户图形化编程语言中。但是该驱动方式过分依赖程序流程,很多代码用于对流程的控制,一定程度上增加了程序的复杂性,降低了程序运行效率。

图2所示的双驱动运行机制中,仪器运行时用户界面交互采用事件消息方式快速响应用户控制,功能执行时采用数据流驱动,使得仪器架构清楚,数据处理流程清晰,兼顾了两种驱动方式的优点。

### 1.3 仪器功能模型

功能库向界面提供各种测试分析功能,功能库是否强大直接关系到虚拟仪器系统的种类、测试能力和应用范围等。基于组态思想的虚拟仪器设计可在线实施仪器功能重组。在功能重组过程中只需通过简便的参数修改配置,形成参数组态文件;在仪器运行时读取参数配置文件,实现对功能参数的个性化修改。这些修改后的功能可在整个系统中通用,可利用基本功能重组出新的用户自定义功能。

图3为仪器功能模型。可以看出基本功能之间、基本功能和组合功能、组合功能和组合功能均可重新组合生成新功能。功能库中的功能函数采用的统

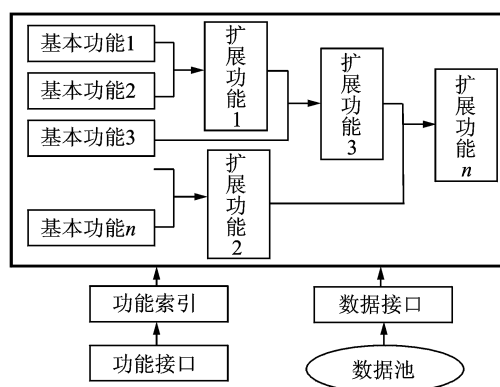


图3 功能模型

一调用接口。

```
ReturnType Func(FuncIndex funcID,
                int inputParamNum,
                Param inputParam[],
                int outputParamNum,
                Param outputParam[])
```

其中:funcID为功能索引号;inputParamNum为输入参数个数;inputParam为输入参数信息;outputParamNum为输出参数个数;outputParam为输出参数信息。

Param为通用参数结构定义,定义为  

```
typedef struct PARAM_
{
    CString szParamDeclare; //参数描述
    CString szParamName; //参数名称
    int nParamType; //参数类型
    PVOID pDefaultValue; //默认值
}Param
```

## 2 阶比分析仪的功能开发

### 2.1 阶比分析的基本理论

阶比分析也称阶次分析,是旋转机械升降速阶段非平稳信号分析的重要分析方法,通过阶比分析可以提取与转速有关的故障特征,例如:轴不平衡时1阶信号最强;不对中时2阶信号最强;发生油膜涡动时会出现0.5阶信号,当出现动静摩擦时会出现0.25阶的信号<sup>[7]</sup>。

阶比与转速的对应关系为

$$f = o \frac{n}{60} \quad (1)$$

其中: $f$ 为频率; $o$ 为阶比(参考轴每转内的循环振

动次数); $n$ 为参考轴转速。

阶比分析的常用方法有传统方法、计算阶比分析方法、基于瞬时频率估计(instantaneous frequency estimate,简称IFE)的阶比分析方法等。

基于瞬时频率估计的阶比分析原理是根据非平稳信号中瞬时转速 $n(t)$ 与瞬时频率 $f(t)$ 的关系,用时频分析的方法获得瞬时频率,进而进行阶比跟踪,实现阶比分析<sup>[8-9]</sup>,具体过程如图4所示。

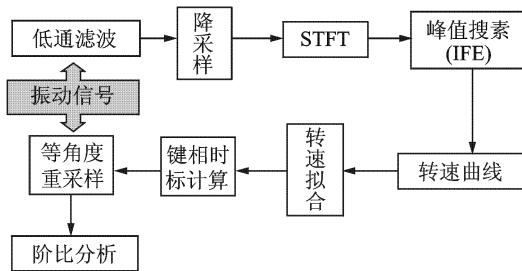


图4 基于瞬时频率估计的阶比分析过程

在这一过程中,信号 $x(\tau)$ 的连续STFT定义为

$$F_x^{(y)}(t, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} [x(\tau)\gamma * (\tau - t)] \exp(-j2\pi f\tau) d\tau \quad (2)$$

