

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J1905940

# 基于全相位快速傅里叶变换的主轴不平衡特征提取及实验\*

王 展<sup>1,2</sup>, 杜思远<sup>1</sup>, 贺文治<sup>1</sup>, 张 珂<sup>2</sup>

(1.沈阳建筑大学机械工程学院 沈阳 110168; 2.高档石材数控加工装备与技术国家地方联合工程实验室 沈阳 110168)

**摘要:**主轴作为数控机床的核心部件,因其质量不平衡而产生的振动严重影响机床的加工精度。对主轴不平衡振动进行有效抑制的前提是需要准确提取振动信号特征。为了准确提取主轴系统的不平衡振动特征,获取振动幅值和相位,提出基于全相位快速傅里叶变换的主轴不平衡振动特征提取方法,全相位快速傅里叶变换利用自身的频谱分析功能实现对信号相位和振幅的准确提取。分别通过仿真与实验的方式将该方法与其他3种方法进行振动特征提取对比,全相位傅里叶变换提取振动幅值和相位准确度和稳定性更好,提取后的振动相位准确性可达97%,而提取后进行动平衡振动抑制实验,振动量下降65.21%,进一步验证了该方法的有效性。

**关键词:** 主轴; 振动信号; 特征提取; 全相位快速傅里叶变换; 不平衡

**中图分类号:** TH113.1 TH115 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.20

## Unbalanced feature extraction and experiment of spindle based on the all phase fast Fourier transform method

Wang Zhan<sup>1,2</sup>, Du Siyuan<sup>1</sup>, He Wenzhi<sup>1</sup>, Zhang Ke<sup>2</sup>

(1.School of Mechanical Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, China; 2.National Engineering Laboratory of High-grade Stone Material Numerical Control Machining Equipment and Technology, Shenyang 110168, China)

**Abstract:**The spindle is the core component of the numerical control machine tool. The vibration caused by the mass imbalance seriously affects the machining accuracy of the machine tool. To suppress the spindle unbalanced vibration, it needs to accurately extract feature of the vibration signal. To identify the unbalanced vibration amplitude and phase of the spindle system, a feature extraction method based on the all-phase fast Fourier transform is proposed. The all phase fast Fourier transform can accurately extract the phase and amplitude of the signal by using spectrum analysis function. This method is compared with other three methods to extract the vibration feature of the signal collected by simulation and experiment. Results show that the all-phase Fourier transform can achieve better vibration amplitude and phase accuracy and stability. The accuracy of the vibration phase after extraction can reach 97%, and the dynamic balance vibration suppression experiment can be reduced by 65.21% after extraction. The effectiveness of the method is further verified.

**Keywords:** spindle; vibration signal; feature extraction; all phase fast Fourier transform; unbalance

## 0 引 言

数控机床是高端加工制造的基础设备,其运行性能及加工精度直接决定了零件的质量。主轴单元作为数控

机床的关键部件,其运转性能的好坏对零部件的质量和精度等级起到了决定性的作用。而在实际运转过程中,由于材料、故障或装配等因素会导致主轴系统质量不平衡,进而使主轴系统产生振动现象。主轴的振动会大大降低机床的加工精度,从而影响零部件的加工质量。

收稿日期:2019-12-24 Received Date:2019-12-24

\* 基金项目:国家自然科学基金项目青年基金(51805337)、东北大学航空动力装备振动及控制教育部重点实验室研究基金资助项目(VCAME202008)、国家自然科学基金(51675353)

对主轴系统不平衡偏心质量进行动平衡质量补偿是降低主轴振动的有效手段,而动平衡的前提需要确定主轴系统的不平衡振动特征,因此对主轴系统运转过程的不平衡振动特征准确提取是实现动平衡补偿需要解决的首要问题。关于主轴系统或旋转机械等振动特征的分析 and 提取等方面一直是现阶段机械领域的热点方向,并取得了一定的理论成果。

