

DOI: 10.7652/xjtuxb201311017

分数阶域滤波在启停车过程 转频振动分量提取中的应用

张西宁, 郭金良, 吴吉利

(西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 针对启停车过程中振动信号倍频分量对转频分量幅值和相位的影响问题, 提出了一种基于分数阶域滤波提取转频振动分量的方法。该方法把分数阶傅里叶变换引入到回转机械启停车过程振动信号的预处理中, 消除其他倍频振动分量的影响, 提取出反映失衡信息的转频分量。仿真信号和实验测试信号的分析结果表明, 与其他方法相比, 分数阶域滤波更适合处理启停车过程的振动信号, 能够有效地去除倍频和噪声信号的干扰, 提取出平整的转频振动分量。该算法简单, 易实现, 为回转机械失衡信息的预处理提供了一种有力手段。

关键词: 分数阶傅里叶变换; 滤波; 启停车过程; 回转机械

中图分类号: O329 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2013)11-0092-05

Extracting Fundamental Frequency During Rotating Machine Start-Up or Shut-Down via Fractional Domain Filtering

ZHANG Xining, GUO Jinliang, WU Jili

(State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To investigate the influences of harmonic components on amplitude and phase of fundamental frequency during rotating machine start-up or shut-down, a method for extracting the fundamental frequency component by fractional Fourier transformation is proposed, and the fundamental frequency component in vibration signal is extracted on a rotor test rig. Compared with the other methods, the fractional domain filtering enables to effectively remove the interference from harmonic components for extracting smooth fundamental frequency components during start-up or shut-down. The proposed method is applicable to preprocess of unbalancing information of rotating machines.

Keywords: fractional Fourier transformation; filtering; rotating machine; start-up or shut-down

启停车过程中回转机械经历了一个非稳态运行过程, 该过程的振动信号中包含了丰富的机组状态信息, 提取和利用这些信息对机组的监测和诊断具有重要作用。例如, 回转机械启停车过程中振动信号转频分量的伯德图和奈奎斯特图直接反映了转子的失衡状态, 对转子的动平衡提供了依据。

由于实际启停车过程中的振动信号包含了转频分量及各阶倍频分量, 所以需要滤除影响失衡信息的倍频分量。传统的提取转频分量的方法采用复杂的转速检测和锁相环电路, 对启停车过程中的振动信号进行实时跟踪滤波, 以去除低频和高频的干扰, 从而得到振动信号中的转频分量^[1-3]。该方法对跟

收稿日期: 2013-04-08。 作者简介: 张西宁(1965—), 男, 教授, 博士生导师。 基金项目: 国家重点基础研究发展规划资助项目(2009CB724405)。

网络出版时间: 2013-09-06

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20130906.1706.014.html>

踪滤波频带的选取是根据前一转转速的检测结果设定的,因此在转速剧烈变化时跟踪滤波频带的设定往往与实际转速存在差异,影响了该方法的效果。盖广洪提出了一种采用经验模式分解(EMD)启停车过程振动信号的分解方法^[4],该方法通过分解得到转频分量和各阶倍频分量。EMD 分解完全是在时域内自适应进行的,尽管分解的固有模式分量在时域内是连续的,但很难保证各模式分量在频域内也是连续的。因此,当回转机械在启停车过程中的转速变化范围较大时,整个过程中的转频或倍频分量就很难保证分解到各自的固有模式分量中。

1980 年, Namias 从特征值和特征函数的角度提出了分数阶傅里叶变换的概念,将其定义为传统傅里叶变换的分数幂形式,并用于微分方程的求解^[5],但分数阶傅里叶变换在信号处理领域的物理意义一直没有获得解释,因此不能在工程应用问题中得到应用。直到 1993 年, Ameida 认为分数阶傅里叶变换可以理解为时频平面的旋转,分数阶傅里叶变换才被逐渐用于对电信号的处理,但相关的研究成果依然不多。本文在介绍分数阶傅里叶变换的基础上,提出了一种启停车过程转频振动分量的提取方法,为启停车过程振动信号转频振动分量的提取提供了一种新的手段。

