

基于 DSP 的嵌入式在线振动信号分析系统

宋宇晨¹, 潘大为², 黄涛³, 冯灿³, 雷爱强³

(1. 哈尔滨工业大学 自动化测试与控制系, 哈尔滨 150080; 2. 哈尔滨工程大学 信息与通信工程学院, 哈尔滨 150001; 3. 中国商飞民用飞机试飞中心, 上海 200232)

摘要: 为监测机械设备的工作状态, 对机械设备工作过程中产生的振动信号进行采集、处理和分析, 从而实现系统的状态监测、故障诊断以及寿命预测等; 但目前振动信号分析系统体积较大、不方便携带, 多用于离线的振动信号处理, 难以完成机械设备振动信号的在线实时分析; 针对振动信号离线分析系统存在实时性低、体积大等不足, 设计了基于 TMS320C6713 DSP 的嵌入式振动信号采集处理系统, 以满足机械设备振动信号采集、处理和分析过程中对采集、处理实时性, 系统便携性等需求; 详细介绍了系统的软硬件设计原理和方法, 利用美国凯斯西储大学的公开轴承测量数据集对系统的各项功能和技术指标进行实验验证; 实验结果表明, 该系统能够正常工作且可应用于实际工程中; 另外, 系统支持功能和算法扩展, 以满足不同机械设备的振动信号采集、处理和分析需求。

关键词: 嵌入式系统; 在线振动信号分析; DSP

DSP based Embedded System for Online Vibration Signal Analysis

Song Yuchen¹, Pan Dawei², Huang Tao³, Feng Can³, Lei Aiqiang³

(1. Department of Automatic Test and Control, Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, China;
2. School of Information and Communication Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China;
3. Commercial Aircraft Cooperation of China, LTD, Shanghai 200120)

Abstract: In order to monitor the state of machinery, the vibration signals sampling, processing and analysis are needed, to achieve condition monitoring, fault diagnostics and prognostics for machinery system. The current system of vibration signal analysis is generally of high volume and not portable. This system is always applying for offline analysis and difficult for online real-time analysis of machinery. Aiming at the disadvantages of the current system of vibration signal analysis, the embedded online vibration signal analysis system is designed based on the TMS320C6713 digital signal processor to satisfy the real-time and portable requirement. The principles and designing methods on software and hardware are introduced in detail. With the publicly available data sets of vibration from Case Western Reserve University, the evaluation and verification of the designed system are conducted. The experimental results indicate that the system can operate well and can be used for actual industrial application. In addition, the system can support functional extension and algorithm upgrading to meet different requirements of vibration signals sampling and analysis.

Keywords: embedded system; online vibration signal analysis; DSP

0 引言

随着科技的进步, 机械设备在社会生产和生活中发挥的作用也越来越重要。能否保证一些关键设备的正常运行, 直接关系到一个行业发展的各个层面。现代化的工业生产一旦因故障停机, 损失将十分巨大。因此, 防止故障发生, 少维修支出就显得尤为重要和迫切^[1]。旋转类机械是机械设备中的重要组成部分, 也是过敏经济各个部门中应用最普遍、最广泛的机械设备^[2]。旋转机械设备的故障通常易造成重大经济损失甚至灾难性后果因此采用振动信号分析仪对旋转机械进行状态检测与故障诊断是十分重要的^[3]。

机械在运动时, 由于旋转件的不平衡、负载的不均匀、结构刚度的各向异性、间隙、润滑不良、支撑松动等因素, 总是伴随着各种振动^[4]。齿轮、轴和轴承是构成机器传动系统的关键零件, 机器工作时这些零件会产生振动, 若发生故障, 其振动信号的能量分布就会发生变化, 因此振动信号可以作为机器传动系统故障特征的载体。基于振动信号分析的机械设备状态

分析系统在工业生产中不断得到推广和应用^[5]。通常状态下, 机械设备的损坏是一个渐进的过程, 其振动强度会逐渐上升^[6]。对机械系统的振动信号进行分析, 可以实现对机械设备工作状态的监测。

时域和频域方法都可以实现对振动信号的分析。但针对多频振动信号, 即使提供信号的明确物理性质, 都很难在时域上的分析^[7], 而使用频域方法, 可以更加方便的得到信号的幅值和相位的信息, 这些信息可以更加有效地实现对振动信号的分析。