Chen 等<sup>[1]</sup>使用小波变换和功率谱密度成功提取出与主轴不平衡频率相一致的波形信号特征。Cho 等<sup>[2]</sup>使用了多个传感器进行了振动信号的处理分析,效果良好。李红延等<sup>[3]</sup>提出了一种改进的小波阈值去噪函数,结果表明改进的小波函数何以很好的对信号进行去噪处理。Denkena 等<sup>[4]</sup>使用递归估计来降低振动信号的噪声。Kim 等<sup>[5]</sup>使用了快速傅里叶变换(fast Fourier transform, FFT)、短时傅里叶变换、能量和离散小波变换来提取信号特征。Law 等<sup>[6]</sup>结合小波包分解、希尔伯特黄变换和筛选过程进行分析,从测量信号中提取关键特征,识别主轴轴承的运行状态。汤健<sup>[7]</sup>采用快速傅里叶变换将时域振动及振声信号转换为频谱变量为前提建立了基于频域特征提取与多传感器信息融合的磨机负荷软测量新方法。Xu 等<sup>[8]</sup>提出了基于改进自适应冗余提升小波来增加振动信号的提取精度。Zhou 等<sup>[9]</sup>提出了一种基于小波包多频带谱减法增强钻井处理振动信号特征的新方法,该方法能有效消除噪声增强信号特征。汪顺利等<sup>[10]</sup>使用虚拟仪器设计振动测量系统并且能有效地跟踪主轴振动。Dong 等<sup>[11]</sup>建立了基于 LabVIEW 的主轴振动检测分析系统,实现对振动信号的采集、处理和分析,降低硬件成本。Xie 等<sup>[12]</sup>提出了一种改进的小波阈值去噪方法来处理振动信号。石明江等<sup>[13]</sup>使用小波包对振动信号进行特征提取的研究,结果表明此种方法可以很好的提取振动信号的特征。高荣等<sup>[14]</sup>利用小波逆变换对信号进行重构,提取出电机主轴的振动信号特征。岳应娟等<sup>[15]</sup>使用振动图谱提取出了振动信号的特征。余路等<sup>[16]</sup>提出了改进的稀疏编码振动信号特征提取算法,并且有较强的提取能力。江志农等<sup>[17]</sup>通过对信号互相关处理消除了相位滞后对相位提取精度的影响,且提取的幅值和相位精度比传统互相关法显著提高。贺长波等<sup>[18]</sup>使用总体最小二乘准则的旋转不变子空间法对存在噪声干扰的欠采样信号进行了频率的准确估计。周永行等<sup>[19]</sup>使用小波包分频谱减的钻削振动信号特征增强方法增强了振动信号的特征。廖庆斌等<sup>[20]</sup>使用即时序多相关-经验模式分解进行了振动信号较充分的特征提取。何俊等<sup>[21]</sup>提出了同步压缩小波变换的滚动轴承信号特征提取方法,与传统的时域特征参数提取方法相比,此方法具有更高的分类准确率。余路等<sup>[22]</sup>提出了基于改进字典学习的单通道振动信号盲源分离算法。朱文龙

等<sup>[23]</sup>提出了一种基于独立分量分析和经验模态分解的特征提取新方法。赵莉华等<sup>[24]</sup>通过交叉小波变换提取出了变压器本体振动数据的主成分。王鹏等<sup>[25]</sup>提出了一种多尺度时频谱二值化方法,实现了微弱冲击特征的增强。Zhang 等<sup>[26-27]</sup>采用最小二乘算法对基频信号进行拟合,与传统的快速傅里叶变换离散傅里叶变换算法相比,具有一定的理论优势。李传江等<sup>[28]</sup>采用三次样条插值法从键相信号中获取转子的瞬时频率,由瞬时频率构造不平衡信号,进而采用最二乘法辨识出不平衡信号的幅值和相位。赵妙颖等<sup>[29]</sup>提出了一种基于经验小波变换的信号特征提取方法提取变压器振动信号。王展等<sup>[30]</sup>对比主轴系统在实验条件下和模拟条件下的振动响应,验证了互相关算法提取幅值和相位的准确性。综上,针对振动信号的特征提取方面已经进行了较深入的研究,并从不同角度获得了发生振动装置的工作特性,但对不平衡振动特征提取和分析方面的研究尚少,还需要进一步研究,为后续进行动平衡质量补偿奠定基础。

为了使主轴因质量不平衡而产生的振动信号的特征提取具有较高的精度,本文在前人的基础上运用全相位快速傅里叶变换(all phase fast Fourier transform, APFFT)进行主轴不平衡振动信号的特征提取,进而更准确获得主轴的振动量及不平衡量产生的等效位置,为提高振动信号提取的准确性进而改善动平衡的精度做铺垫。

## 1 主轴振动特征提取方法

全相位方法数据预处理的统一流程如图 1 所示。从图中可以看出,首先输入  $(2N - 1)$  长度的离散信号,其次再用卷积窗  $w$  对这些长度的信号进行数据加权,然后再将每个数据加权结果隔离  $N$  个延时单元进行叠加,输出  $N$  个数据。

在进行完输入序列的预处理之后,下面需要对信号进行谱分析,即处理振动信号。谱分析可以得出振动信号的幅值和相位。现在列出时间序列  $x(0)$  的  $N$  点  $N$  维向量:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_0 &= [x(0), x(1), \dots, x(N-1)]^T \\ \mathbf{x}_1 &= [x(-1), x(0), \dots, x(N-2)]^T \\ &\vdots \end{aligned} \quad (1)$$

再把  $\mathbf{x}_0$  到  $\mathbf{x}_{N-1}$  中的每个  $x(0)$  移动到首位,得到另一个的  $N$  个  $N$  维向量:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}'_0 &= [x(0), x(1), \dots, x(N-1)]^T \\ \mathbf{x}'_1 &= [x(0), x(1), \dots, x(-1)]^T \\ &\vdots \\ \mathbf{x}'_{N-1} &= [x(0), x(-N+1), \dots, x(-1)]^T \end{aligned} \quad (2)$$

