

# 小波与傅里叶变换耦合的静电监测信号去噪法

钱颖雪, 左洪福, 李耀华

(南京航空航天大学 民航学院, 江苏 南京 210016)

**摘要:**针对航空发动机气路静电监测信号微弱、背景噪声大、信噪比低、信号特征难以提取的问题,根据傅里叶变换和小波阈值降噪理论,提出了小波分解与傅里叶变换耦合的滤波法,并与常规的陷波器消噪法、小波阈值消噪法进行了对比研究。模拟实验结果显示小波分解与傅里叶变换耦合的滤波效果明显优于其他两种方法,将该方法用于发动机气路模拟实验采集的监测信号处理,结果表明:小波分解与傅里叶变换耦合的滤波法适合对航空发动机模拟气路静电监测信号做滤波处理,可以用来提取异常信号发生的位置。

**关键词:**航空发动机;静电监测;降噪;小波变换;信噪比

**中图分类号:** TN911.7

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1673-629X(2009)07-0001-03

## Static Monitoring Signal De-noising by Wavelet and FFT

QIAN Ying-xue, ZUO Hong-fu, LI Yao-hua

(College of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** Aero-engine gas path monitoring signal was characteristic in weak amplitude, strong noise, low SNR and was difficult to extract. In order to solve these problems, wavelet transform and FFT filter was constructed and compared with conventional methods like the notch filter and the wavelet threshold de-noising. The simulation results showed that wavelet transform and FFT filter can de-noise signal more efficiently than others. Finally used the method in aero-engine gas path simulation experiment and concluded: wavelet transform and FFT filter can be used to extract the sharp edge and process the monitoring signal of aero-engine gas path system.

**Key words:** aircraft engine; static monitoring; de-noise; wavelet transform; SNR

## 0 引言

航空发动机气路颗粒静电监测技术是一种新的状态监测方法,该方法基于静电感应的原理,监测发动机气路颗粒静电信息<sup>[1-4]</sup>,解决了其他类型传感器无法在气路高温环境下工作的难点,而且能够在故障早期给出预警信息,由于其监测对象是气路高温密闭环境下的异常带电颗粒,信号具有噪声大、信噪比极低的特点,因此对监测到的静电监测信号进行滤波和处理,从感应信号中分辨出异常颗粒是实现静电方法监测气路状态与故障诊断的关键技术之一。

文中在自行搭建的气路监测模拟实验台上,进行了高温燃烧环境下发生气路故障的模拟实验,使用自制的探针式静电传感器采集了静电感应信号,针对信

号幅值小、噪声强、工频干扰明显、微弱的故障信息被淹没等特点,根据傅里叶变换和小波阈值降噪理论,提出了小波分解与傅里叶变换耦合的滤波法。该方法与传统的陷波器法<sup>[5]</sup>、小波阈值消噪法<sup>[6]</sup>对比,在时、频域均能很好地达到滤波目的。最后通过仿真信号和实验信号验证,计算信噪比和均方根误差,证明了小波分解与傅里叶变换耦合滤波法对静电监测信号处理的有效性。

## 1 小波分解与傅里叶变换耦合的滤波法基本原理

传统的信号分析与处理的方法——傅里叶变换法,对于频谱不随时间变化的确定性信号以及平稳随机信号是十分有效的,在学术界和工程界都得到了广泛应用。但是在实际的工程应用中,所分析的信号可能包含许多尖峰或者突变部分,由于这种非平稳信号和时变信号的谱特性很宽,利用傅里叶的基函数很难与其匹配,并且信号频谱中的任一频率分量都是对信号在整个时域定义区间上的傅里叶积分求和,利用傅

收稿日期:2008-10-26;修回日期:2009-01-15

基金项目:国家“863”计划(2006AA042427);国家自然科学基金委员会与中国民用航空总局联合资助项目(60672164)

作者简介:钱颖雪(1984-),女,江苏无锡人,硕士研究生,从事航空发动机状态监测技术研究;左洪福,教授,博士生导师,研究方向为可靠性工程、维修理论、故障诊断与监控等。