数字信号处理 (DSP) 应用技术是基于可编程超大规模集成电路技术 (VLSI) 和计算机技术发展起来的一门重要技术^[8], 以 DSP 器件为核心的数字信号处理系统具有实时性强, 利于并行处理等优点。DSP 因其独特的硬件结构, 具有非常强的运算能力, 非常适合于需要大量数字信号处理的场合。本文使用 TI 公司的高性能 DSP 芯片 TMS320C6713, 设计了能够快速完成数据采集、处理和传输的振动信号分析处理的平台, 完成对机械设备振动信号的实时采集和分析, 实现对机械设备的工作状态进行监控。

1 需求分析

振动信号分析系统主要应用于机械设备的工作现场测量,

收稿日期:2015-11-02; 修回日期:2015-12-24。

作者简介:宋宇晨(1992-),男,内蒙古包头人,硕士研究生,主要从事嵌入式系统开发方向的研究。

环境恶劣。因此要求振动信号分析系统要便于携带。为实时监测系统的工作状态，还需要系统具有较强的数据处理能力，能够实现大量数据的存储和运算。系统还应具备自启动的功能，在测试现场能够自主启动并工作，无须下载程序。考虑到运算过程中需要进行数据的临时存储，系统还应具备外扩存储器的能力。为实现与上位机间的数据交互，系统还应具备串口通信的能力。综上，对该振动信号分析系统提出了如下的功能要求和技术指标。

功能要求：

- 1) TMS320C6713 能够正常工作在较高时钟频率以满足系统的运算实时性要求；
- 2) 具备信息传输的能力，实现基于 UART 接口的数据传输；
- 3) 具备信息采集的能力，利用 AD 转换芯片实现系统对外部传感器模拟信号的转换；
- 3) 具备信息快速处理能力，根据实际项目需求实现不同的数字信号处理算法。本设计中实现输入信号的快速傅里叶变换，通过判断信号的频谱特征监控系统的工作状态。

根据系统的功能要求，得到系统的技术指标如下：

- 1) 支持运算速率不低于 200 MHz；
- 2) 支持外扩存储空间不低于 64 Mb；
- 3) 支持串行 UART 接口；
- 4) 支持 AD 转换速率不低于 10 kHz，转换精度不低于 10 bit；
- 5) 具备系统启动、程序存储的能力；

2 系统硬件、软件设计

根据上述的系统功能要求和技术指标，从硬件和软件设计两个部分对系统的设计实现进行说明。

2.1 系统硬件设计

数字信号处理器芯片是本系统的关键，其运算速度直接影响系统实时性的实现。本系统中的数字信号处理器芯片采用 TI 公司的 TMS320C6713 芯片。这是一款用于高精度高性能应用的浮点型 DSP 芯片。芯片的内核主频最高可达 300 MHz，处理能力可达 2 400 MIPS。多通道缓冲串口 (McBSP) 可配置为 UART、SPI 等多种不同的数据传输协议。32 bits 的外部存储器接口 (EMIF) 可以与 SDRAM、FLASH 等存储器无缝连接。TMS320C6713 还支持 HPI、I2C 等数据总线，可以方便的实现板卡与总线之间的互连。

1) TMS320C6713 电源电路设计：

TMS320C6713 需采用高精度、稳定的双电源供电，保证系统的正常运行。C6713 工作在双电源电压下，其核心电压为 1.26 V，I/O 模块电压为 3.3 V。本平台选用 TI 公司的开关电源芯片 TPS54310 构成 1.26 V 稳压电路为内核供电^[9]。选用 TI 公司的线性稳压电源芯片 TPS75733 构成 3.3 V 稳压电路为 I/O 供电。利用 TPS54310 芯片的上电完成引脚 (PWRGD) 和 TPS75733 的使能引脚 (EN) 以及一个 NPN 三极管构成反向电路实现对两种电源的电源管理。顺序上电控制原理示意图如图 2 所示。