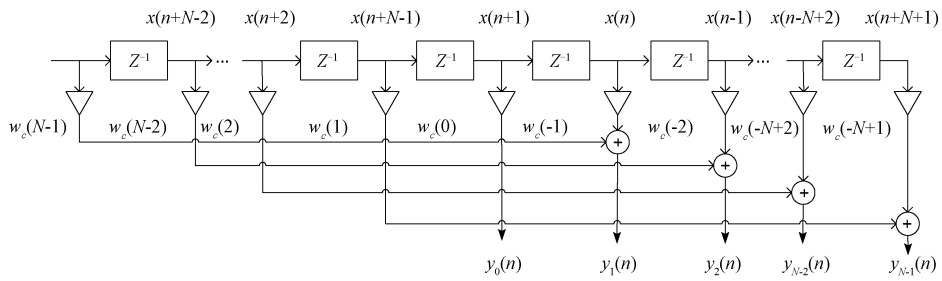


图1 全相位数据预处理流程

Fig.1 Flow chart of all-phase data preprocessing

对准  $x(0)$  相加并取其平均值,则可得到全相位数据向量:

$$\mathbf{x}_{ap} = \frac{1}{N} [Nx(0), (N-1)x(1) + x(-N+1), \dots, x(N-1) + (N-1)x(-1)]^T \quad (3)$$

根据离散傅里叶变换的移位性质,式(1)中  $x'_i(n)$  的离散傅里叶变换  $x'_i(k)$  和式(2)中  $x_i(n)$  的离散傅里叶变换  $x'_i(k)$  之间有很明确的关系:

$$x'_i(k) = x_i(k) e^{j\frac{2\pi}{N}ik}, \quad i, k = 0, 1, \dots, N-1 \quad (4)$$

对式(4)的  $x'_i(k)$  进行求和平均即为 APFFT 的输出:

$$\mathbf{x}_{ap}(k) = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} x'_i(k) = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} x_i(k) e^{j\frac{2\pi}{N}ik} = \frac{e^{j\beta k}}{N^2} \frac{\sin^2[\pi(\beta - k)]}{\sin^2[\pi(\beta - k)/N]} \quad (5)$$

## 2 不平衡振动信号提取模拟

主轴振动特征提取的模拟采用虚拟仪器 LabVIEW 实现。在主轴的运转时,主轴的振动信号主要由主轴的基频信号和环境噪声组成。环境噪声可分为倍频信号和高斯白噪声组成。此外还有传感器的直流分量。公式如下:

$$x(t) = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i \sin(i\omega t + \phi_i) + s(t) \quad (6)$$

式中:  $a_0$  为直流分量;  $\sum_{i=1}^n a_i \sin(i\omega t + \phi_i)$  表示为主轴振动的基频信号和倍频信号,当  $i=1$  时,为基频信号,  $i > 1$  时,为倍频信号;  $a_i$  为幅值;  $\phi_i$  为相位;  $s(t)$  为噪声信号,包括均匀白噪声和高斯白噪声。

以上是主轴振动信号的一个基本模式,代表传感器采集到的信号中包含这些信息。因此,需要滤波得到基频信号。对于本文实验的主轴,设置振动信号的两种时域波形,模拟振动信号的时域波形设为:均匀白噪声为软件自带,高斯白噪声的信号标准偏差为 1,直流分量为  $2 \mu\text{m}$ ,转频信号为 25 Hz,对应的振动幅值为  $5 \mu\text{m}$ ,二倍

频振动信号为  $3 \mu\text{m}$ ,三倍频振动信号为  $2 \mu\text{m}$ ,对应的初相位分别  $30^\circ$ ,  $20^\circ$  和  $10^\circ$ 。采样点数 1 000,采样频率 1 000 Hz。对应的函数如下:

$$x(t) = 5\sin(50\pi t + \pi/6) + 3\sin(100\pi t + \pi/9) + 2\sin(150\pi t + \pi/18) + 2 + s(t) \quad (7)$$

为了验证 APFFT 方法对振动特征的提取效果,分别用快速傅里叶变换法、互相关分析法和互功率法与 APFFT 方法进行模拟对比,在这 4 种方法中,着重对比提取的相位。在测量中,主轴基频频率为 25 Hz,但由于传感器的精度和系统的缺陷,在提取出的振动信号中,一般达不到 25 Hz。因此,这 4 种算法分别以整周期 25 Hz 和非整周期 24.4 Hz 的条件下,做振动信号相位的提取。对比数据如表 1 和 2 所示。

表1 整周期对比

Table 1 Full-cycle comparison

参数	方法			
	FFT 法	互相关分析法	互功率法	APFFT
幅值/ $\mu\text{m}$	4.7	4.88	4.95	4.7
相位最大值/ $^\circ$	31.22	31.69	32.34	30
相位最小值/ $^\circ$	29.75	28.63	28.12	28.96
差值/ $^\circ$	1.47	3.06	4.22	1.04

表2 非整周期对比

Table 2 Non-full-cycle comparison

参数	方法			
	FFT 法	互相关分析法	互功率法	APFFT
幅值/ $\mu\text{m}$	4.64	4.72	4.91	4.68
相位最大值/ $^\circ$	33.14	33.87	34.77	30
相位最小值/ $^\circ$	28.61	28.11	27.63	28.45
差值/ $^\circ$	4.53	5.76	7.41	1.55

由表 1 和 2 的模拟结果可以看出,4 种方法在幅值上的提取是相差不多,振幅都在  $4.8 \mu\text{m}$  左右。但是在相位提取上 APFFT 要明显优于其他 3 种方法,稳定性很高,