其中: $\gamma(\tau)$ 为时间宽度很小的时窗函数; $\gamma * (\tau)$ 为 $\gamma(\tau)$ 的共轭函数。

STFT的谱值(SPEC)为STFT的时间-频率能量分布(瞬时功率谱密度),定义为 $F(t, f)$ 模值的平方

$$P(t, f) = |F(t, f)|^2 \quad (3)$$

对于旋转机械阶比分析,希望能够提取出关心的阶比分量,能够对其时域波形进行观察、分析故障<sup>[10-12]</sup>。笔者实现了基于Gabor变换的阶比分量提取。

信号 $x(t)$ 的Gabor展开为

$$x(t) = \sum_{m=-\infty}^{+\infty} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} C_{m,n} g_{m,n}(t) \quad (4)$$

其中: $C_{m,n}$ 为Gabor展开系数; $g_{m,n}(t)$ 为时移与频调的Gabor基函数,通常为Gaussian函数。

阶比跟踪分为如下两个过程<sup>[13]</sup>:

1) 分析仪中有转速计参考信号。选择Gabor基函数;对给定的窗函数计算其对偶函数;计算Gabor变换系数 $C_{m,n}$ ;确定带通滤波矩阵;信号的时频域重构。

2) 分析仪中无转速计参考信号。STFT分析得到瞬时频率估计;遮隔(Mask)算法得到某一阶阶比分量Gabor系数;信号的时频域重构。

## 2.2 阶比分析仪器功能的设计

根据功能模块模型和基于瞬时频率估计的阶比分析原理建立阶比分析基本功能包<sup>[7]</sup>。

```
class COrderFun
{
public:
.....

int ExtractOrder(.....);
int OrderOrderRPM(.....);
int OrderFrequencyRPM(.....);
int OrderOrderTime(.....);
int OrderFrequencyTime(.....);
int ScaleVtoEU(.....);
int CalSpeed(.....);
int GetSubWave(.....);
int OrderSTFT(.....);
int OrderDown_IFESpeed(.....);
int OrderPowerSpectrum(.....);
.....
}
```

每一个基本函数的输入输出参数具有相同的形式,统一调用接口形式保证了组态系统仪器功能的统一性。限于篇幅,这里不一一给出这些功能的实现代码。

阶比分析基本包中包含信号标定、截取波形数据、转速计算、STFT分析、STFT\_IFE转速提取、阶次提取、Gabor分解、Gabor综合和播放声音等功能函数。这些基本函数可以完成旋转机械的阶比分析,也可由这些基本包和信号分析基本函数库的基本函数构建复杂、个性化的阶比分析仪。