2) TMS320C6713 复位电路：

由于 TMS320C6713 的工作频率达到 200 MHz 以上，运行时很可能发生干扰和被干扰的现象，导致系统不稳定，所以

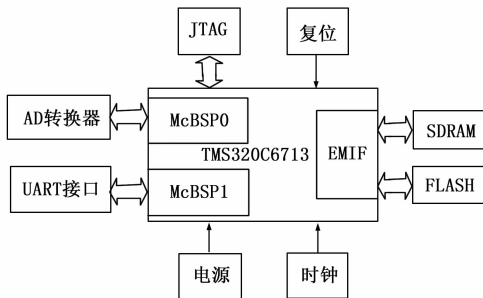


图 1 系统硬件设计框图

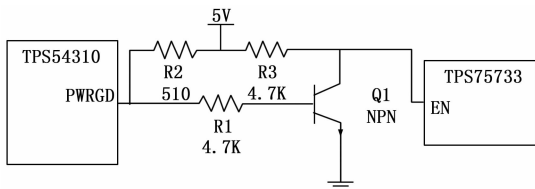


图 2 顺序上电原理示意图

需要复位电路具有监视功能。同时 TMS320C6713 需要系统在上电时为其提供一个 100 ms 至 200 ms 的低电平复位脉冲。设计中采用 TI 公司的 TPS3823 微处理器监控芯片，该芯片在系统上电时能够对上电状态进行监控，上电未完成时，输出复位信号。芯片具有看门狗功能，能够对程序运行状态进行监视。同时芯片还支持外部复位信号输入，便于调试。

3) 模数转换电路：

模数转换电路用于将传感器采集到的模拟信号转换成数字信号，供后端 DSP 芯片进行处理。本系统中使用的模数芯片是 Analog Devices 公司的 AD9221 芯片。该芯片是一款 12 bits，多采样频率、低功耗单电源供电的 A/D 转换芯片。芯片的最大转换速率为 1.5 MHz。同时芯片模拟量的输入范围高度灵活，既可单端输入也可差分输入，模拟输入可以在较大范围内根据不同的外接电路进行配置。该芯片能够完全满足系统的技术指标要求^[10]。

信号采集模块的工作电压为 5 V，而 TMS320C6713 的 I/O 电压为 3.3 V，因此需要在信号采集模块和 DSP 芯片之间设计电平转换芯片。本系统中使用的是 TI 公司的电源转换芯片 SN74ALVC54245 16 bits 双向收发器芯片实现 TTL 与 LVTTTL 逻辑电平的转换。

4) 外部存储器：

本系统中的外部存储器包括一片 SDRAM 芯片和一片 FLASH 芯片。两种存储器共用 TMS320C6713 芯片的 EMIF 接口，实现 DSP 芯片对外部存储器的访问。TMS320C6000 器件的外部存储器接口 (EMIF) 支持各种外部器件的无缝接口，包括同步器件 SBSRAM、SDRAM，异步器件 SRAM、ROM 和 FIFO 等以及外部共享存储器。EMIF 接口将各类存储器的控制信号合并复用^[11]。

SDRAM 芯片用于存储运算过程中产生的大量数据，以提高系统的性能和速度。本系统中使用的 SDRAM 芯片是 MICRO 公司的 MT48LC4M32A2TG SDRAM 芯片，其容量为 64 Mb。

FLASH 芯片用于储存 DSP 芯片的用来装载引导程序和主程序。DSP 在上电时通过引导程序将主程序装载到 DSP 内部运行，从而实现自启动。本系统中使用的 FLASH 芯片是

AMD 公司的 AM29LV800B FLASH 芯片, 其容量为 8 Mb。

5) 异步串行通信接口:

异步串行通信接口用于芯片与外部器件间以及上位机之间的异步串行通信。本设计中将 McBSP1 模块配置为串行数据接口 (Serial Port Mode) 工作模式, 配置相关的寄存器, 实现 McBSP 的异步串行数据传输。

2.2 系统软件设计

系统软件的开发环境为 TI 公司的 CCS3.3 集成开发环境。完整的 TMS320C6713B 软件工程如图 3 所示。工程中需要包含 4 种不同的文件。

1) 命令文件。后缀名为 “.cmd”, 用于分配存储空间;

2) 库函数文件。后缀名为 “.lib”。本工程中包含 “rts6700.lib” 和 “csl6713.lib” 两个库函数文件。“rts6700.lib” 是 C 语言系统库, 系统库包含了编译器提供的所有功能; “csl6713.lib” 是 TI 针对 C6713 芯片的芯片支持库 (Chip Support Library)。该库函数为 TMS320C6713B 的片上外设提供了 C 语言的配置和控制接口。

3) 含有 main () 函数的 C 语言源文件 (.c)。系统初始化完毕后, 就把控制权交给 main () 函数。

4) 矢量跳转表文件, 通常是汇编文件 (.asm) 形式。当 CPU 响应一个中断时, 程序指针 (PC) 就会跳到该中断对应的中断向量表地址, 执行跳转指令。