里叶变化分析这些突变信号的频谱时,无法有效地反映这些信号在某些瞬间的突变。而以小波变换为基础的处理方法在获得高的信噪比增益的同时,能够保证对信号突变信息的良好分辨,因此对非平稳信号处理有其自身的优越性。但是当信号中有很强的背景噪声时,这种优越性会被大大的削弱(如图 1 所示)。例如,假设加载在信号上的噪声为高斯白噪声,将两者合成即为含噪声的待检测信号:

$$s(i) = f(i) + \sigma \cdot e(i), i = 0, \dots, n-1 \quad (1)$$

其中,  $f(i)$  为真实信号,  $s(i)$  为含噪声的信号,  $e(i)$  为高斯白噪声  $N(0,1)$ 。

信号  $x(i)$  的小波变换为:

$$WT_s(b, a) = a^{1/2} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \Psi^* \left( \frac{t-b}{a} \right) dt \quad (2)$$

$s(i)$  经 DWT 处理后可以表述为:

$$DWT(s) = DWT(f + \sigma \cdot e) \quad (3)$$

式中,  $DWT(\cdot)$  表示对括号内的信号进行离散小波变换处理。根据文献[7],式(3)可以写为:

$$DWT(s) = DWT(f) + \sigma \cdot e \quad (4)$$

即离散小波分解后,高斯随机白噪声的分解结果仍然为高斯随机噪声。

小波分解与傅里叶变换耦合滤波法的思想是将小波分析法与傅里叶分析法结合起来。对被分析信号做小波分解后,区分突变信号和随机噪声所在的频段。对于主要噪声(工频干扰)采用傅里叶分析法计算其小波系数所在的点数然后置零去除;对于随机噪声,采用门限阈值处理,移去噪声再重构信号。这种算法直观、易实现并且针对性强,可以作为一个信号处理工具应用于航空发动机气路颗粒静电监测技术。由于监测信号受工频干扰大,采用傅里叶分析法直接将干扰频率去除,使得有微弱的有用信号易于提取,在这个基础上,用小波进行信号的消噪可以很好地保留有用信号中的尖峰和突变部分,采用基于 Stein 的无偏似然估计(二次方程)原理自适应选择阈值,对相应的小波系数做软阈值处理。这种方法可以将背景噪声去除,将监测信号中的重要特征信息与噪声区分出来。

## 2 计算机仿真结果分析

为了得到各种处理方法的滤波效果,在 Matlab 环境下进行仿真实验。根据对静电感应信号信噪比极低、工频干扰大、信号难以提取等特征,产生三个低频(48Hz、50Hz、52Hz)正弦信号叠加,其中 50Hz 信号幅值为 2mV,其他两个频率信号幅值为 1mV,在 3、3.5、4 秒处分别加入幅值为 10mV 的脉冲,得到信号 S, S0 为在 S 中加入信噪比为 -7dB 白噪声后得到的信号, S1、

S2、S3 分别为用陷波器去工频法、小波阈值消噪法和小波分解与傅里叶变换耦合滤波法对信号 S0 处理后的信号。时、频域效果对比图分别如图 1、2 所示(由于信号都集中在低频,所以频域图只给出到 100Hz)。

从图 1 可以看出,小波阈值法效果并不太明显,陷波器法虽然有一定效果但是噪声仍很大,有用信号并没有完全提取出来,而小波分解与傅里叶变换耦合的滤波法效果非常明显。从图 2 可以看出,除了小波阈值消噪法,其他方法都能有效滤去 50Hz 工频干扰信号,并且另外两个特征频率被保留下来,说明了滤波方法的有效性。