## 3 应用与对比

图5为LabVIEW8.2系统的阶比分析工具包中的带有升、降速过程的振动模拟信号(采样频率为5000)。图6为对图5信号的阶比分析结果。

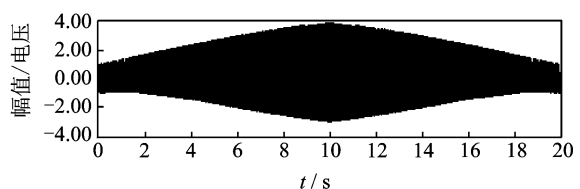


图5 振动模拟信号

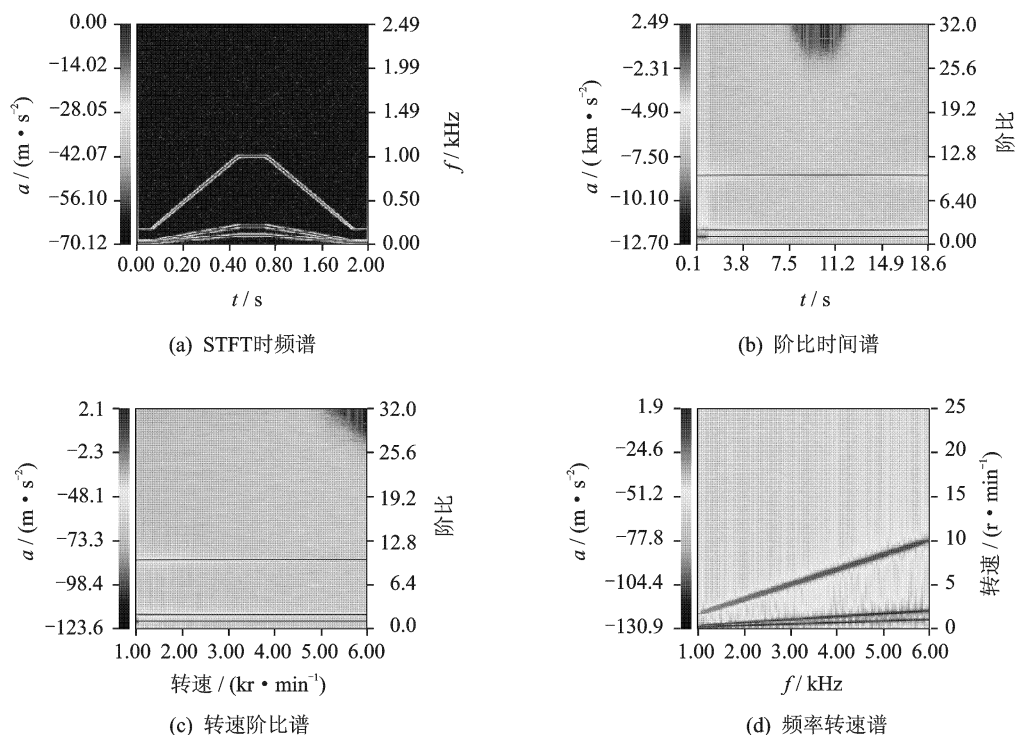
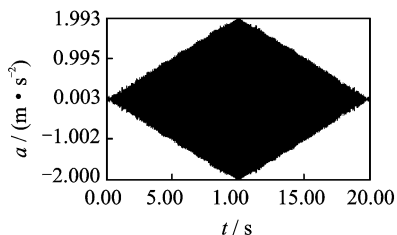


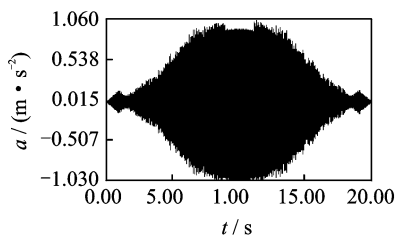
图6 模拟信号的阶比分析

通过STFT时频分析谱图可以看出信号存在3种阶比分量,但不知阶比成分。通过阶比转速谱、阶比频率谱可得到信号的阶比成分,从图中可以看出信号的1阶、2阶、10阶信号最强。对2阶、10阶信号的提取如图7所示。

由原始信号中的转速脉冲参考信号得到的转速曲线如图8(a)所示;利用本研究方法对振动信号降2倍采样频率重采样,设置频率搜索范围为0~120 Hz

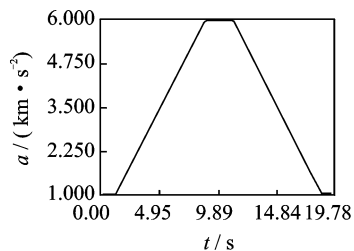


(a) 第2阶信号提取

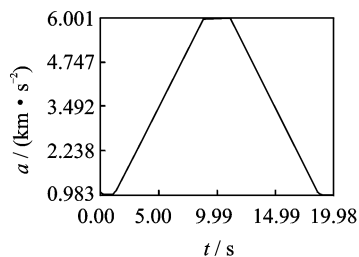


(b) 第10阶信号提取

图7 阶比分量提取



(a) 实际转速曲线



(b) IFE转速曲线

图8 实际转速曲线与IFE转速曲线

(0~7.2 kr/min),得到的转速曲线如图8(b)所示。

利用最小平方根误差MSE对转速曲线进行评价

$$MSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} (x_i - \hat{x}_i)^2} \quad (5)$$

其中: $x_i$ 为实际转速; $\hat{x}_i$ 为IFE峰值搜索的转速。

得到  $MSE = 3.544 \text{ 2 r/min}$ , 可见实际转速与 IFE 峰值搜索得到的误差很小。

图9为利用本阶比分析仪对四川都江堰宁江机床厂CKN1112 II型数控纵切自动机床的电主轴进行阶比分析的测试现场布局图。传感器为PCB-356A15型3轴加速度传感器。