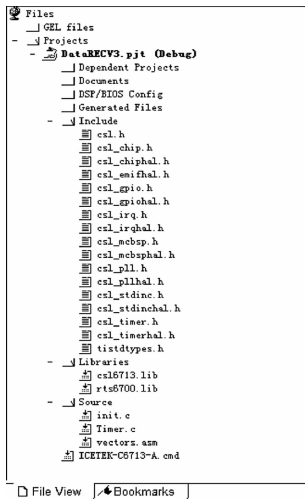


图 3 TMS320C6713B 完整工程构成

软件部分根据功能可以分为系统初始化模块、数据采集模块、数据通信及存储模块以及数据处理模块 4 个部分。软件的总体流程如图 4 所示。

TMS320C6713B 芯片在使用前首先要对其各个模块进行基本功能的配置, 包括芯片运行的时钟频率, 片内存储空间的分配等等。通过配置各个功能模块, 并通过对各个模块进行操作, 可以实现不同的数据通信协议及数据存储方式。

数据采集模块、数据传输及存储模块使用 TMS320C6713B 初始化后的各个模块实现不同的数据传输和存储功能。

数据处理模块针对不同的应用场合实现不同的数字信号处理算法。算法包括时域和频域两个部分, 本设计中信号进行 FFT 变换。通过比较信号的频谱, 判断机械系统的工作状态是否存在异常。

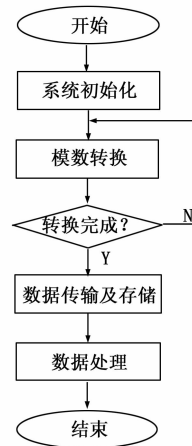


图 4 系统软件总体流程图

实际工作过程中, 系统初始化完成后, 首先利用 AD 转换芯片将传感器测量得到的模拟信号进行 A/D 转换。根据实际需求利用 TMS320C6713B 芯片完成数据的传输和存储操作。根据实际需求实现相关的数字信号处理算法。根据处理结果判断机械系统的工作状态。

1) 系统初始化:

系统初始化包含软件参数初始化和 TMS320C6713B 芯片外设初始化两个部分。

软件参数初始化主要完成系统软件参数的初始化, 保证程序开始运行时各个参数值的正确性。

TMS320C6713B 模块的初始化。本系统中使用到的 TMS320C6713B 的功能模块包括锁相环、定时器、中断、多通道缓冲串口、外部存储器接口和 GPIO 六个部分。在初始化过程中, 要分别根据各个部分不同的功能进行初始化配置。

2) 模数转换:

AD 采集部分的功能通过 McBSP0 接口实现。将 McBSP0 接口配置成 GPIO 的工作模式, 实现对 AD 转换芯片的控制。

数据传输部分的功能通过 McBSP1 接口实现。将 McBSP1 接口配置成串行工作模式, 实现系统的异步串行通信功能。

数据存储部分的功能通过 TMS320C6713B 芯片的 EMIF 接口实现。在初始化模块中配置完 EMIF 接口的寄存器后, 直接操作相关寄存器就可以完成对 SDRAM 芯片和 FLASH 芯片的读写^[12-13]。

3) 数据处理:

数据处理部分的程序是根据系统的实际应用弯沉相关的数字信号处理算法。利用 TMS320C6713B 芯片较高的运算性能, 实现复杂的算法。

本系统中实现的是基本的 1 024 点 FFT 算法, 通过频谱得到原 waveform 的主要频率成分, 从而实现对机械设备工作状态的判断。

3 振动信号分析算法

振动信号分析的基本流程如图 5 所示。

传感器实时采集机械设备在工作环境中的振动数据, 所得的原始信号不可避免的包含噪声干扰^[14]。信号的预处理及滤波的主要功能是除去信号中包含的噪声。主要方法包括去趋势项、移动平均、指数平均等等。

振动信号的处理方法很多,大致可分为 2 类:一类是传统方法,典型的有幅值域分析法、傅里叶变换和相关分析等。另一类是现代方法,典型的有 Wigner-Ville 分布、谱分析、小波分析、盲源分离、Hilbert-Huang 变换和高阶统计量分析等^[15]。

FFT (fast fourier transform, 快速傅里叶变换) 是计算离散傅里叶变换的各种快速算法的统称^[16]。它把时域信号转换成频域信号进行分析,是最基本、最经典的一种信号处理方法,广泛应用于众多领域。