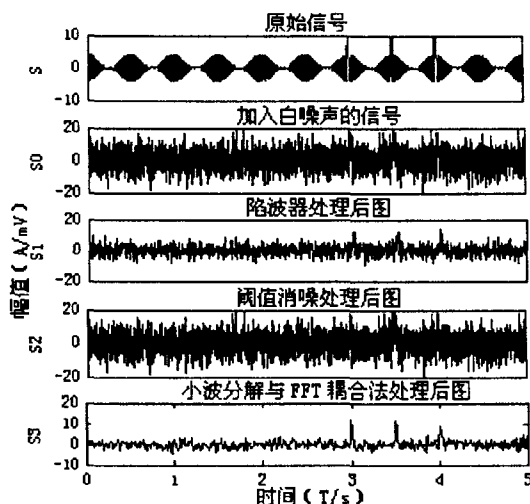


图 1 各种方法处理仿真信号时域效果对比图

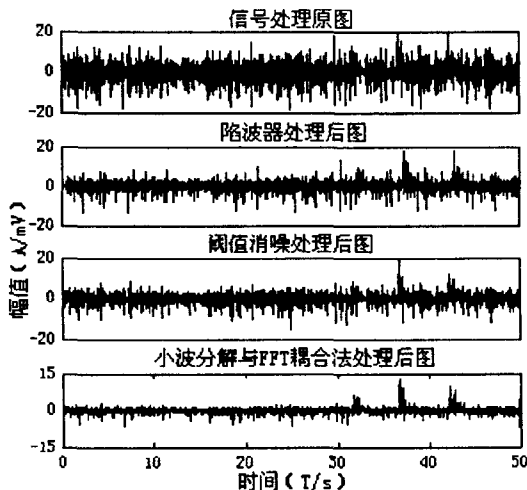


图 2 各种方法处理仿真信号频域效果对比图

## 3 实验信号分析

三种滤波方法的有效性在仿真信号上得到了验证,为了证明其在实测信号上的有效性,对在自行构建的模拟航空发动机静电监测实验台上采集到的信号进行实验分析。该实验台使用航空煤油作为燃料,采用

燃油燃烧器、风机、不锈钢管道、压缩机来模拟发动机燃烧产生的尾气以及碳烟颗粒,使用静电喷粉器来模拟气路部件性能衰退或发生故障时产生的荷电颗粒物。信号采集系统主要由自制的探针式静电传感器、信号调理系统、数据采集系统、计算机构成。前期大量的实验表明感应信号频率较低,因此在实验过程中所用的采样频率均为 1kHz。用高温实验模拟发动机气路环境,启动实验系统,数据采集系统开始记录数据,燃油燃烧器在 18 秒后点火,经历约 20 秒后,燃烧趋于稳定。在实验启动大约 90 秒后,每隔 5 秒用静电喷粉器向管内喷入铁粉,共三次。整个实验过程持续约为 110 秒。实验记录的全过程信号如图 3 所示。