1 分数阶傅里叶变换

设函数 $f(t)$ 的分数阶傅里叶变换为 $F^p f(t)$, 将分数阶傅里叶变换定义^[6]为

$$F^p f(t) = \int_{-\infty}^{\infty} K_p(t, u) f(u) du \quad (1)$$

$$K_p(t, u) =$$

$$\begin{cases} A_\alpha \exp[j\pi(u^2 \cot\alpha - 2ut \csc\alpha + t^2 \cot\alpha)], & \alpha \neq n\pi \\ \delta(t - u), & \alpha = n\pi \\ \delta(t + u), & \alpha = (2n + 1)\pi \end{cases} \quad (2)$$

$$A_\alpha = \frac{\exp[-j\pi \operatorname{sgn}(\sin\alpha)/4 + j\alpha/2]}{|\sin\alpha|^{1/2}} \quad (3)$$

式中: p 为分数阶傅里叶变换的阶数, 可以为任意实数; α 为坐标旋转角度; n 为正整数; $K_p(t, u)$ 为分数阶傅里叶变换的变换核; u 为分数域坐标。

传统傅里叶变换是一种线性算子, 可认为从时间轴 t 逆时针旋转 $\pi/2$ 到频率轴 ω , 因此任意 p 阶次的分数阶傅里叶变换算子, 可认为是将 (t, ω) 平面旋转角度 $\alpha = p\pi/2$ 到 (u, v) 平面的算子, 如图 1 所示。

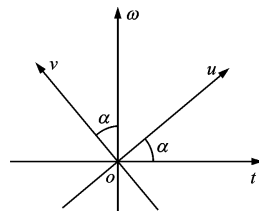


图 1 坐标平面旋转示意图

由于在时频平面上 t, ω 的量纲不同, 所以在进行分数阶傅里叶变换前, 必须先对频率和时间进行归一化处理。设原始信号在时间轴和频率轴上都是紧凑的, 信号的时宽和频宽分别为 Δt 和 Δf , 其时域限定在 $[-\Delta t/2, \Delta t/2]$, 频域限定在 $[-\Delta f/2, \Delta f/2]$ 内。设 S 是一个时间尺度因子, 新的尺度化坐标^[6-7]为

$$u = t/S; \quad v = fS$$

新坐标系 (u, v) 实现了归一化, 且在新的坐标下信号被限定在 $[-\Delta u/2, \Delta u/2]$ 和 $[-\Delta v/2, \Delta v/2]$ 内。为使 2 个区间的长度相等, 则

$$\Delta u = \Delta v \Rightarrow \Delta t/S = \Delta f S \Rightarrow S = (\Delta t/\Delta f)^{1/2}$$

$$\Delta u = (\Delta t \Delta f)^{1/2}$$

归一化后的采样间隔为 $1/\Delta u$, 采样点数 $N = (\Delta u)^2$ 。

实际中, 若离散信号的观测时间和采样频率分别为 T 和 f_s , 则直接取 $\Delta t = T, \Delta f = f_s$, 信号在时域和频域分别被限定在区间 $[-T/2, T/2]$ 和 $[-f_s/2, f_s/2]$ 内, 此时归一化时间尺度因子和归一化宽度分别为

$$\left. \begin{aligned} S &= (\Delta t/\Delta f)^{1/2} = (T/f_s)^{1/2} \\ \Delta u &= (\Delta t \Delta f)^{1/2} = (T f_s)^{1/2} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

2 转频振动分量提取原理

由分数阶傅里叶变换的定义可知, 分数阶傅里叶变换是将信号在一组正交的线性调频信号上展开, 线性调频信号的某一阶次分数阶傅里叶变换将是一个 δ 函数, 因此在该阶次的分数阶傅里叶变换域中线性调频信号具有很好的能量聚焦特性。如果能找到相应的分数阶次, 通过在该分数阶域的滤波, 能够很好地提取和分离线性调频信号。

回转机械启停车过程中转速逐渐增加或减小, 如果考虑转频振动和各倍频振动, 启停车过程振动信号可近似认为是多个线性调频信号之和。利用分数阶傅里叶变换以及分数阶域滤波, 就可从启停车过程的振动信号中提取与失衡相关的转频分量响应。