相位波动小。

另一组模拟振动信号的时域波形设为:均匀白噪声为软件自带,高斯白噪声的信号标准偏差为 1,直流分量为 2 μm,转频信号为 25 Hz,对应的振动幅值为 7 μm,二倍频振动信号为 5 μm,三倍频振动信号为 4 μm,对应的初相位分别 30°,20°和 10°。采样点数 1 000,采样频率 1 000 Hz。对应的函数式如下:

$$x(t) = 7\sin(50\pi t + \pi/6) + 5\sin(100\pi t + \pi/9) + 4\sin(150\pi t + \pi/18) + 2 + s(t) \quad (8)$$

如表 3 和 4 所示,可以看出随着倍频的增加,振幅也随之增加,并且相位的变化依然是 APFFT 最为稳定。综合表 1~4 来看,信号的整周期频率和非整周期频率提取对信号的处理结果有着很大的影响,非整周期提取会降低提取效率。这 4 种方法最稳定的是 APFFT,在整周期下,其相位基本保持不变,相位提取的准确率在 97% 左右。在非整周期下,其相位差为 1.55°与 1.62°。相比较于其他 3 种方法,APFFT 对相位的提取最为稳定。而互功率法不管在整周期还是非整周期下,相位波动最大,最大可达到 7.59°。由 4 种方法在整周期提取与非整周期对比中可知,在模拟条件下,APFFT 法提取振动特征的精度和稳定性更优。

表 3 整周期对比  
Table 3 Full-cycle comparison

参数	方法			
	FFT 法	互相关分析法	互功率法	APFFT
幅值/μm	5.35	5.61	5.72	5.42
相位最大值/(°)	31.46	31.86	32.45	30
相位最小值/(°)	29.24	28.62	28.15	28.76
差值/(°)	2.22	3.24	4.3	1.24

表 4 非整周期对比  
Table 4 Non-full-cycle comparison

参数	方法			
	FFT 法	互相关分析法	互功率法	APFFT
幅值/μm	5.54	5.62	5.45	5.45
相位最大值/(°)	34.32	34.88	30.25	30.25
相位最小值/(°)	27.65	27.29	28.63	28.63
差值/(°)	6.67	7.59	1.62	1.62

### 3 高速主轴振动信号提取实验

本文搭建了主轴系统不平衡振动测试试验平台,如图 2 所示,平台由电机、主轴、计算机控制单元、振动传感

器、平衡装置等组成。本实验采用美国国家仪器公司(NI)的电涡流位移传感器和数据采集器采集主轴系统的振动位移信号。

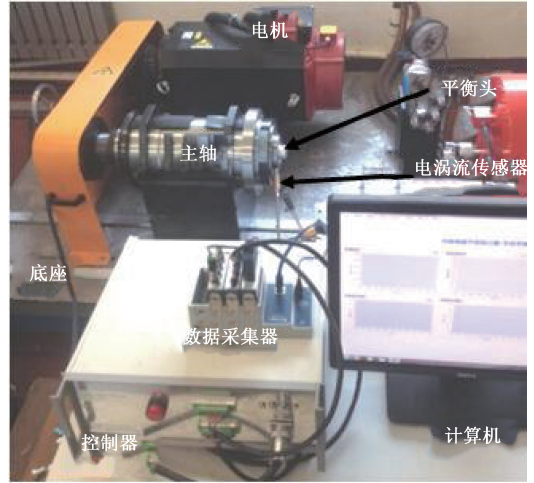


图 2 实验平台  
Fig.2 Experimental platform

实验过程分别采用 FFT 法、互相关分析法、互功率法及本文提出的 APFFT 法进行主轴系统振动信号特征提取。实验方案为在不平衡质量相位 60°时,分别在主轴系统外加 16.5、22 和 27.5 g·mm,3 种不平衡量进行振动信号幅值和相位的提取,主轴运转在 1 000~3 500 r/min 转速间,并以 500 r/min 为一个间隔采集振动信号,采集后的信号分别用上述 4 种方法提取,对比实验数据如图 3~8 所示。

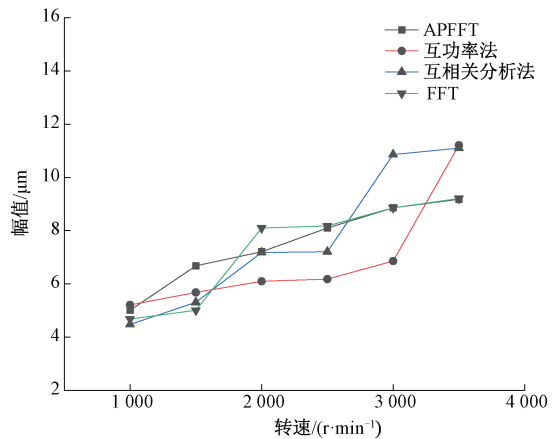


图 3 16.5 g·mm 不平衡量下的幅值  
Fig.3 Amplitude of 16.5 g·mm eccentric mass

通过将 APFFT 法运用到实验中,并且与其他 3 种振动信号的提取方法进行对比得到了幅值与相位的对比分析。从图 3~5 可以看出,随着转速的增加,4 种振动信号提取方法提取出的振动信号幅值都随之增加,而且都是



