

基于循环维纳滤波的振动信号去噪算法研究

张峰,马舒啸,石现峰

(西安工业大学 电子信息工程学院,陕西 西安 710032)

摘要:振动信号的去噪需要在滤除噪声的同时尽可能避免相位失真。传统的锐截止低通滤波器或 FIR 滤波器无法在去噪效果和线性相位之间取得平衡,难以满足振动信号的去噪需求。针对这一问题,将线性相位的维纳滤波算法引入到振动信号的去噪中,并结合振动信号的循环平稳特性,形成了振动信号的循环维纳滤波算法。文中以直接维纳滤波为基础对循环维纳滤波算法的原理进行了深入分析和仿真实现,并基于实测汽轮机振动信号对算法的去噪性能进行了讨论。理论分析及算法仿真表明,循环维纳滤波算法在保证线性相位的前提下有较好的去噪效果,能够解决传统去噪算法所存在的去噪效果与线性相位难以均衡的问题。

关键词:振动信号;去噪;循环维纳滤波;线性相位

中图分类号:TN911.7

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2014)06-0049-03

doi:10.3969/j.issn.1673-629X.2014.06.012

Research on Denoising Algorithm of Vibration Signal Based on Circular Wiener Filtering

ZHANG Feng, MA Shu-xiao, SHI Xian-feng

(College of Electronic Information Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710032, China)

Abstract: Vibration signal denoising needs to avoid the phase distortion as far as possible. Traditional sharp cut-off of low-pass filter and FIR filter are unable to strike a balance between denoising and having a linear phase. It's difficult to meet the demand of vibration signal denoising. In order to solve this problem, the linear phase of Wiener filtering algorithm is introduced into the vibration signal denoising. Combined with the cycle of steady vibration signal characteristics, it forms the vibration signal cycle of Wiener filtering algorithm. Based on Wiener filtering, circulated Wiener filtering algorithm is studied by the thorough analysis and simulation. And the actual turbine vibration signal denoising algorithm is proposed. Theoretical analysis and algorithm simulation shows that the circulation Wiener filtering algorithm has good effect of denoising, which can solve the contradictory between denoising effect and linear phase equilibrium.

Key words: vibration signal; denoising; circular Wiener filtering; linear phase

0 引言

振动信号的特性分析是旋转机械设备故障检测及诊断中的重要环节,用于为运行状况分析及故障诊断提供依据^[1]。在振动信号采集时,由于工业现场复杂,混入噪声是无法避免的,这样就造成振动信号特征提取及分析的不准确或不可靠,工作人员就不能准确检测机组的运行状况,更不能准确分析判断机组的安全性^[2]。在对振动信号进行特征提取及相关分析前,需要进行去噪处理。传统振动信号预处理中,软件滤波在滤波器中起到越来越重要的作用。为了取得较好的

滤波效果和良好的线性相位特性,一般采用的是锐截止低通滤波器或是无附加效果的 FIR 滤波器,这样的做法往往无法在去噪效果和良好的线性相位特性之间取得一个较好的平衡,都无法使滤波效果达到较佳状态^[3-4]。

就滤波器去噪方法来说,首先应依据相应的技术指标,如滤波器的截止频率、品质系数、纹波幅度、倍频程选择性,设计一个相应的滤波器。去噪效果的好坏取决于滤波器的设计^[5]。文中在对振动信号特点及滤波要求进行分析的基础上,提出了基于循环维纳滤波的振动信号去噪算法,取得了滤波效果及相位特性

收稿日期:2013-08-28

修回日期:2013-12-05

网络出版时间:2014-02-24

基金项目:陕西省自然科学基金项目(2012JQ8008);陕西省教育科技专项(2012JK0545)

作者简介:张峰(1979-),男,副教授,博士研究生,研究方向为信号与信息处理、自动控制、数据库技术应用;马舒啸(1988-),男,硕士研究生,研究方向为信号处理与嵌入式技术。

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1450.TP.20140224.0922.047.html>

的良好均衡。

1 振动信号采集及滤波要求

1.1 振动信号的采集

为使此次研究及分析更具有针对性,对工业现场的汽轮机振动信号进行了采集。

数据采集的相关参数为:采用 32 倍频采样,即转速时 32 倍,配合后面的 FFT 计算的需要,采样点数设成 2 的整数次幂,即 $N=2^m$ 。同时为了方便处理,每通道连续采集 128 点。所采集的信号波形如图 1 所示,为研究去噪性能,对信号加入随机噪声,加噪后的振动信号如图 2 所示。