如图 2 所示, 设启停车过程的机组从零转速开

始,匀加速启动,升速率即调频率为 f_{m_i} , 表现为在时频平面上沿经过原点斜率为 f_{m_i} 的 PQ 方向上的直线分布。坐标 (t, f) 绕原点逆时针旋转 α 后得到新的坐标 (u, v) , 两平面坐标间的关系为

$$\begin{cases} t = u \cos \alpha - v \sin \alpha \\ f = u \sin \alpha + v \cos \alpha \end{cases} \quad (5)$$

根据分数阶傅里叶变换模值与时频分布间的关系,当积分直线与 PQ 方向的 $f - f_{m_i} t = 0$ 重合时,信号的分数阶傅里叶变换将会在初始频率 f_i 、 u_i 为 0 处出现峰值,这时 $f_{m_i} = -\cot \alpha$, 考虑到启停车过程一般是从盘车开始启动,这时转频振动信号的模值在时频平面的分布不经过原点。设分数阶傅里叶变换的峰值出现在 u 域上的 u_i 点, f_i 和 u_i 的关系式为

$$f_i = \frac{u_i}{\cos[\arctan(f_{m_i})]} \quad (6)$$

由 f_{m_i} 就可确定启车转频振动信号聚焦时的 α 和 p 。对在分数阶域启车转频振动信号聚焦在以 u_i 为中心的区域,选择以 u_i 为中心做带通滤波,再对滤波后的信号进行 $-p$ 阶的分数阶傅里叶变换,就可得到启车过程的转频振动信号。

实际处理过程中,对上述公式中的 f_i 、 f_0 和 f_{m_i} 等应先进行归一化处理,然后再进行计算。归一化后 f'_{m_i} 、 f'_0 和 u_i 点的值与实际量值间的关系为

$$f'_{m_i} = f_{m_i} T / f_s \quad (7)$$

$$f'_0 = f_0 (T / f_s)^{1/2} \quad (8)$$

$$f_i = f'_i (f_s / T)^{1/2} = \frac{u_i}{T \cos[\arctan(f'_{m_i})]} \quad (9)$$

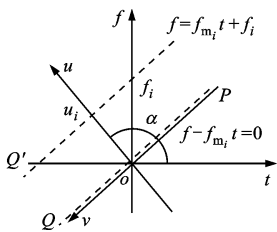


图2 启车振动信号在时频平面上的分布

3 仿真调频信号分析

设观测到的启车过程调频振动信号的幅值 $A=10$ mV, $f_0=5$ Hz, $f_m=5$ Hz/s, $T=2$ s, $f_s=200$ Hz, 干扰信号为加性高斯白噪声, 信噪比为 3 dB, 信号波形如图 3 所示。为了得到对仿真调频信号具有聚焦性的分数阶傅里叶变换的阶次, 根据信号的升速率计算得到所对应的变换阶次为 $-0.968\ 195$ 。对加噪声的信号做 $-0.968\ 195$ 阶分数阶傅里叶变换, 结果如图 4 所示。图 4 上 $u_i=0.975$

处有一明显的峰值, 据此可确定信号的初始频率 $f_i=4.81$ Hz。以 $u_i=0.975$ 为中心进行带通滤波, 对滤波信号进行 $0.968\ 195$ 阶的傅里叶变换, 得到的消噪后的调频振动信号如图 5 所示。由图 5 可看出, 分数阶域滤波消除了原始信号中的噪声, 除了开始和结束部分受端点效应影响外, 其余部分基本反映了启车过程的转频振动信号。因此, 分数阶域滤波不仅能消除信号中的噪声, 而且可提取其中包含的转频振动信号。