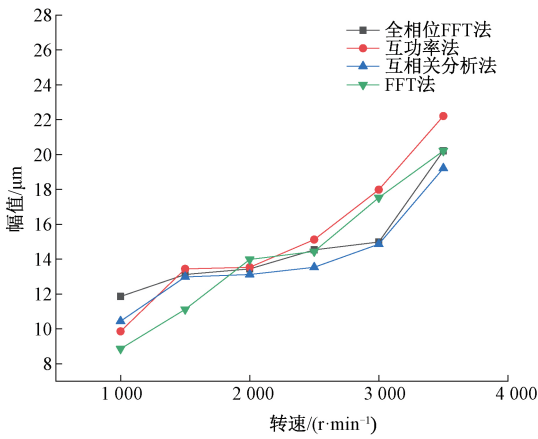


图4 22 g·mm 不平衡量下的幅值

Fig.4 Amplitude of 22 g·mm eccentric mass

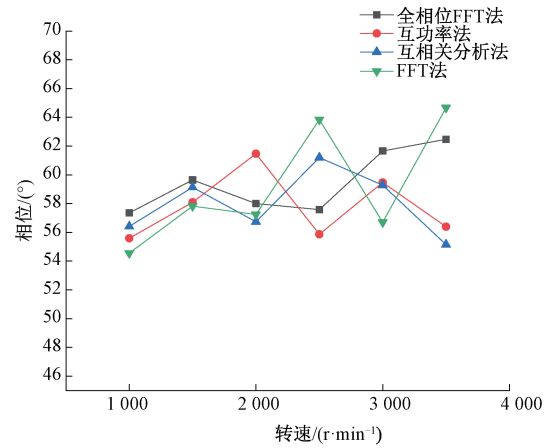


图6 16.5 g·mm 不平衡量下的相位

Fig.6 Phase of 16.5 g·mm eccentric mass

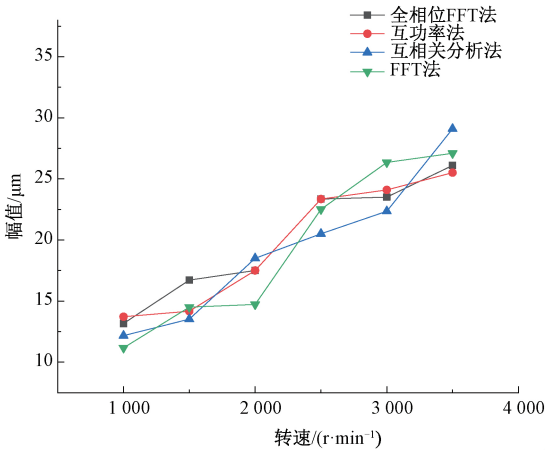


图5 27.5 g·mm 不平衡量下的幅值

Fig.5 Amplitude of 27.5 g·mm eccentric mass

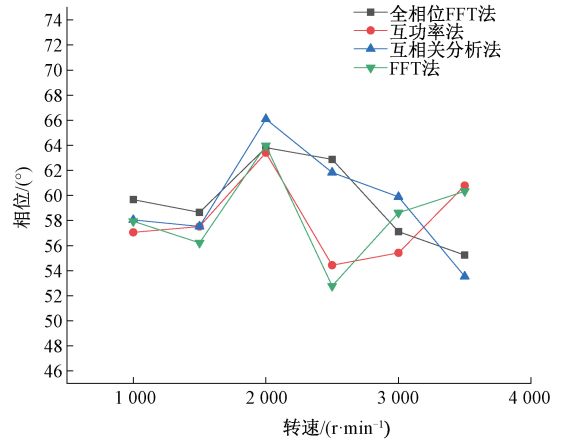


图7 22 g·mm 不平衡量下的相位

Fig.7 Phase of 22 g·mm eccentric mass

在一定的范围内波动。随着在高速主轴上添加的不平衡质量的增加,相同转速下的振动信号幅值也随之增加,并且幅值相差不多,由此可见 APFFT 法与其他方法都能准确获得主轴振动的幅值。

由图6~8 相位对比可以看出,4 种方法提取出的相位都分布在实验设定的 60°左右,然而 4 种方法在相位提取上的稳定性与准确性却截然不同,在不平衡量为 16.5 g·mm 时,APFFT 法、互功率法、互相关分析法、FFT 法相位的平均值分别为 59.45°、57.81°、58.55°、59.14°,标准差分别为 1.85、1.85、1.91、3.49;在不平衡量为 22 g·mm 时,相位平均值分别为 59.56°、58.11°、59.49°、58.31°,标准差分别为 2.79、2.87、3.60、3.19;在不平衡量为 27.5 g·mm 时,相位平均值分别为 60.57°、61.04°、62.14°、60.17°,标准差分别为 3.24、3.53、3.70、4.22。由此可见,APFFT 法提取主轴振动相位更准确,稳定性更好。