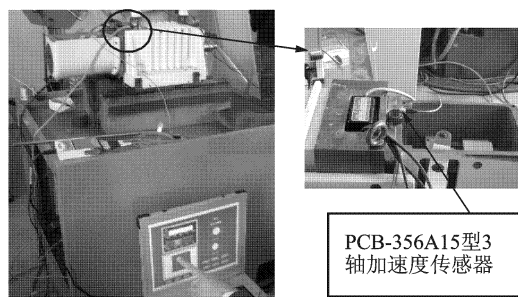
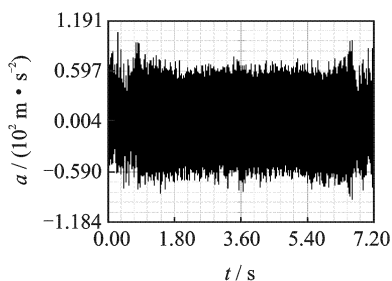
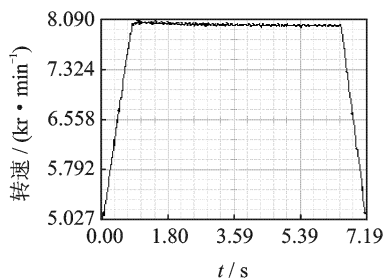


图9 测试现场布局图

图10(a)为机床主轴升速-稳速(8 kr/min)-降速过程中  $x$  方向的振动信号(采样频率为 2.048 kHz)。图10(b)为对信号降2倍采样频率重采样、频率搜索范围为 150~200 Hz 得到的 IFE 峰值搜索转速曲线。



(a) 升降速时振动信号



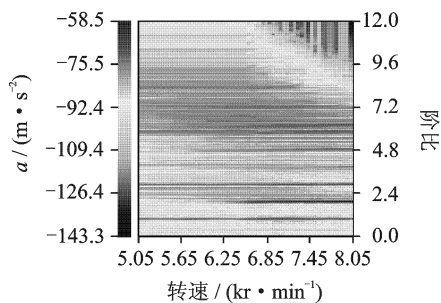
(b) IFE转速曲线

图10 振动信号与IFE转速曲线

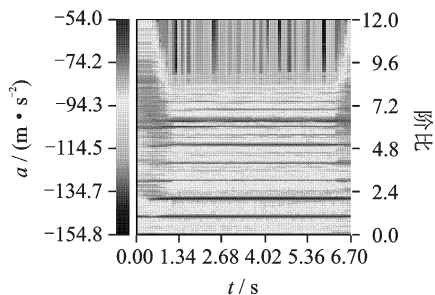
图11为该实际信号的阶比分析结果。由图11可知振动信号的2阶信号为主要成分,可以推断该机床主轴存在不对中的故障,这与实际情况相同。