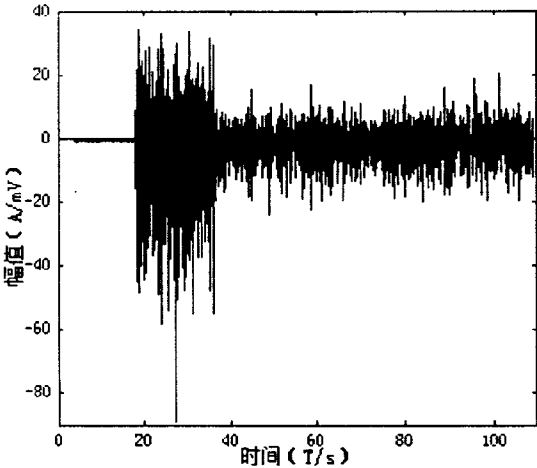


图 3 高温实验全过程信号图

由于 40s 之前都是点火阶段,此阶段对于本实验系统研究意义不大,在对信号滤波处理的时候,本段信号均不作处理。用三种滤波方法处理信号后时域效果如图 4 所示。

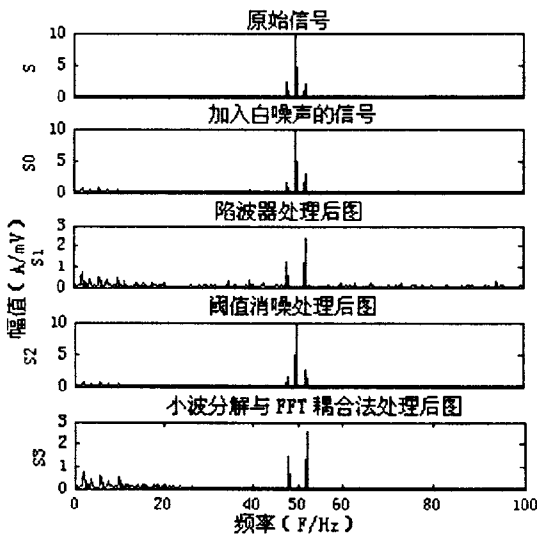


图 4 各种滤波方法效果对比图

对于同一个含噪信号,经处理后得到的 RMSE(均

方根误差)越小,SNR(信噪比)越大消噪效果越好<sup>[8]</sup>。文中所使用的参数定义形式分别为:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X}_i)^2} \tag{5}$$

$$SNR = 10 \log \left( \frac{\sum_{i=1}^N SS_i^2}{\sum_{i=1}^N NN_i^2} \right) \tag{6}$$

式中, $X_i$ 为原始信号在取样点*i*的幅值, $\bar{X}_i$ 为消噪后的信号在位置*i*的幅值, $N$ 为信号的长度。 $SS_i$ 为消噪后的有用信号部分(取图 4 中 25s 到 45s 段信号值), $NN_i$ 为消噪后仍存在的噪声(取图 4 中 0 到 20s 段信号值)。

计算图 4 中的三个处理后信号的信噪比和均方根误差,结果如表 1 所示。

表 1 信噪比和均方根误差对比表

	SNR	RMSE
S1	5.8323	4.1041
S2	4.3847	3.4592
S3	12.911	3.2823

结合图 4 和表 1 可以看出,与仿真信号得到的结论类似,小波分解与傅里叶变换耦合滤波法效果很明显,三个模拟故障产生的脉冲感应信号从噪声中提取出来,而陷波器和阈值消噪法效果一般。

进一步分析小波分解与傅里叶变换耦合法频域滤波效果。滤波法处理前后频域对比效果如图 5 所示,信号处理前 50Hz 处幅值最大,而其他频率信号幅值不明显,说明 50Hz 工频干扰很大,超过异常信号的幅值很多倍,而在滤波后,可以看出滤波后 50Hz 处幅值小了很多,而异常信号也显示集中在低频。说明不论

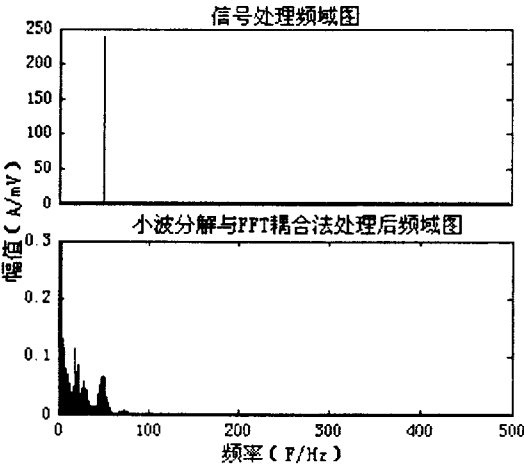


图 5 小波分解与傅里叶变换耦合法滤波前后频域图

## 4 结束语

采用带有软件管道的 Actor 模型对 BPEL 执行流程进行转化,给出模型结构、流程转化过程、转化过程的主要实现类,与转化示例。通过实验验证了将 BPEL 业务流程转化为软件管道的 Actor 模型处理过程,可使得流程执行的并发性得到了提升,随着 actor 实例数量的增加,降低了流程的执行时间,提高了流程执行性能。

### 参考文献:

- [1] Karp R M, Miller R E. Properties of a Model for Parallel Computations: Determinacy, Termination, Queuing [J]. SIAM J. Applied Mathematics, 1966, 14(11): 1390 - 1411.
- [2] Adams D A. A Computation Model with Data - Flow Sequencing[R]. Stanford, Calif: Computer Science Dept., Stanford Univ, 1968.
- [3] Rodriquez J E. Graph Model for Parallel Computation[R]. Cambridge, Mass: MIT, 1967.
- [4] Seeber R R, Lindquist A B. Associative Logic for Highly Parallel Systems[C]//Proceedings of AFIPS Joint Computer Conferences. New York, NY, USA: ACM, 1963: 489 - 493.
- [5] Whiting P G, Pascoe R S V. A History of Data - Flow Languages[J]. IEEE Annals of the History of Computing, 1994, 16(4): 38 - 59.
- [6] Agha G A. ACTORS: A Model of Concurrent Computation in

Distributed Systems [M]. Cambridge, Massachusetts: MIT Press, 1986.

