

风机故障诊断系统中的振动信号分析与实现

杨 舟¹, 王 红¹, 杨士元¹, 胡 喜²

(1 清华大学 自动化系, 北京 100084; 2 西门子中国研究院, 北京 100080)

摘 要: 文中介绍了风力发电机故障诊断系统中基于 DSP 的振动信号分析过程及实现. 该信号分析模块利用 TMS320C6713 丰富的片上资源完成了对多路高速高精度采样信号的实时获取, 对各路信号采样频率、分析方式的灵活配置, 对原始信号的 RMS(Root Mean Square)、峰峰值等特征的计算和频域特性分析, 并将分析结果发送至系统后端用于对风机运行状况进行远程监测和故障诊断. 在时频域分析之前加入可配置的巴特沃斯数字滤波器和同步重采样处理, 以滤除环境中信号噪声和避免频谱泄露.

关键词: 风力发电机; 故障诊断; DSP; 信号分析; 滤波; 重采样

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2011)09-0031-04

Vibration Analysis and Implementation in Wind Generator Diagnostics System

YANG Zhou¹, WANG Hong¹, YANG Shi-yuan¹, HU Xi²

(1 Department of Automation, Tsinghua University, Beijing 100084; 2 Siemens China, Beijing 100080, China)

Abstract: Wind Generator Diagnostics System is built with the purpose of reducing the cost of wind generator maintenance and increasing the diagnostic rate. The vibration analysis module of the diagnostics system is implemented with the DSP of TMS320C6713, by the resource of which the high precise signal of vibration from multi-channels is got from the sampling board, calculated RMS & peak-peak result, done FFT and sent to the backend of the system for further analysis. Necessary signal pre-processing is also inserted into the process, including digital Butterworth filter and synchronous resampling, to avoid the effect of noise and leakage on the frequency spectrum. The system has been checked and accepted by Siemens.

Key words: wind generator; diagnostics; DSP; signal analysis; digital filter; resample

1 引言

风力发电机是一种典型的旋转机械, 其故障常从振动信息中体现出来, 对振动信号进行监测与诊断是目前风机设备维护管理的主要手段^[1]. 风机不同位置的振动类型、频率和幅值能体现不同的特征. 为了全方位掌握风机的运行情况, 可将不同传感器布置在风机的适当位置, 实时监测各个部位的振动状况, 并及时提交给故障诊断系统. 通过振动数据采集和分析, 掌握设备的运行情况, 及时调整控制方

法, 并预测、预报设备的未来情况^[2].

西门子中国研究院合作开发了风机故障诊断系统. 该系统由信号采集模块, 信号分析模块和系统控制模块组成, 使用嵌入式系统, 可置于风机上进行测量, 并将测量和分析结果发至远程上位机. 文中着重介绍系统中基于 DSP 的信号分析模块.

2 风机故障诊断系统信号分析模块的实现

风机故障诊断系统基于嵌入式平台设计, 同时对同一台风机 8 处不同位置进行振动信号的高速采

集,并对收到的振动信号进行滤波、重采样、频谱变换等数字分析,通过振动信号的时域、频域和幅值域分析结果监控风机的工作状况.待分析的信号路数多、精度高,采集速率快,故信号分析模块所需处理的数据量大,运算复杂度较高.

选用 TMS320C6713 DSP 芯片作为信号分析模块,如图 1 所示.利用片上资源实现了对系统前端采集到的原始信号的高速接收,对信号的分析处理,和分析结果对系统后端的输出及控制指令的取得.

2.1 DSP 对原始振动信号的高速获取

信号采集电路对 8 路振动和转速信号进行实时采集,信号为 24 位高精度定点数,最高采样速率达到 48kHz.信号分析模块采用 TDM^[3] 串行通讯协议对这 8 路 24 位数据进行接收,避免了常用的并行传输方式造成的过大面积开销.