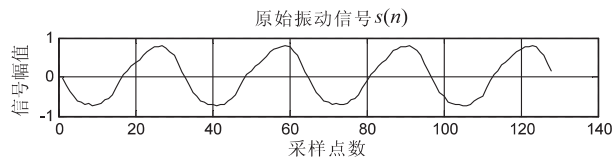


图 1 原始采集振动信号

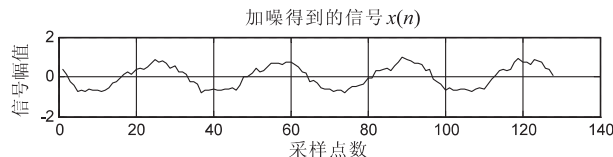


图 2 加噪处理后的振动信号

1.2 振动信号的滤波要求

振动信号分析仪对振动信号滤波的主要要求有以下几个方面:

(1) 为保证谱估计的质量,需尽可能消除振动信号谱分析时的频谱泄漏现象,这就要求振动信号周期完整。在振动信号采集时通常通过复杂的键相信号的控制来保证整周期采样的实现。这样一来,对振动信号进行滤波处理,就对相位特性提出了较高要求,需保证滤波处理严格的线性相位特性,防止产生相位失真。

(2) 在保证线性相位前提下,能够有效滤除噪声,获取最真实的代表机械设备运行状况的振动信号。如果采用模拟滤波器,为取得良好的滤波效果,往往需要采用过渡带很窄的低通滤波器,一般阶次较高,实现困难,同时模拟滤波器过渡带越窄,相位的非线性越明显。如果使用数字滤波器虽然可以满足线性相位特性,但是其滤波效果的精度无法满足后期数据的要求。

2 维纳滤波算法原理

维纳滤波是利用平稳随机过程的相关特性和频谱特性对混有噪声的信号进行滤波的方法。1942 年美国科学家 N. 维纳为解决对空射击的控制问题建立了该算法理论体系,维纳滤波是 40 年代在线性滤波理论方面取得的最重要的成果^[4]。

假定观测到一串广义平稳随机信号:

$$x(n) = s(n) + \omega(n) \quad (1)$$

其中, $s(n)$ 是真实信号; $\omega(n)$ 是加性噪声或测量误差。

现要设计一个 FIR 滤波器,当该滤波器的单位取样响应 $h(n)$ 设计得合理时,就可以实现在均方误差最小的准则下的最佳滤波。而这样的滤波器正是所要讨论的维纳滤波器。

一个 N 阶因果 FIR 滤波器的输出为:

$$y(n) = \sum_{k=0}^N h(k)x(n-k) \quad (2)$$

上式的物理含义是:利用真实信号和最近的过去 N 个取样信号,对其进行合理的加权,输出信号 $y(n)$ 按最佳准则接近真实信号 $s(n)$,如图 3 所示。

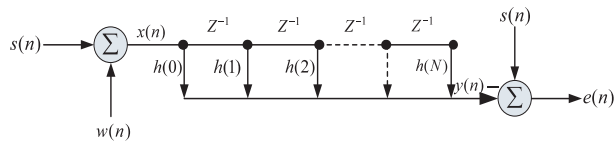


图 3 维纳滤波算法原理图

如图 3 所示,真实信号 $s(n)$ 混入噪声信号 $\omega(n)$ 后形成测量信号 $x(n)$ 进入维纳滤波器,在内部,进行有加权系数 $h(n)$ 的若干次运算,得出输出信号 $y(n)$,但是, $y(n)$ 和 $s(n)$ 之间存在着误差值 $e(n)$,故 $e(n) = s(n) - y(n)$ 。

维纳滤波要求均方误差最小,而均方误差定义为:

$$E[e^2(n)] = E[s(n) - \sum_{k=0}^N h(k)x(n-k)]^2 \quad (3)$$

由式(3)可以看出,均方误差是滤波器加权系数 $h(k)$ 的函数,依据微积分学,欲求解式(1)的最小值,这就意味着式(3)对 $h(k)$ 作一阶偏导数为 0 时的极小值。当 $h(k)$ 为实数时,应满足下面的线性方程组:

$$\sum_{k=0}^N \varphi_{xx}(m-k)h(k) = \varphi_{sx}(m), 0 \leq m \leq N \quad (4)$$