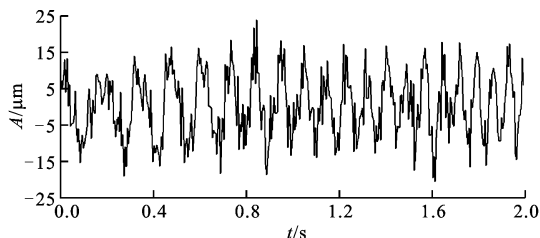


图3 加噪声的信号波形图

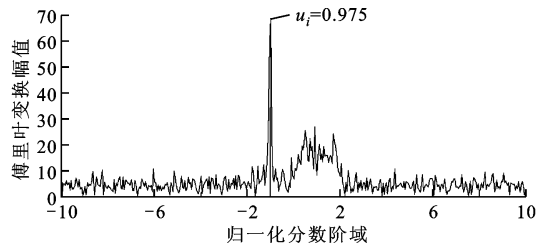


图4 加噪声信号的分数阶傅里叶变换结果

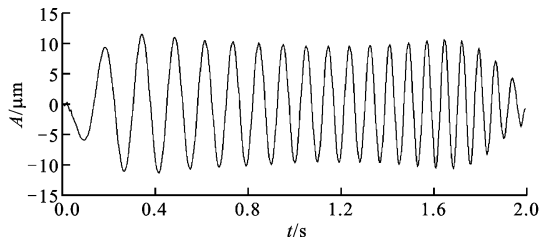


图5 消除噪声后的调频信号

4 实验及转频振动分量提取

实验采用美国内华达 Bently 公司的 Rotor kit-4 型实验台, 测量启车过程的振动信号, 实验台的结构如图 6 所示。实验台的转速为 $0 \sim 10\ 000$ r/min, 最高升速率为 ± 250 r/(min · s)。实验台转速控制器为闭环控制方式, 可方便实现均匀升、降速, 当转速达到设定的最高转速时, 实验台自动变为恒转速稳定运行。启车过程转子振动信号采用电涡流传感器测量, 它们分别安装在联轴节端和自由端的 X 、 Y 方向上。测量键相信号的电涡流传感器安装在电机与轴间的柔性联轴节处, 采用阿尔泰公司 USB2001

型数据采集器进行数据采集。

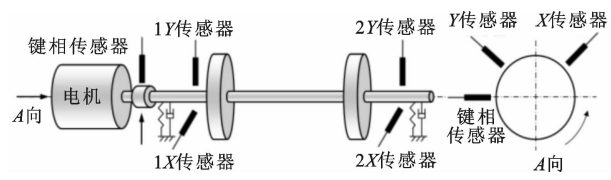


图 6 转子实验台结构及传感器布置图

实验中,设定转子实验台的初始转速为 200 r/min,最高转速为 4 000 r/min,升速率为 195 r/(min · s)。数据采集频率为每通道 24 kHz,数据采集长度为 460 000。测量的启车过程联轴节端 Y 方向的振动信号如图 7 所示,从图上可以看出,在 5.5 s 处振动波形有比较大的幅值波动。

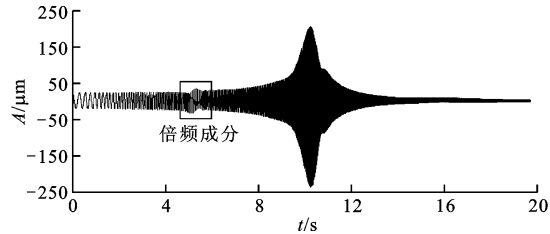


图 7 启车过程联轴节端 Y 方向的振动信号

工作中比较常用的对非稳态信号滤波的一种处理方法为跟踪滤波,本文先对联轴节端 Y 方向的振动信号进行跟踪滤波,滤波后的波形如图 8 所示。从图 8 可以看出,在 1.5 s 处振动波形存在一定的失真度,同时在 8~12 s 处波形有振动引起的毛刺,因为跟踪滤波的过程是对每段截取信号的近似快速傅里叶变换,所以跟踪滤波后的数据对准确提取转子失衡故障有一定的影响。