如图 2, TDM 方式将并行采集到的 8 路信号按

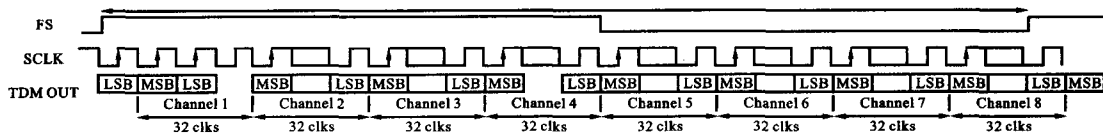


图 2 DSP 与 CS5368 的 TDM 通讯时序

如图 3, ping-pong 传输方式是一种流水线方式, DSP 为数据接收开辟两块缓存, EDMA 作为数据传输通道,连接接收数据的 Mcasp 端口与 DSP 内存中的 ping 缓存,与此同时, CPU 对存放于 pong 缓存中的原始振动信号数据进行格式转换, DSP 的运算速度确保格式转换早于数据传输结束,故在对 ping 缓存的传输完成之后, EDMA 和 CPU 处理对象同时切换,即可实现数据的连续接收及实时转换.

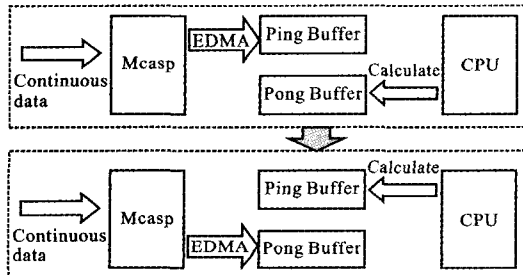


图 3 振动信号的接收—转换流水线

2.2 振动信号的分析与处理

DSP 接收来自前端信号采集模块的振动加速度信号、转速信号,经过计算得到振动信号的幅值、频率及频域特性.振动信号从通过采集模块进入 DSP 开始,将按以下步骤进行分析和计算:

(1) 数据类型转换:将由采样模块得到的 24 位

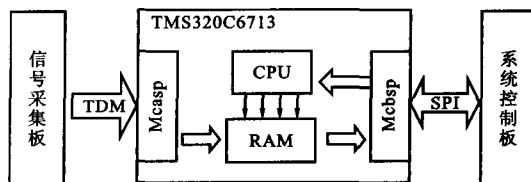


图 1 风机故障诊断系统信号分析模块结构

串行方式传输给相匹配的接收端,每一个帧同步信号对应 8 个 24 位定点数 slot 的传输.由于 8 路信号的数据量较大, DSP 的存储空间有限,需要在接收信号的同时完成数据格式即 24 位定点数到浮点数的转换,只存储转换后的浮点数形式的振动信号.为了确保接收到的振动信号的连续性,数据转换的过程不能影响连续接收的时序,故利用 TMS320C6713 所提供的 EDMA (Enhanced Direct Memory Access) 功能,采用 ping-pong 方式完成接收和转换^[4].

定点数描述的振动信号转换为 32 位浮点数格式以备进一步处理;

(2) 数字滤波:根据可选的截止频率对所采集的振动信号进行低通或高通滤波,也可选择根据振动频率进行带通滤波,滤波器采用 10 阶巴特沃斯数字滤波器;

(3) 同步重采样:根据转速信号对振动信号进行同步重采样,使每个振动周期的采样点数相同,经过同步重采样后进行快速 Fourier 变换得到的振动信号的频谱清晰,不会产生频谱泄露问题;

(4) 快速 Fourier 变换:对经过以上预处理过程后的振动信号进行 FFT,得到其频谱图,用于观察基频及各次谐波振动分量.

(5) 在对信号分析计算之后,相应的分析结果和原始信号将被发送到系统后端.

2.3 DSP 与系统控制模块的通讯

系统后端使用 MPC5200 作为控制模块,用于对信号分析过程进行配置和与远程上位机进行通讯. DSP 接收来自系统控制模块的控制指令,进行指定的分析和运算,最后将原始振动波形、幅值、频率、频谱波形等数据发送给系统控制模块进行显示和存储.两者的通讯使用 SPI 串行通讯协议,通过

DSP 的 Mcbsp(Multichannel Buffered Serial Port) 端口进行^[5]。

DSP 的控制指令以协议包的形式接收,指令内容包括每一个数据通道的信号类型、滤波器类型、滤波器截止频率、同步重采样使能等,由上位机进行远程配置。

3 基于 DSP 的振动信号分析的预处理

对风机的故障诊断主要在于对风机中各部位的振动的加速度、频率等信息进行分析,对原振动信号进行 FFT,获得其频域信息是最基本和有效的处理方式。在实际的待测风机机床上进行实验后发现,通过传感器采集到的原始振动加速度信号特征并不明显,幅值较小且伴有大量干扰信号,在进行信号分析之前对信号进行滤波。由于系统同时对多达 8 路的振动及转速信号进行采样,采用常用的模拟滤波电路会带来较大的面积开销,故利用 DSP 较强的浮点运算能力,在信号分析过程中引入数字滤波器代替。