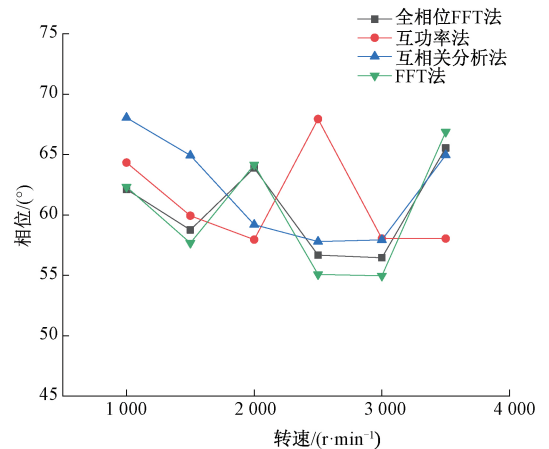


图8 27.5 g·mm 不平衡量下的相位

Fig.8 Phase of 27.5 g·mm eccentric mass

### 4 动平衡效果的对比实验

现在将 APFFT 与互相关法对主轴振动信号及动平衡效果进行对比。提取在主轴转速 2 000 r/min、试加质量为 8.5 g·mm 的幅值和相位。结果如图 9 和 10 所示。从图 9 可以看出,互相关法和 APFFT 提取主轴振动信号的幅值,都表现出较大的随机性,但都保持在大致相同的范围内。即 APFFT 在幅值处理上与互相关法比较接近。但从图 10 中得知,APFFT 在相位谱分析上具有稳定性的优势,原有的方法的相位在 30°左右分布,最后的平均值为 32.86°。而 APFFT 的相位谱分析非常稳定,在 50 s 内几乎呈一条直线,平均相位值 30.12°,相位提取准确率接近 96%。

输入,获得影响系数、校正质量、残余不平衡量等参数,主轴在线动测试平衡效果对比和实验数据如图 11 和表 5 所示。

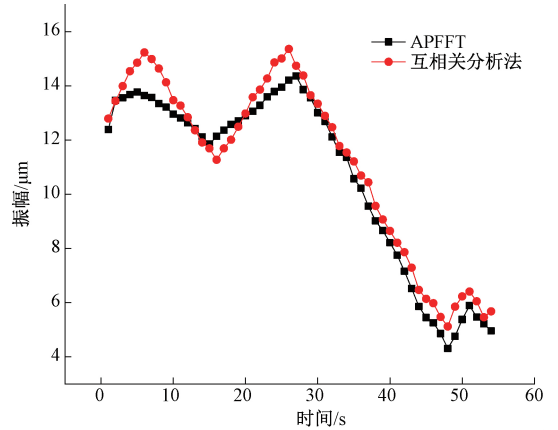


图 11 动平衡过程振动变化对比

Fig.11 Before and after balancing vibration amplitude

表 5 主轴动平衡实验数据

Table 5 Experiment data of spindle balancing

动平衡参数	APFFT	互相关分析法
初始不平衡量	13.39 μm ∠30°	14.79 μm ∠85°
试加配重	10 g ∠210°	10 g ∠265°
加重后不平衡量	5.36 μm ∠85°	5.84 μm ∠110°
校正配重	11.9 g ∠230°	15.1 g ∠345°
影响系数/(μm/(g·mm))	0.016 1 ∠337°	0.014 ∠260°

在线动平衡实验表明:APFFT 算法提取的振动信号作为影响系数法输入,振动的幅度明显减小,平衡精度达到 65.21%,残余平衡量低于互相关法获得值,不平衡振动得到有效抑制。由此可见,嵌入 APFFT 算法程序应用到动平衡软件中,各性能参数达到设计要求,在单平面动平衡过程效果理想,可将该测试系统应用到其他类似工况主轴动平衡中,并推广到高速主轴双面动平衡测试。

### 5 结 论

本文提出了一种基于全相位快速傅里叶变换的主轴振动特征提取方法,利用全相位快速傅里叶变换的频谱分析功能实现对信号相位和振幅的准确提取的方式,准确提取主轴振动的幅值和相位。分别与互相关法、快速傅里叶变化法及互功率法进行仿真及主轴振动特征提取实验对比,全相位快速傅里叶变换的主轴振动提取方法能够准确提取振动的幅值,提取相位的准确性更高,对主