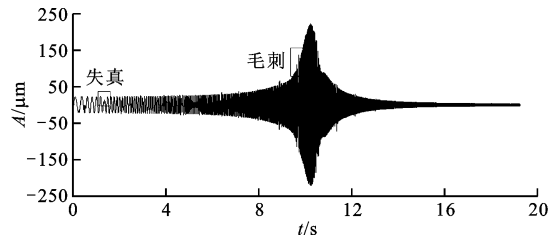


图 8 跟踪滤波提取到的转频分量

为了较准确地得到启车过程中的转频振动分量,本文采用分数阶域滤波。根据实验设定的升速率为 195 r/(min · s),计算得到的 $p = -0.998\ 3$, $\alpha = -89.897^\circ$,对联轴节端 Y 方向的振动信号进行 $-0.998\ 3$ 阶傅里叶变换的结果如图 9 所示。从图 9 可看出,启车过程中的振动信号在 $u_i = -0.203\ 5$ 处出现谱峰,因此可估计出初始转速为 214.8 r/min。以 u_i 为中心进行带通滤波,以 $p = 0.998\ 3$ 阶作分数阶

傅里叶变换,滤波后的启车过程转频振动分量如图 10 所示。滤波后振动信号很好地保留了转频振动分量在过临界转速时,转频强迫振动与激励伴随振动共同形成的幅值振荡特征,明显消除了二倍频振动分量在半临界转速时刻产生的二倍频振动分量共振的影响。图 11 给出了滤波后的转频振动信号与原始振动信号的局部放大的对比,可以看出滤波后信号完全消除了原始信号(虚线)上的二倍频振动分量。比较图 8、图 10 的振动波形可以看出,分数阶傅里叶变换滤波之后的波形没有毛刺突起,线型更加光滑,从而为后续数据分析提供了指导。

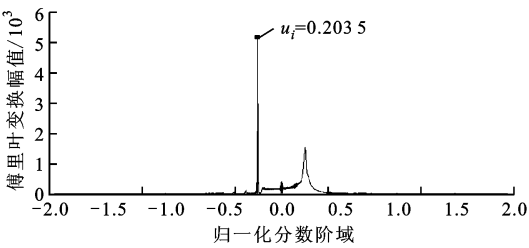


图 9 $-0.998\ 3$ 阶的傅里叶变换结果

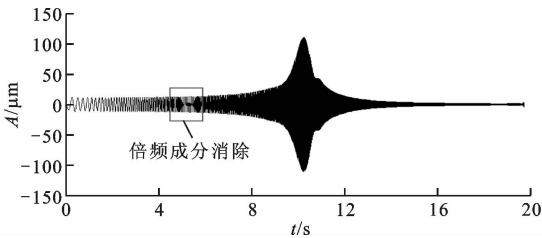


图 10 分数阶域滤波提取到的转频振动分量

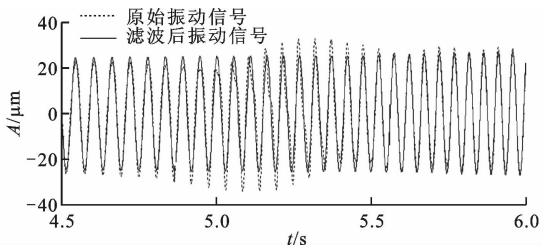


图 11 原始信号与滤波信号的局部比较

5 结 论

本文将分数阶域滤波引入到回转机械启停车过程的振动信号处理中,通过 p 阶分数阶傅里叶变换将转频信号分解到各相互正交的线调频基上,各阶次分量在相应分数阶域具有良好的能量聚焦特性,带通滤波后可以有效分离转频分量及各阶倍频分量。仿真信号分析表明,分数阶域滤波能够消除叠加的加性白噪声,突出主要的转频振动信号特征,提高信噪比。同时,转子启车转频信号的提取效果表

明,相对于传统的跟踪滤波算法,分数阶域滤波更能有效地消除转频二倍频的干扰,提取出的转频信号波形特征更加光滑且无毛刺,达到了预处理目的。本文的研究为回转机械启停车过程振动信号的处理,以及失衡信息的预处理提供了一种有力手段。

参考文献:

- [1] 陈照章. 跟踪滤波器的设计及其应用 [J]. 仪器仪表学报, 2001, 22(3): 244-246.
CHEN Zhaozhang. The design and application of tracking filter [J]. Chinese Journal of Science Instrument, 2001, 22(3): 244-246.
- [2] 邵元兴. 窄频跟踪滤波器的设计及应用 [J]. 浙江丝绸工学院学报, 1994, 11(2): 43-46.
SHAO Yuanxing. The design and application of narrowband tracking filter [J]. Journal of Zhejiang Institute of Silk Textiles, 1994, 11(2): 43-46.
- [3] 刘健, 潘双夏, 杨克己, 等. 动平衡机用数字跟踪滤波器实现方法研究 [J]. 仪器仪表学报, 2005, 26(4): 433-436.