图12为本研究所开发的阶比分析和由LabVIEW系统组建的阶比分析仪对实测信号的阶比分

析对比。可以看出,两种仪器的分析结果完全一致。

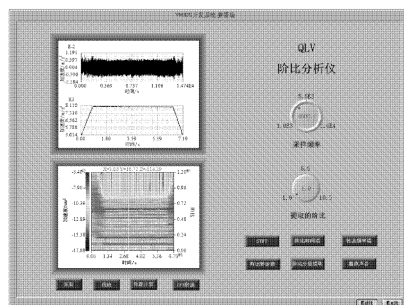


(a) 阶比转速谱

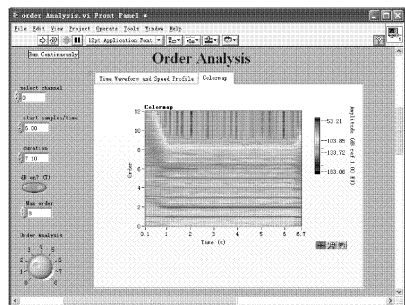


(b) 阶比时间谱

图11 实测信号的阶比分析



(a) 本研究开发的阶比分析仪分析结果



(b) 由LabVIEW系统组建的阶比分析仪分析结果

图12 实测信号的对比分析

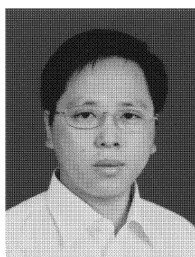
## 4 结束语

研究了基于组态技术的虚拟仪器的开发,建立了具有组态特性的仪器结构、运行机制和功能模型

等。利用组态软件技术的原理,实现了组态虚拟式阶比分析仪。与传统虚拟仪器相比,该仪器具有高度的用户扩展性和开放性,可完成在线仪器功能重构。试验验证和对比分析的结果表明,该仪器分析精度高、结果准确,具有实际应用效果。

### 参 考 文 献

- [1] 伍贤和,吴彦鹏,李金山,等. 基于模糊组态技术的虚拟仪器开发方法[J]. 仪表技术与传感器,2003,8:23-28.  
Wu Xianhe, Wu Yanpeng, Li Jinshan, et al. Study of virtual instrument development method based on fuzzy configuration technology [J]. Instrument Technique and Sensor, 2003, 8: 23-28. (in Chinese)
- [2] 许利霞,张铁民,刘潇建. 应用组态软件的超声电机运动参数测试系统[J]. 振动、测试与诊断,2010(4),32(2):135-137.  
Xu Lixia, Zhang Tiemin, Liu Xiaojian. Measurement system of ultrasonic motor running parameter using configuration software [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2010(4), 32(2):135-137. (in Chinese)
- [3] 尹爱军,杨正益,孙丽萍. 虚拟仪器开发中功能组态设计的研究[J]. 振动、测试与诊断,2010,30(2):193-196.  
Yin Aijun, Yang Zhengyi, Sun Liping. Design of function configuration in virtual instrument development[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2010,30(2): 193-196. (in Chinese)
- [4] 尹爱军,周传德,王见. 秦氏模型——基于智能虚拟控件的仪器[M]. 北京:科学出版社,2007:33-47.
- [5] 朱长林. 组态技术在智能控件化虚拟仪器开发系统中的应用研究[D]. 重庆:重庆大学,2010.
- [6] 何江. 事件驱动程序设计范型的缺陷及其对策[J]. 计算机应用,1997,7:75-76.  
He Jiang. Defect and countermeasure of event-driven programming paradigm [J]. Computer Applications, 1997, 7:75-76. (in Chinese)
- [7] 韩捷,张瑞林. 旋转机械故障机理及诊断技术[M]. 北京:机械工业出版社,1997:156-173.
- [8] 黄胜坡. 智能控件化虚拟仪器开发系统中的数据交互与显示模块的应用研究[D]. 重庆:重庆大学,2010.
- [9] 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.  
Guo Yu, Qin Shuren, Tang Baoping, et al. Order tracking of rotating machinery based on instantaneous frequency estimation [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2003, 39 (3): 32-36. (in Chinese)
- [10] Wu Jianda, Bai Mingsan, Su Fucheng, et al. An expert system for the diagnosis of faults in rotating machinery using adaptive order-tracking algorithm [J]. Expert Systems with Applications, 2009,36(3):5424-5431.
- [11] Fyfe K R, Munck E D S. Analysis of computed order tracking [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 1997, 11(2):187-205.
- [12] Pan Minchun, Liao Shiuwei, Chiu Chunchin. Improvement on Gabor order tracking and objective comparison with Vold-Kalman filtering order tracking [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2007,21:653-667.
- [13] 郭瑜,秦树人. 基于瞬时频率估计及时频滤波的阶比分量提取[J]. 中国机械工程,2003,43(487):1506-1509.  
Guo Yu, Qin Shuren. Order component extraction on instantaneous frequency estimation and time-frequency domain filtering [J]. China Mechanical Engineering, 2003, 43(487): 1506-1509. (in Chinese)



**第一作者简介:**尹爱军,男,1978年5月生,博士、副教授、硕士生导师。主要研究方向为智能测试与虚拟仪器。曾发表《秦氏模型—基于智能虚拟控件的仪器》(北京:科学出版社,2007年)等论著。  
E-mail:yinaijun2001@yahoo.com.cn