旋转机械在发生故障时,机械振动的频率会发生较大的变化,因此使用 FFT 方法处理信号,分析振动信号频谱的主频率,就可判断当前情况下机械系统的工作状态^[6]。

本系统中实现的是基 2 频率抽取 FFT 算法,FFT 点数为 1 024 点。基 2 频率抽取 FFT 是将时域序列 $x[k]$ 按前后两部分以一定规律组合后形成两个短序列,由此两个短序列的 DFT 合成的频域序列 $X[m]$ 按奇偶顺序排列,故称为基 2 频率抽取 FFT^[17]。

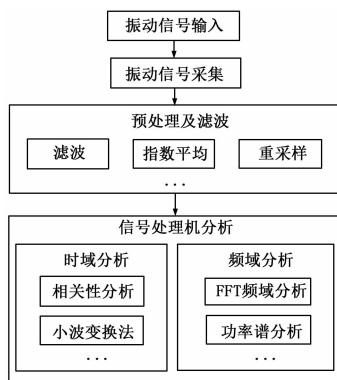


图 5 振动信号分析基本流程

4 系统调试

本系统使用美国凯斯西储大学轴承数据中心的轴承数据为对象,对其进行 1 024 点的快速傅里叶变换,通过频谱判断系统的工作状态。

4.1 实验数据介绍

本实验中使用轴承数据中采样频率为 12 KHz 时的数据。实验包含五组不同工作模式下的数据,分别是转速为 1 797、1 772 和 1 750 rpm/s 下的正常数据以及转速为 1 797 时轴承故障点为 0.014 mm 和 0.021 mm 时的故障数据^[18]。使用 CCS3.3 软件绘制各组数据的前 1 024 个点的波形,如图 6~10 所示。