式(4)称为维纳-霍夫 (Wiener-Hopf) 方程,它提供了综合成为最佳 FIR 滤波器的依据,通过对方程的求解,就能得到 FIR 滤波器的最佳加权系数 $h(k)$ ^[4]。 φ_{xx} 表示为观测信号的自相关序列, φ_{sx} 表示为观测信号和真实信号的互相关序列。在工程实践中,由于信号和加性噪声是统计独立、不相关的,因此,可以将 φ_{xx} 、 φ_{sx} 表示为:

$$\varphi_{xx}(m) = \varphi_{ss}(m) + \varphi_{\omega\omega}(m) \quad (5)$$

$$\varphi_{sx}(m) = \varphi_{ss}(m) \quad (6)$$

其中, $\varphi_{ss}(m)$ 代表真实信号的自相关函数; $\varphi_{\omega\omega}(m)$ 代表噪声的自相关函数。

通过式(2)、(5)、(6),只要知道三个信号 $x(n)$ 、 $s(n)$ 、 $\omega(n)$ 中任意的两个信号的自相关序列,就能解出维纳-霍夫方程。

通过计算可得最佳加权系数 $h(k)$ 的最小均方误

差,即;

$$E[e^2_{\min}(n)] = \varphi_{ss}(0) - \sum_{k=0}^N h(m)\varphi_{sx}(m-k) \quad (7)$$

任何不满足维纳-霍夫方程的加权,都将产生比上式要大的均方误差。按照维纳-霍夫方程解得的加权系数 $h(k)$,将综合出最佳 FIR 滤波器,用该滤波器过滤信号,将保证最大限度地去掉噪声 $\omega(n)$ 所引起的信号失真^[6-7]。

3 振动信号的循环维纳滤波算法

3.1 振动信号的直接维纳滤波效果分析

对图1所示信号,先使用一般的维纳滤波算法进行处理,进行仿真时,将滤波器的阶数定为32阶。

图4为Matlab仿真结果图。

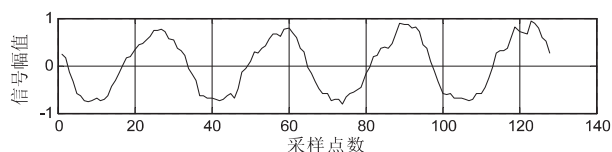


图4 直接维纳滤波后的振动信号

从图4的观察中可以发现,直接使用维纳滤波对振动信号进行处理,其去噪效果较差达不到后期的数据精度要求,产生这一问题的原因是由于采集于工业现场的振动信号并不是平稳信号^[8-9]。

而维纳滤波器要求信号是平稳的,但可以看到维纳滤波器却很好地保证了信号的线性相位特性。

3.2 振动信号的循环维纳滤波效果分析

应注意到维纳滤波器能够保持线性相位的特性,以及振动信号在周期内保持平稳信号的特性,将直接维纳滤波修正为循环维纳滤波,即采用化整为零的方式,将一整段的原始振动信号按照一定规则进行小范围分割,在每个小的范围内分别采用维纳滤波,并以此形成循环,在后期再把数据分段进行线性整合。

具体去噪算法过程如下:

(1)首先把得到的原始信号取其算术平均,并将每一点的信号值减去这一平均值,来完成去直流等预处理工作,形成待处理原始信号;

(2)将得到的待处理原始信号按照某一准则进行简单分段,文中所用算法是按照信号周期为单位进行处理,形成单位待处理原始信号;

(3)对第一单位待处理原始信号进行维纳滤波处理,得到的结果保存留用,形成第一单位结果信号;

(4)将第一单位结果信号作为下一段维纳滤波处理的加性噪声的输入端,重复步骤(3),即原始信号输入端使用第二单位待处理原始信号,进行维纳滤波处理,得到第二单位结果信号,再将第二单位结果信号传

入下一段维纳滤波的加性噪声输入端,来辅助处理第三单位原始信号,并循环重复此过程;