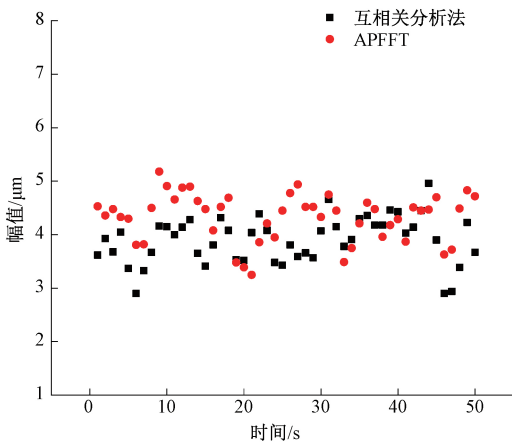


图 9 幅值对比

Fig.9 Amplitude contrast

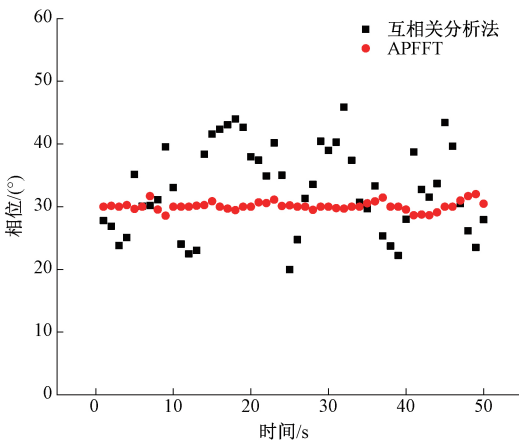


图 10 相位对比

Fig.10 Phase contrast

将利用互相关算法提取的振动信号和 APFFT 法提取振动信号分别作为影响系数法在线动平衡各项参数的

轴振动特征的准确提取和辨识,有助于对主轴不平衡振动进行有效抑制,提升主轴不平衡故障的诊断能力,为改善主轴系统的运行精度做了铺垫。

### 参考文献

- [1] CHEN D J, FAN J W, ZHANG F H. Extraction the unbalance features of spindle system using wavelet transform and power spectral density[J]. Measurement, 2013, 63(4): 1279-1290.
- [2] CHO S Y, BINSAEID S, ASFOUR S. Design of multisensor fusion-based tool condition monitoring system in end milling[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2010, 46(5-8): 681-694.
- [3] 李红延,周云龙,田峰,等.一种新的小波自适应阈值函数振动信号去噪算法[J].仪器仪表学报, 2015, 36(10): 2200-2206.
- LI H Y, ZHOU Y L, TIAN F, et al. Wavelet-based vibration signal de-noising algorithm with a new adaptive threshold function[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(10): 2200-2206.
- [4] DENKENA B, ORTMAIER T, AHRENS M, FISCHER R. Monitoring of grinding wheel defects using recursive estimation[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 75(5-8): 1005-1015.
- [5] KIM B S, LEE S H, LEE M G, et al. A comparative study on damage detection in speed-up and coast-down process of grinding spindle-typed rotor-bearing system[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 187: 30-36.
- [6] LAW L S, KIM J, LIEW W Y H, et al. An approach to monitoring the thermomechanical behavior of a spindle bearing system using acoustic emission (AE) energy[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2013, 14(7): 1169-1175.
- [7] 汤健,郑秀萍,赵立杰,等.基于频域特征提取与信息融合的磨机负荷软测量[J].仪器仪表学报, 2010, 31(10): 2161-2167.
- TANG J, ZHENG X P, ZHAO L J, et al. Soft sensing of mill load based on frequency domain feature extraction and information fusion[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2010, 31(10): 2161-2167.
- [8] XU J, ZHANG J J, WANG X, et al. Research on unbalance vibration signal de-noising of motorized spindle[J]. Journal of Vibroengineering, 2015, 17(4): 1684-1693.
- [9] ZHOU Y H, LI Y, LIU H J. Feature Enhancement method for drilling vibration signals by using wavelet packet multi-band spectral subtraction[J]. Strojnicki Vestnik-Journal of Mechanical Engineering, 2019, 65(4): 219-229.
- [10] 汪顺利,丁毓峰,王琳,等.基于LabVIEW的机床主轴振动测量与分析[J].组合机床与自动化加工技术, 2014(2): 32-35, 39.
- WANG SH L, DING Y F, WANG L, et al. Vibration signal measurement and analysis of machine spindle based on LabVIEW[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2014(2): 32-35, 39.
- [11] DONG F, YANG J C, GAO T Z, et al. The research and design of virtual spindle vibration test system[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 556-562: 2903-2905.
- [12] XIE Z J, SONG B Y, ZHANG Y, et al. Application of an improved wavelet threshold denoising method for vibration signal processing[J]. Advanced Materials Research, 2014, 889-890: 799-806.
- [13] 石明江,罗仁泽,付元华.小波和能量特征提取的旋转机械故障诊断方法[J].电子测量与仪器学报, 2015, 29(8): 1114-1120.
- SHI M J, LUO R Z, FU Y H. Fault diagnosis of rotating machinery based on wavelet and energy feature extraction[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2015, 29(8): 1114-1120.
- [14] 高荣,叶佩青,蒋克荣,等.基于小波奇异性的电主轴振动信号处理[J].吉林大学学报(工学版), 2010, 40(4): 1025-1028.
- GAO R, YE P Q, JIANG K R, et al. Vibration signal processing of motor spindle based on wavelet singularity[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2010, 40(4): 1025-1028.
- [15] 岳应娟,王旭,蔡艳平.内燃机变分模态 Rihaczek 谱纹理特征识别诊断[J].仪器仪表学报, 2017, 38(10): 2437-2445.
- YUE Y J, WANG X, CAI Y P. Internal combustion engine fault diagnosis based on identification of variational modal Rihaczek spectrum texture characterization[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(10): 2437-2445.
- [16] 余路,曲建岭,高峰,等.基于改进稀疏编码的微弱振动信号特征提取算法[J].仪器仪表学报, 2017, 38(3): 711-717.
- YU L, QU J L, GAO F, et al. Feature extraction of weak