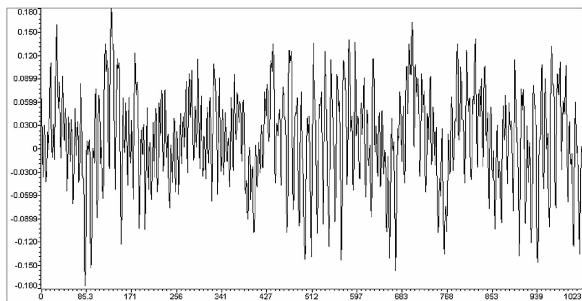


图 6 1 750 rpm/s 正常工作数据

4.2 实验结果

由图 6~10 可得,正常数据的波形与故障数据的波形均存

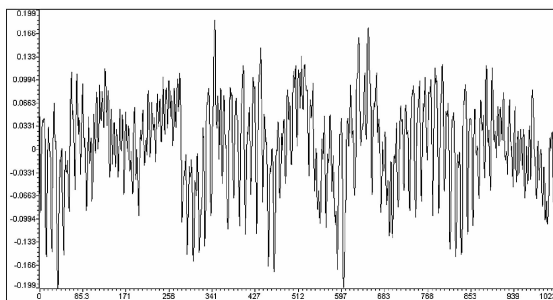


图 7 1 772 rpm/s 正常工作数据

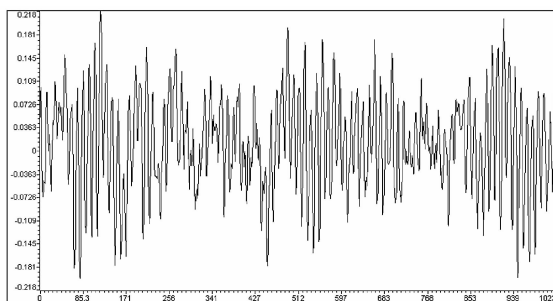


图 8 1 797 rpm/s 正常工作数据

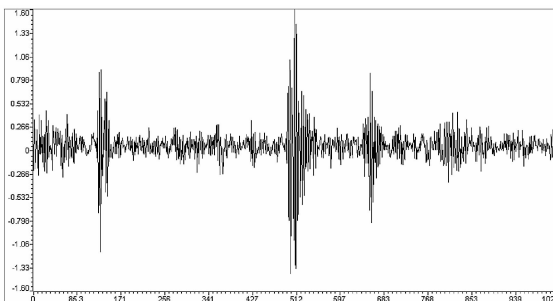


图 9 1 797 rpm/s 0.014 mm 故障点数据

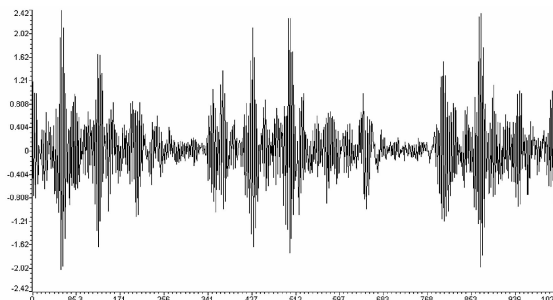


图 10 1 797 rpm/s 0.021 mm 故障点数据

在明显的差异。但这种差异无法通过软件直接识别。本实验中使用 FFT 方法实现对输入信号进行时域和频域的转换,通过对比频谱主成分的方法,实现对轴承工作状态的监控。

使用 CCS3.3 软件绘制各组数据 FFT 后的结果,如图 11~14 所示。所有图中,上方频谱均为 1 797 rpm/s 正常工作数据的 FFT 结果;下方频谱为其他各组数据的 FFT 结果。

4.3 实验结论

通过图 6~13 不难看出,不同转速情况下,正常工作的齿轮波形大致相同,但通过图 11 和图 12 的频谱对比图中可以很容易的看出其频率的主成分大致相同,但主成分对应的幅值存在较大的差别。

通过图 11、12 不难看出,相同转速情况下,正常工作状

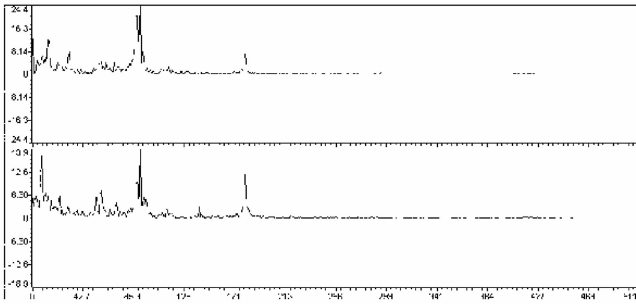


图 11 1 797 rpm/s 正常数据与 1 772 rpm/s 正常数据 FFT 结果对比

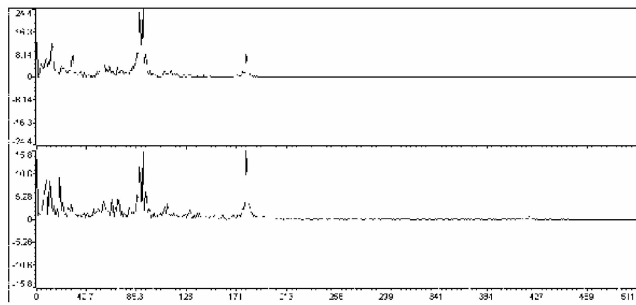
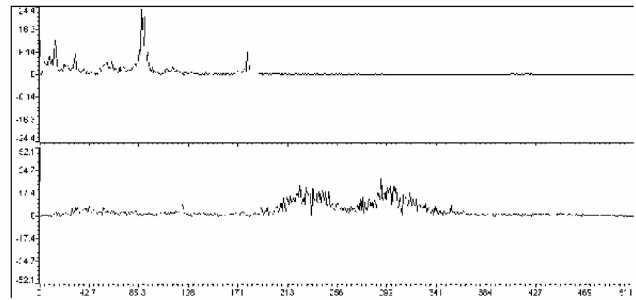
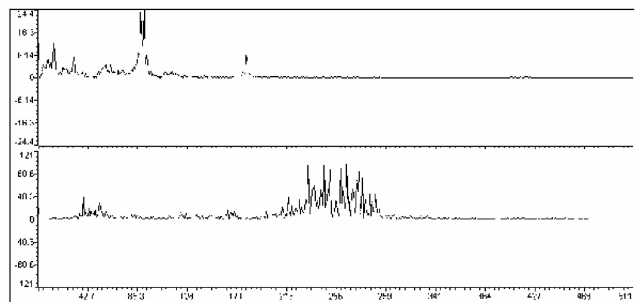


图 12 1 797 rpm/s 正常数据与 1 750 rpm/s 正常数据 FFT 结果对比

图 13 1 797 rpm/s 正常数据与 1 797 rpm/s
0.014 mm 故障数据 FFT 结果对比图 14 1 797 rpm/s 正常数据与 1 797 rpm/s
0.021 mm 故障数据 FFT 结果对比