- [7] Armstrong J. The development of Erlang[C]//Proceedings of the second ACM SIGPLAN international conference on Functional programming. New York, NY, USA: ACM, 1997: 196 - 203.
- [8] Scalas A, Casu G, Pili P. High - performance technical computing with erlang[C]//Proceedings of the 7th ACM SIGPLAN workshop on ERLANG. New York, NY, USA: ACM, 2008: 49 - 60.
- [9] Haller P, Odersky M. Scala Actors: Unifying thread - based and event - based programming[J]. Theoretical Computer Science, 2009, 410(2 - 3): 202 - 230.
- [10] Clinger W D. Foundation of Actor Semantics [D]. Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology, 1981.
- [11] Douillet A, Gao Guang R. Software - Pipelining on Multi - Core Architectures[C]//Proceedings of the 16th International Conference on Parallel Architecture and Compilation Techniques. Washington, DC, USA: IEEE Computer Society, 2007: 39 - 48.
- [12] Haller P. An object - oriented programming model for event - based actors[D]. Fakultt fr Informatik, Universitt Karlsruhe, 2006.
- [13] Van Cutsem T, Mostinckx S, De Meult W. Linguistic symbiosis between event loop actors and threads[J]. Computer Languages, Systems and Structures, 2009, 35(1): 80 - 89.

(上接第3页)

在时域还是频域,小波分解与傅里叶变换耦合法的处理效果都很好,适合处理静电监测信号,证明了该方法的有效性。

## 4 结束语

针对静电监测信号信噪比极低、工频干扰大、故障信号难以提取等特点,根据傅里叶变换和小波阈值降噪理论,提出小波分解与傅里叶变换耦合法,与常规滤波法对比后得出结论:小波分解与傅里叶变换耦合法滤波效果最明显,均方根误差最小,信噪比是常规滤波方法的 2~3 倍,表明无论是对于仿真信号还是实验信号,小波分解与傅里叶变换耦合法不仅具有很强的噪声抑止能力,同时能很好地提取出异常信号,适合用来做静电感应信号的滤波处理。

### 参考文献:

- [1] Powrie H E G, McNicholas K. Gas Path Condition Monitoring During Accelerated Mission testing of a demonstrator engine [C]//AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference

and Exhibit, 33rd. Seattle, WA: [s. n.], 1997: 6 - 9.

- [2] Powrie H E G, Fisher C E. Engine health monitoring: towards total prognostics[C]//Snowmass at Aspen, CO, USA: IEEE Aerospace Applications Conference Proceedings. US: [s. n.], 1999: 11 - 20.
- [3] Fisher C E. Gas path debris monitoring - a 21st century PHM tool[C]//IEEE Aerospace Conference Proceedings. Montana: [s. n.], 2000: 441 - 448.
- [4] Sorokin A, Arnold F. Electrically charged small soot particles in the exhaust of an aircraft gas - turbine engine combustor: comparison of model and experiment[J]. Atmospheric Environment, 2004, 38: 2611 - 2618.
- [5] 吴婷, 颜国正, 杨帮华. 基于陷波器和小波变换去除自发电信号噪声的方法[J]. 测试技术, 2007, 26(4): 29 - 31.
- [6] 胡昌华, 李国华, 刘涛, 等. 基于 MATLAB 6. X 的系统分析与设计—小波分析[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2004: 292 - 296.
- [7] 吴振磊, 陈钟荣. 基于小波变换的信号突变检测[J]. 微计算机信息, 2006, 34: 747 - 758.
- [8] 朱华, 吴传生, 汪小梅. 一种改进的小波消噪阈值选取方法[J]. 计算机应用, 2007, 27(10): 2605 - 2609.