(5)将处理完毕的若干单元结果信号依据原始次序进行简单的线性组合,得出经过循环维纳滤波处理后的滤波图样。

循环维纳滤波的仿真图如图5所示。

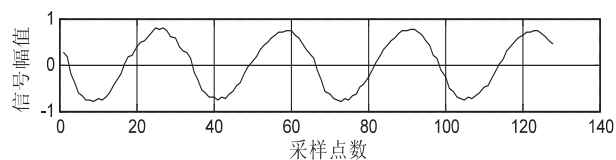


图5 循环维纳滤波后的振动信号

3.3 算法性能分析

通过观察图1、图2和图5的前后波形,可以清楚地看出,在噪声信号强烈干扰下,循环维纳滤波后的波形,在保持原有波形的基本图样和维持波形较低的“毛刺”效果上都有着不错的表现。

在对图1和图5中部分细节放大并进一步对比后,可发现:在经过循环和一般维纳滤波前后信号的波形基本不发生畸变,而对于畸变部分也是在容忍范围内,所以得出循环维纳滤波很好地保持了信号的线性相位特性;而且也可以看到,不论是循环维纳滤波还是一般维纳滤波都在信号去噪方面表现出不错的性能,并且,循环维纳滤波后的波形有着更好的去噪特性。

在对图4到图5的观察中,不难发现,循环维纳滤波的性能明显优于一般维纳滤波,能够很好地满足振动信号在保证良好去噪效果和实现线性相位上的两大滤波要求。

4 结束语

文中所提及的循环维纳滤波算法已应用到实际的汽轮机振动信号监测系统项目中去,并且取得了较好的振动信号去噪效果。通过研究及实际算法的仿真分析,可得到如下的结论:

(1)维纳滤波在对振动信号进行去噪处理时,能够对相位特性有较好的保证,防止信号的畸变失真,满足振动信号滤波的相位要求;

(2)由于振动信号是非平稳的随机信号,倘若直接进行时域上的维纳滤波,噪声去除能力有限,达不到所期望的去噪效果;

(3)考虑到振动信号的循环平稳特性,也就是说振动信号在某一范围内可以认为是平稳信号,所以可以采用循环维纳滤波进行振动信号的去噪,这样就能在保证线性相位的基础上取得较为理想的去噪效果,适合于振动信号的处理。

应注意到振动信号依旧是非平稳信号,若要在保

(下转第55页)

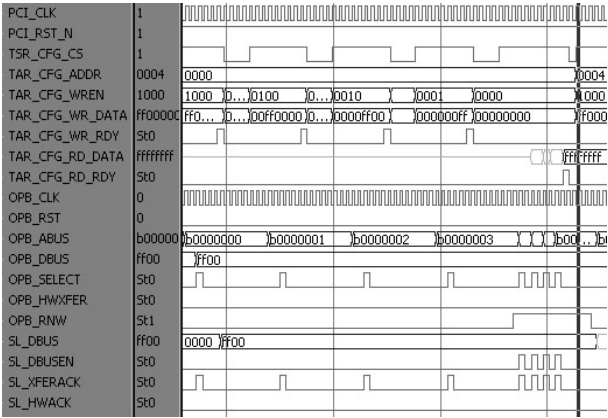


图5 PCI转OPB接口仿真波形图

5 结束语

由于IIC接口挂接在OPB总线上,为使PCI主机能正确访问其寄存器,需要设计一种PCI转OPB接口的时序转换电路。文中详细论述了此接口的设计与实现,并且通过仿真验证工具以及板级验证对该设计实现了功能仿真及测试,功能仿真和工程实践表明,该转换电路工作稳定,性能良好,较好地满足了PCI主机接口与IIC接口之间的通信需求,且对其他类似的接口转换设计具有一定的借鉴意义。

参考文献:

[1] 李贵山,戚德虎. PCI局部总线开发者指南[M]. 西安:西

(上接第51页)

证线性相位的基础上进一步改良算法的去噪效果,时频分析方法可以较好地解决信号分析方法不能进行时频局部化分析的问题^[10-11]。如小波变化由于其窗函数可变,能将信号分解成多种尺度成分,并对不同的尺度成分采用相应大小的时域采样步长^[12-14]。

参考文献:

[1] 张峰,石现峰. 基于嵌入式技术的汽轮机振动信号分析仪[J]. 自动化与仪表,2012,27(10):13-15.
[2] 王金平,邓艾东,丁軻軻. 基于DSP的汽轮机振动信号采集系统的设计[J]. 电站系统工程,2008,24(3):49-50.
[3] Zhang Zhigang, E Jiaqiang, Zhang Guixiang. A novel dense spectrum correction algorithm for extracting vibration signals in internal combustion engine and its application[J]. Journal of Central South University,2012,19(10):2810-2815.
[4] 丁康,陈健林,苏向荣. 平稳和非平稳振动信号的若干处理方法及发展[J]. 振动工程学报,2003,16(1):1-10.
[5] 吴宏钢,尹爱军,秦树人. 基于PDE的振动信号去噪[J]. 机械工程学报,2009,45(5):91-94.