态以及不同故障点大小情况下的波形存在很大的差别, 但仅仅通过这些数据很难实现对故障的判断。但通过图 13 和 14 很容易得到正常工作状态下信号的频率主成分与故障状态下信号的频率主成分存在很大的差别。

通过以上分析, 对轴承数据进行快速傅里叶变换后, 可以很方便的区分轴承的工作状态, 证明系统设计的正确性。

5 结论

系统调试结果表明, 采用 TMS320C6713 芯片为核心组成的嵌入式在线振动信号分析系统具有很高的运算精度和实时

性。同时使大大减小仪器设备的体积, 大大提高了系统的工作效率。通过添加神经网络算法, 还可实现故障识别和定位。另外, 可用计算机对测量结果进行储存、拷贝、再现等, 为离线的振动信号分析系统提供了很多方便。

本系统在存在实时性高, 运算精度高等优点的同时, 也存在一些不足。在系统中, 只进行了数字处理部分的设计和调试, 而未包含有前端的信号采集和调理电路, 这样会使整个系统数据传输的效率较低。另外, 虽然 TMS320C6713 拥有丰富的外设接口, 但要充分发挥芯片的运算能力, 就需要减少芯片在系统控制中的资源分配。因此, 在面对多传感器的复杂监测时, 本系统还应包含类似 FPGA 芯片的具有较高控制能力的芯片, 使 TMS320C6713 充分发挥其在高速数据处理中的优势。

参考文献:

- [1] 徐玉秀, 原培新, 杨文平. 复杂机械故障诊断的分形与小波方法 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.
- [2] 廖科. 基于小波变换的机械振动信号分析 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2010.
- [3] 张峰, 赵慧昌, 石现峰. 便携式多通道振动信号分析仪数据采集模块设计 [J]. 自动化与仪表, 2014 (1): 15-18.
- [4] 童常根, 郭晓宇, 郑玉冰. 基于 DSP 的振动信号检测系统的设计 [J]. 计算机测量与控制, 2008, 16 (5): 627-629.
- [5] 朱瑜. 基于网络的机械振动信号分析系统研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2013.
- [6] Patil S. S., Gaikwad J. A. Vibration Analysis of Electrical Rotating Machines using FFT [A]. 4th ICCCNT 2013 [C]. 2013, 07.
- [7] Giovanni Betta, Consolatina Ligouri, Alfredo Paolillo, Antonio Pietrosanto. A DSP-Based FFT-Analyzer for the Fault Diagnosis of Rotating Machine Based on Vibration Analysis [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. 51, No. 6, December 2002, 1316-1322.
- [8] 王瑞平, 彭云峰. 基于 DSP 嵌入式数据采集与处理系统设计与实现 [J]. 计算机测量与控制, 2014 (6): 1932-1934.
- [9] Texas Instruments. 3-V to 6-V Input, 3-A Output Synchronous-Buck PWM Switcher With Integrated FETs [EB/OL]. <http://www.ti.com.cn/cn/lit/ds/symlink/tps54310.pdf>, July 1, 2015.
- [10] Analog Devices. AD9221/AD9223/AD9220; Complete 12-Bit 1.5/3.0/10.0 MSPS Monolithic A/D Converters Data Sheet [EB/OL]. <http://www.analog.com/cn/search.html?q=AD9221>.
- [11] 周顺燕, 吴丹. TMS320C6713 DSP 的高速 EMIF 数据接口设计与实现 [J]. 计算机测量与控制, 2010, 18 (7): 1654-1656.
- [12] Texas Instruments. TMS320C6000 EMIF-to-External SDRAM Interface [EB/OL]. <http://www.ti.com.cn/cn/lit/an/spra433e/spra433e.pdf>, September, 2007.
- [13] Texas Instruments. TMS320C6000 EMIF to External Flash Memory [EB/OL]. <http://www.ti.com.cn/cn/lit/an/spra568a/spra568a.pdf>, February, 2002.
- [14] 李舜韶, 郭海东, 李殿荣. 振动信号处理方法综述 [J]. 仪器仪表学报, 2013, 34 (8): 1907-1915.
- [15] 陈后金. 数字信号处理 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2004.
- [16] 程佩青. 数字信号处理教程 (第三版) [M]. 北京: 清华大学出版社, 2007.
- [17] 张乾. 基于振动信号的轴承状态监测和故障诊断方法研究 [D]. 长沙: 中南大学, 2012.