风机在实际运行过程中,其转速并不能始终保持恒定,尤其在启动和制动阶段,若直接对按照等时差方式采样得到的数据进行 FFT,得到的频谱结果将有明显的能量泄露,在对信号进行 FFT 前进行了同步重采样,避免了转速变化带来的计算偏差。

3.1 巴特沃斯数字滤波器的引入和实现

巴特沃斯滤波器的幅频特征模平方为

$$|H(j\Omega)|^2 = [1 + \frac{\Omega^{2N}}{\Omega_c^{2N}}]^{-1}$$

其中,N 为阶数,Ω_c 为滤波器的截止角频率。巴特沃斯滤波器的特点是^[6]:

- ① 具有最平响应特性(最大平坦性),即其在 Ω=0 附近非常平直,以此逼近理想滤波器;
- ② 通带、阻带衰减近似线性,这使得该滤波器具有较好的相位特性;
- ③ 随着阶数 N 的逐步增大,过渡带变窄,即衰减加剧,但截止角频率不变。

巴特沃斯数字滤波器属于无限长冲激响应(IIR)数字滤波器,具有无限持续时间冲激响应,其

系统函数为
$$H(z) = \frac{\sum_{i=0}^M b_i z^{-i}}{1 - \sum_{k=0}^N a_k z^{-k}}$$

故在对实际采样序列 $x(n)$ 的处理中,使用递归模型来实现,即从差分方程 $y(n) = \sum_{i=0}^M b_i x(n-i) -$

$$\sum_{k=0}^N a_k y(n-k)$$
 获得滤波之后的序列 $y(n)$ 。

在本系统中,数字滤波的截止角频率由用户配置,考虑到信号分析模块的资源限制和实际需求,将巴特沃斯滤波器的阶数固定为 10 阶。故对不同的截止角频率,需要在滤波操作之前构造递归模型中的滤波器参数序列 a_k, b_i 。构造该参数序列的过程采用双线性变换法^[6],即先根据配置的截止角频率获得所需 10 阶巴特沃斯模拟滤波器 $H(s)$,再利用 S 域和 Z 域的双线性变换获得数字滤波器系统函数 $H(z)$,从而确定数字滤波的差分方程所需的参数。本系统信号分析模块数字滤波总体流程如图 4,数字滤波后得到的信号序列 $Y(n)$ 将用于下一步处理。

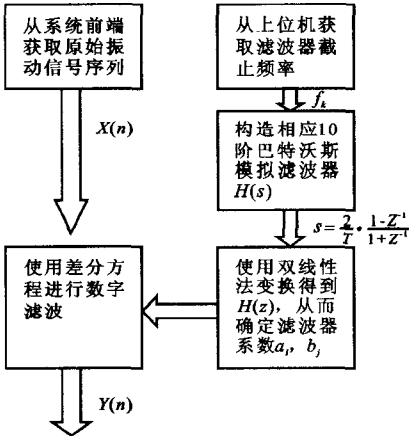


图 4 截止频率可配置的数字滤波总体流程

3.2 同步重采样的引入和实现

风力发电机的振动信号具有明确的周期性,其频谱能量的离散分布,集中在转速的 1/ 2、1、2、3 倍等频率点。发电机在正常运转时,其转速在严格意义上是波动的,特别在升、降速阶段尤其明显,这些状态下对应的振动信号属于非平稳信号,并不直接满足傅立叶变换对信号的平稳性要求,因此并不适合用常规的频谱分析法进行分析^[7]。

本系统的信号采集板对振动信号采用等时差采样,若对此等时差采样获得的振动信号直接进行 FFT,相当于默认振动信号属于平稳信号,但由于其转速波动的实际情况,所得到的频谱会有频域泄露的问题,即倍频点处的信号的部分能量泄露到整个频谱,造成特征点处的测量值比真实值偏小。故对振动信号进行频谱分析,应在对转速进行跟踪并实现恒角度增量采样——即阶次跟踪采样的基础上完成。