- vibration signal based on improved sparse coding[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(3): 711-717.
- [17] 江志农,冯坤,高金吉. 相位补偿滤波方法在自动平衡系统中的应用[J]. 振动. 测试与诊断, 2006, 3: 234-239. JIANG ZH N, FENG K, GAO J J. Application of Phase Compensation Filter to Automatic Balancing[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2006, 3: 234-239.
- [18] 贺长波,李宏坤,赵新维,等. 基于总体最小二乘准则旋转不变子空间法的叶尖定时欠采样信号分析[J]. 机械工程学报, 2019, 55(19): 103-111. HE C B, LI H K, ZHAO X W, et al. Analysis method for under sampled blade tip-timing signal based on the rotational invariance technique with total least squares principle [J]. China Mechanical Engineering, 2019, 55(19): 103-111.
- [19] 周友行,李勇,章本毅,等. 钻削振动信号小波包分频谱减特征增强方法[J]. 振动. 测试与诊断, 2018, 38(6): 1211-1216, 1295. ZHOU Y X, LI Y, ZHANG B Y, et al. Feature enhancement method for drilling vibration signal by using wavelet packet division spectral subtraction[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2008, 38(06): 1211-1216, 1295.
- [20] 廖庆斌,李舜璐. 一种旋转机械振动信号特征提取的新方法[J]. 中国机械工程, 2006(16): 1675-1679. LIAO Q B, LI SH M. A novel method for feature extraction of rotating machinery vibration signals [J]. China mechanical engineering, 2006(16): 1675-1679.
- [21] 何俊,杨世锡,甘春标. 一类滚动轴承振动信号特征提取与模式识[J]. 振动. 测试与诊断, 2017, 37(6): 1181-1186, 1281. HE J, YANG SH X, GAN CH B. Feature extraction and pattern recognition of vibration signals in a rolling bearing[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2017, 37(6): 1181-1186, 1281.
- [22] 余路,曲建岭,高峰,等. 基于改进字典学习的单通道振动信号盲源分离算法[J]. 振动与冲击, 2019, 38(1): 96-102, 109. YU L, QU J L, GAO F, et al. Single channel blind source separation of vibration signals based on improved dictionary learning[J]. Journal of Vibration and Shock, 2019, 38(1): 96-102, 109.
- [23] 朱文龙,周建中,肖剑,等. 独立分量分析-经验模态分解特征提取在水电机组振动信号中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(29): 95-101, 14. ZHU W L, ZHOU J ZH, XIAO J, et al. An ICA-EMD feature extraction method and its application to vibration signals of hydroelectric generating units [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(29): 95-101, 14.
- [24] 赵莉华,丰遥,谢荣斌,等. 基于交叉小波的变压器振动信号幅频特征量提取方法[J]. 高电压技术, 2019, 45(2): 505-511. ZHAO L H, FENG Y, XIE R B, et al. Amplitude and frequency feature extraction for transformer vibration based on cross-wavelet transform [J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(2): 505-511.
- [25] 王鹏,王太勇,董靖川. 基于EEMD时频谱二值化的振动信号微弱特征提取方法[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2016, 49(7): 667-673. WANG P, WANG T Y, DONG J CH. Weak feature extraction of vibration signal based on binaryzation of EEMD time-frequency map [J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2016, 49(7): 667-673.
- [26] ZHANG S H, CAI Y J. A new double-face online dynamic balance device and its control system for high speed machine tool spindle [J]. Journal of Vibration and Control, 2016, 22(4): 1037-1048.
- [27] DUHAMEL P, VETTERLI M. Fast Fourier transforms: A tutorial review and a state of the art [J]. Signal Processing, 1990, 19(4): 259-299.
- [28] 李传江,费敏锐,张自强. 一种非平稳转速下不平衡信号提取方法[J]. 振动. 测试与诊断, 2016, 36(2): 390-395. LI CH J, FEI M R, ZHANG Z Q. Extraction method for unbalanced signal in non-stationary speed [J]. Vibration Testing and Diagnosis, 2016, 36(2): 390-395.
- [29] 赵妙颖,许刚. 基于经验小波变换的变压器振动信号特征提取[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(20): 63-69, 91. ZHAO M Y, XU G. Feature extraction for vibration signals of power transformer based on empirical wavelet transform [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(20): 63-69, 91.
- [30] 王展,朱峰龙,涂伟. 互相关法对主轴振动信号提取的研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2018, (2): 87-93. WANG ZH, ZHU F L, T W. The Spindle vibration signal

extracting research basing on cross-correlation algorithm[J].  
Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing  
Technique, 2018, (2):87-93.

## 作者简介



**王展**, 2008 年于东北大学获得学士学位, 2010 年于东北大学获得硕士学位, 2014 年于东北大学获得博士学位, 现为沈阳建筑大学副教授、硕士生导师, 主要研究方向为转子动平衡、旋转机械故障诊断。

E-mail: juven1126@163.com

**Wang Zhan** received his B. Sc. degree, M. Sc. degree, and Ph. D. degree all from Northeastern University in 2008, 2010 and 2014, respectively. He is currently an associate professor and

a master advisor at Shenyang Jianzhu University. His main research interests include rotor dynamic balancing and fault diagnosis of rotating machinery.



**杜思远**(通信作者), 2018 年于沈阳建筑大学获得学士学位, 现为沈阳建筑大学机械工学院研究生, 主要研究方向为转子动平衡。

E-mail: 1064977879@qq.com

**Du Siyuan** (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Shenyang Jianzhu University in 2018. He is currently a M. Sc. student in the School of Mechanical Engineering at Shenyang Jianzhu University. His main research interests include rotor dynamic balancing.