安电子科技大学出版社,1997.

[2] 戴紫彬,孙万忠,张永福. PCI 9054 局部总线设计及应用[J]. 微电子学与计算机,2003(8):122-124.
[3] The IIC-Busspecification, version 2. 0[S]. [s. l.]: Philips Semiconductors,1998.
[4] The IIC-Bus and how to use it[S]. [s. l.]: Philips Semiconductors,1995.
[5] PCI Special Internet Group. PCI local bus specification revision2. 2[S]. [s. l.]:PCI Special Internet Group,1998.
[6] 史森茂,邵翠萍,龚龙庆. 一种PCI总线Master模块接口设计[J]. 计算机技术与发展,2012,22(7):207-210.
[7] MPC132 32Bit 33/66MHz PCI peripheral core with cardbus support[S]. [s. l.]:Mentor Graphics Corporation,2000.
[8] 李攀,田泽,蔡叶芳,等. 基于SOPC的PCI通信接口设计与实现[J]. 计算机技术与发展,2009,19(9):211-214.
[9] On-chip peripheral bus architecture specifications version 2. 1[S]. [s. l.]:IBM Corporation,2001.
[10] IBM 133 PCI-Xbridge R2. 0 datasheet[S]. [s. l.]:IBM Corporation,2001.
[11] Siliconerrata[S]. Texas:Texas Instruments,2010.
[12] IIC400core databook SA 15-5812-01 preliminary rev1[S]. [s. l.]:IBM Confidential,2005.
[13] 田靖,田泽. AFDX-ES SoC 虚拟仿真平台的构建与应用[J]. 计算机技术与发展,2010,20(8):192-194.
[14] 夏宇闻. Verilog 数字系统设计教程[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2003.
[6] 宋蕾. 基于核主成分的维纳滤波方法在地震信号处理中的应用[D]. 长春:吉林大学,2011.
[7] 丁美玉. 数字信号处理-时域离散随机信号处理[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,2002.
[8] 张学智. 数字信号处理[M]. 北京:兵器工业出版社,2006.
[9] Wu Qingju,Tian Xiaobo. Receiver function estimated by Wiener filtering[J]. Earthquake Research in China,2003,17(4):386-391.
[10] Pang Peilin,Ding Guanbin. Vibration diagnosis method based on wavelet analysis and neural network for turbine-generator[C]//Proc of 2009 Chinese control and decision conference. Guilin:IEEE,2009:5234-5237.
[11] 彭志科,卢文秀,褚福磊. 新的基于小波变换的振动信号消噪方法[J]. 机械工程学报,2006,42(4):18-22.
[12] 冯淞,景建方,郭虎生. 一种旋转机械振动信号小波去噪方法[J]. 船电技术,2012,32(3):61-64.
[13] Shi Chunxiang, Luo Qifeng. Hilbert-Huang transform and wavelet analysis of time history signal[J]. Acta Seismologica Sinica,2003,16(4):422-429.
[14] 杨世锡,胡劲松,吴昭同,等. 旋转机械振动信号基于EMD的希尔伯特变换和小波变换时频分析比较[J]. 中国电机工程学报,2003,23(6):102-107.

基于循环维纳滤波的振动信号去噪算法研究

作者: [张峰](#), [马舒啸](#), [石现峰](#), [ZHANG Feng](#), [MA Shu-xiao](#), [SHI Xian-feng](#)
作者单位: [西安工业大学 电子信息工程学院, 陕西 西安, 710032](#)
刊名: [计算机技术与发展](#) 
英文刊名: [Computer Technology and Development](#)
年, 卷(期): 2014 (6)

本文链接: http://d.wanfangdata.com.cn/Periodical_wjfz201406012.aspx