本系统的信号采集板提供一路风机转速信号,

故对振动信号的等角度增量采样可以通过信号分析过程中的同步重采样实现,即对实测中每个周期内的振动信号采用相同的点数进行重采样,每个周期的时长通过实测的转速信号进行同步^[8].对振动信号的同步重采样过程如下:

- ① 获得原始振动信号序列和转速信号序列;
- ② 通过转速信号判断每一个实际振动周期在振动信号序列中的范围;
- ③ 对每一个周期范围内的信号序列进行重采样:设原始振动信号序列总点数为 N ,总周期数为 m ,则令重采样序列的总点数为 2^n ,每一周期点数为 $2^n/m$,其中 n 满足 $2^n < N < 2^{n+1}$,重采样序列中每一个新采样点由原始振动序列时域中最相近的两原始采样点线性插值得;

将得到的经过重采样的振动信号序列进行 FFT 等进一步分析.

4 实验结果

4.1 数字滤波器实验结果

使用标准振动源(160Hz,RMS = 1g)对信号分析预处理过程中引入的巴特沃斯数字滤波器进行实验.设定信号采样率为 1.6kHz,通过上位机配置不同的截止频率,使用低通、高通滤波器对原始振动信号进行处理,分别通过信号时域波形、频谱得到信号的幅值,结果如表 1、表 2 所示.

表 1 低通数字滤波器实验结果

截止频率(Hz)	Wave RMS(g)	FFT RMS(g)
120	0.021	0.020
160	0.370	0.346
240	0.979	0.908
320	0.977	0.910

表 2 高通数字滤波器实验结果

截止频率(Hz)	Wave RMS(g)	FFT RMS(g)
120	0.976	0.910
160	0.900	0.836
240	0.026	0.021
320	0.004	NaN

可以看出,使用巴特沃斯数字滤波器,待滤除频率衰减速度快,低通滤波器截止频率的倍频和高通滤波器截止频率半频处的信号已经衰减到比较理想的幅值,这对风机运行现场各频段的噪声滤除有实际意义.

4.2 同步重采样实验结果

使用标准振动源(160Hz,RMS = 1g)对信号分析预处理过程中引入的同步重采样进行实验,对比原始振动信号直接进行 FFT(FFT-1);先经过同步重采样再进行 FFT(FFT-2);直接计算时域波形(Wave)分别得到的振动幅值,得到结果如表 3.

表 3 同步重采样实验结果

RMS	FFT-1	FFT-2	Wave
1	0.914	1.011	1.016
2	0.978	1.018	1.024
3	0.920	1.018	1.025

可以看出,未经过同步重采样直接进行 FFT 的振动信号其频谱有明显的泄露,振动中心频率的能量向其他频率点分散导致利用频谱测出的振幅偏小.而由于采样过程存在的随机性,以及采样起点和终点可能采到非整周期的波形,直接进行 FFT 产生的频谱泄露现象也存在随机性.实验结果也表明了这一点,直接 FFT 得到的振幅不但偏小,且每次实验结果相差较大,这种较大的随机性可能会给实际应用带来问题.

而经过同步重采样处理之后进行的 FFT,避免了频谱泄露的问题,多次实验结果均与标准振动源实际振动强度近似相等.

5 结束语

文中实现了风机故障诊断系统的信号分析模块.利用 DSP 芯片 TMS320C6713 的片上资源完成了多路高精度振动信号的实时接收,频谱分析等数据计算并支持上位机对流程的配置.在数据分析流程中加入了截止频率可调的 10 阶巴特沃斯数字滤波器和同步重采样过程,保证了在实际噪声环境中转速波动的实际条件下系统的可用性.

参考文献:

[1] 何勇,安源胜,武红霞. 旋转机械的故障诊断[J]. 风机技术, 2007(6):67-70.

[2] 陈莲芳, 徐夕仁. 风机振动故障诊断及处理[J]. 热能动力工程, 2006, 21(1):96-99.

[3] TMS320C6000 DSP multichannel audio serial port (McASP) reference guide[R]. Dallas: Texas Instruments,2003.

[4] TMS320C6000 DSP enhanced direct memory access (EDMA) controller reference guide [R]. Dallas: Texas

的. 通过求解 CSP 问题而推断出 A 的私钥 a_B , 成功的概率最多为 $1/(n!)^t$, 这里在文献[8] 中已经得到证明.