- LIU Jian, PAN Shuangxia, YAN Keji, et al. Research on digital tracking filter method of balancing machines [J]. Chinese Journal of Science Instrument, 2005, 26(4): 433-436.
- [4] GAI Guanghong. The processing of rotor startup signals based on empirical mode decomposition [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2006, 20(1): 222-235.
- [5] NAMIAS V. The fractional order Fourier transform and its application to quantum mechanics [J]. Journal of Applied Mathematics, 1980, 25(3): 241-265.
- [6] 陶然, 邓兵, 王越. 分数阶 Fourier 变换在信号处理领域的研究进展 [J]. 中国科学: E 辑 信息科学, 2006, 36(2): 113-136.
TAO Ran, DENG Bing, WANG Yue. The research progress of fractional Fourier transform in the field of signal processing [J]. Science in China: Series E Information Sciences, 2006, 36(2): 113-136.
- [7] 郭斌. 分数阶 Fourier 变换的基本原理与应用 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2006.

(编辑 管咏梅)

(上接第 69 页)

- [3] MEI Xuesong, TSUTSUMI M, TAO Tao, et al. Study on the compensation of error by stick-slip for high precision table [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2004, 44(5): 503-510.
- [4] OLSSON H, ÅSTRÖM K J, WIT D L, et al. Friction models and friction compensation [J]. European Journal of Control, 1998(4): 176-195.
- [5] IWASAKI M, SHIBATA T. Disturbance observer based nonlinear friction compensation in table drive system [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 1999, 4(1): 3-8.
- [6] ERKORKMAZ K, ALTINTAS Y. High speed CNC system design: Part II Modeling and identification of feeddrives [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2001, 41(10): 1487-1509.
- [7] KIM H Y, FRANK L. Reinforcement-adaptive learning neural-net-based friction compensation control for high speed and precision [J]. IEEE Trans on Control Systems Technology, 2000, 8(1): 118-126.
- [8] IWASAKI M, TAKEI H. GMDH-based modeling and feedforward compensation for nonlinear friction in table drive systems [J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2003, 50(6): 1172-1178.
- [9] 冯斌, 梅雪松, 孙挪刚. 一种数控机床伺服系统摩擦误差补偿方法: 中国, CN201210563651.2 [P]. 2012-

- 12-22.
- [10] SPECHT D F. A general regression neural networks [J]. IEEE Trans on Neural Networks, 1991, 2(6): 568-576.

[本刊相关文献链接]

- 张鸿, 赵桐, 贺郁, 李浩, 程军. 一种低功耗跨导电阻电容型镜像抑制复数滤波器. 2013, 47(8): 80-86. [doi: 10.7652/xjtuxb201308014]
- 李亚超, 周瑞雨, 全英汇, 邢孟道. 采用自适应背景窗的舰船目标检测算法. 2013, 47(6): 25-30. [doi: 10.7652/xjtuxb201306005]
- 陈彬强, 张周锁, 郭婷, 孙闯, 张杰, 何正嘉. 双树复小波时频构造在齿轮系装配间隙检测的应用. 2013, 47(3): 7-12. [doi: 10.7652/xjtuxb201303002]
- 杜飞, 洪军, 李宝童, 罗增, 许颖. 结合面参数的超声检测方法研究. 2013, 47(3): 18-23. [doi: 10.7652/xjtuxb201303004]
- 薛士明, 曹军义, 林京, 陈阳泉. 分数阶阻尼裂纹转子的非线性动力学特性分析. 2012, 46(1): 76-80. [doi: 10.7652/xjtuxb201201014]
- 续丹, 雒维强, 房念兴, 曹秉刚. 永磁同步电机分数阶与滑模变结构复合控制研究. 2012, 46(5): 132-136. [doi: 10.7652/xjtuxb201205023]

(编辑 管咏梅)