(4) 验证人的指定性

在指定验证签名阶段会用到验证人 C 的私钥, 除了指定 C , 其他任何人都不能验证此签名的合法性.

(5) 代理签名的密钥依赖性

在代理签名的生成过程中, 代理签名人 B 计算 $h = H_1(H_2(P_A\sigma \parallel m \parallel T_C))$, 因为 $\sigma = a_A H_2(ID_B \parallel m_w) a_A^{-1}$, 所以没有原始人的私钥, B 就不能生成有效的代理签名.

(6) 代理签名的可区分性

代理签名过程中, 代理签名人在接到原始签名的授权 σ 的基础上, 才能产生代理签名, 签名中用到 B 的私钥 a_B , 代理人的代理签名和正常签名是可区分的.

5 结束语

利用辫群中的 CSP 问题和 p 次根问题的难解性, 构造了一个基于身份的指定验证者的代理签名. 辫群理论是未来构造公钥密码体制的平台, 在组合群论应用于密码学中扮演了重要的角色, 基于辫群上的一些困难问题无论是在现代计算机上, 还是在量子计算机上目前都没有非常好的解法. 随着科学技术的发展, 辫群在密码学上将会有有一个广阔的应用前景.

参考文献:

- [1] Mambo M, Usuda K, Okamoto E. Proxy signatures for delegating signing operation[C]//Proceedings of the 3rd ACM Conference on Computer and Communication Security. Japan: Tokyo, 1996: 48-57.
- [2] Ki Hyoung Ko, Sang Jin Lee, Jung Hee Cheon, et al. New public key cryptosystem using braid groups[C]//LNCS 1880: Proc of Crypto2000. Berlin: Springer-Verlag, 2000: 166-183.
- [3] 卓泽朋, 魏仕民. 基于辫群的指定验证者的签名方案[J]. 计算机应用, 2008, 28(12): 3197-3798.
- [4] Verma G K. A proxy signature scheme over braid groups [EB/OL]. [2011-01-05]. <http://eprint.iacr.org/2008/160.pdf>.
- [5] 卓泽朋, 魏仕民. 基于身份的代理签名方案[J]. 计算机工程与应用, 2009, 45(28): 112-114.
- [6] 唐忠宽, 殷新春, 赵荣. 基于身份的代理盲签名在电子现金中的应用[J]. 微电子学与计算机, 2009, 26(8): 71-73.
- [7] 秦艳琳, 吴晓平. 对一种代理盲多重签名的分析与改进[J]. 微电子学与计算机, 2010, 27(10): 37-40.
- [8] Ko K H, Cho ID H, Chom S, et al. New signature scheme using conjugacy problem [EB/OL]. [2008-05-18]. <http://eprint.ia2cr.org/2002/168.pdf>.

作者简介:

杨爱梅 女, (1979-), 硕士, 讲师. 研究方向为信息安全.

彭维平 男, (1979-), 博士研究生, 讲师. 研究方向为网络与信息安全.

(上接第 34 页)

Instruments, 2003.

- [5] Ivan W Selesnick Sidney Burrus C. Generalized digital butterworth filter design [J]. Signal Processing, 1998 (46): 1688-1694.
- [6] 李钟慎. 基于 MATLAB 设计巴特沃斯低通滤波器[J]. 信息技术, 2003, 27(3): 44-52.
- [7] Hui Li. Gear fault monitoring based on order tracking and Bi-spectrum under running-up condition[J]. Fuzzy Systems and Knowledge Discovery, 2007(4): 379-383.
- [8] 张韧, 杨世锡, 任达千, 等. 一种应用重采样技术的整周

期采样方法[J]. 机电工程, 2004, 21(3): 1-3.

作者简介:

杨舟 男, (1985-), 硕士研究生. 研究方向为数模混合电路的设计、检测技术.

王红 女, (1971-), 副教授. 研究方向为电子技术、检测技术、系统故障诊断理论和技术.

杨士元 男, (1949-), 教授, 博士生导师. 研究方向为电子技术、检测技术、系统故障诊断理论和技术、智能家居系统.

胡喜 男, (1973-), 高级研究员. 研究方向为电路设计、系统控制.