

# 基于 FPGA 的便携式轴承状态监测仪设计

柯磊<sup>1</sup>, 靳宇哲<sup>2</sup>, 师皓<sup>3</sup>

(1. 攀枝花学院 交通与汽车工程学院, 四川 攀枝花 617000; 2. 北京燕山石油化工有限公司, 北京 102500;  
3. 北京化工大学 信息科学与技术学院, 北京 100029)

**摘要:** 针对目前包络检波算法计算复杂且不宜在便携式设备上实现轴承监测诊断的问题, 介绍了一种基于 FPGA 的便携式轴承状态监测仪的设计方案; 仪器采用 FPGA 作为主控制器, 通过模拟信号放大电路、滤波电路和包络检波电路等硬件电路实现了包络信号的提取、检波功能, 并使用 FPGA 的 IP 核对包络信号进行 DFT 运算得到频谱信息, 最后通过液晶屏进行结果显示, 为轴承状态监测诊断提供依据; 文章仪器基于 FPGA 的嵌入式架构, 通过硬件实现包络检波功能, 具有运算速度快、便携性强、低功耗、高性能的优点。

**关键词:** 嵌入式; 故障诊断仪; 包络检测; 轴承监测

## Design of Portable Bearing Condition Monitoring Device Based on FPGA

Ke Lei<sup>1</sup>, Jin Yuzhe<sup>2</sup>, Shi Hao<sup>3</sup>

(1. Department of Transportation and Automotive Engineering, Panzhihua University, Panzhihua 617000, China;  
2. Sinopec Beijing Yanshan Company, Beijing 102500, China;  
3. Department of Information Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

**Abstract:** The current envelope detection algorithm is complex and not suitable for bearing monitoring devices. A design scheme about portable bearing condition monitoring device based on FPGA is proposed. FPGA is the main controller of this instrument. It uses the analog signal amplifier circuit, filter circuit and envelope detection circuit to extract and detect the envelope signal. And it uses the IP core of FPGA to calculate the spectral information through DFT operation. Finally the results display on the LCD which is useful bearing condition monitoring and diagnosis. The instrument is based on the embedded FPGA architecture and uses the hardware circuit to implement the envelope detection function with a high speed, portability, low power, high performance advantages.

**Keywords:** embedded system; portable machine condition checker; envelope detection; bearing monitor

## 0 引言

伴随着工业的进步与科技的发展, 现代机械设备已经在社会生产中占据了重要的地位。设备故障诊断技术可以及早发现设备的故障, 有效的预防了灾难性事故的发生, 广泛应用在石化、电力、船舶和车辆等行业中。

目前故障检测技术中最常使用的是振动诊断技术, 即通过检测振动信号的加速度、速度、位移、相位等信息来诊断旋转式机械的运行状态。但轴承故障却无法从上述信息中获得, 因此如何获得轴承故障信号特征成为国内外学者研究的热点和难点。目前轴承故障诊断的方法主要有基于希尔伯特变换和基于小波变换的包络分析法, 但是由于计算复杂耗时长, 不宜在基于嵌入式系统的巡检设备上实现<sup>[1-2]</sup>。

本文提出了一种基于 FPGA 的便携式轴承状态监测仪的设计方案, 通过硬件模拟电路进行包络检波的方法实现对轴承运行状态的监测, 掌握故障的早期发生、发展, 准确判断设备故障严重程度, 从而实现设备故障的预防、预测。

## 1 检测原理

当轴承发生故障时, 由于元件的损伤会产生一个周期性

的脉冲冲击, 这个微小的冲击会激起轴承系统的高频固有振动, 从而在该频率附近形成以特征故障频率为基频的边带, 此边带可被认为是故障信号调制的结果<sup>[3]</sup>。因此, 通过解调信号获取包络线, 并进行时频域特征分析即可达到故障诊断的要求。

本仪器使用电荷输出型加速度传感器将振动信息转变成电信号并将其幅值进行放大。故障引起的低频冲击脉冲激起了高频共振, 但是高频冲击产生的小幅值信号会湮没在幅值较高的低频信号中。因此首先需要通过滤波电路滤掉低频信号, 之后对通过滤波器的高频信号进行包络检波, 可以得到一个被放大展宽的波形, 它是一个与低频冲击相对应的解调信号<sup>[4]</sup>, 这就是判断设备早期故障的重要依据。最后通过 A/D 转换器将电信号转换成数字信号, 传输给处理器进行数据处理和显示。

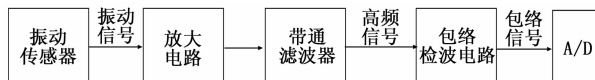


图1 包络检测原理框图

## 2 硬件及软件设计

### 2.1 系统总体设计

轴承状态监测仪的系统结构如图 2 所示, 系统主要由 FP-

收稿日期: 2014-05-22; 修回日期: 2014-07-14;

作者简介: 柯磊(1978-), 男, 四川自贡人, 讲师, 主要从事测控技术方向研究。

GA、传感器、信号调理模块、A/D 转换器、电源管理模块、显示屏键盘等组成。

仪器选用 FPGA 作为整个系统控制及运算的核心, 选用 Xilinx 公司的 Spartan-3 系列, 具有丰富的 IP 核和高性能的并行计算能力, 并且可以在 FPGA 内部构造片内 FIFO 和存储器, 用于数据缓冲和存储。A/D 转换器使用 MAX1247, 具有 12 位采样精度 133 ksp/s 采样速率, 可使用单电源 3.3 V 供电, 通过 SPI 接口与 FPGA 相连接。通信芯片使用 CP2102, 将 UART 串口转换为 USB 接口与上位机通信。并通过 I<sup>2</sup>C 总线扩展 DS1302 芯片用于提供测试时的日期时间信息。

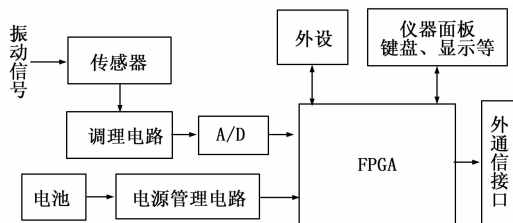


图 2 巡检仪系统结构框图

### 2.2 放大滤波电路设计

电荷型加速度传感器其输出信号在 mV 级别, 所以需要在信号处理前先对信号进行放大。传感器输出信号首先经过两级 RC 低通滤波电路, 用来除去信号中耦合的高频噪声干扰, 然后使用两组低噪声轨对轨运放构成的反向放大器实现信号的降噪与放大, 电路如图 3 所示。

带通滤波器使用低通滤波器与高通滤波器串联组成。为了获得陡峭的截止边缘与平滑的通带频响曲线, 使用两个二阶巴特沃斯低通滤波器和两个二阶巴特沃斯高通滤波器串联组成四阶滤波器。带通滤波器可实现去除噪声频率、选择目的信号的作用, 并保证 A/D 转换器在进行采样时满足采样定理, 达到抗混叠的目的。滤波截止频率可用下式计算, 截止特性等于阶数乘以 6 dB/oct。本仪器选取的加速度信号频率范围是 500 Hz ~ 10 kHz<sup>[5]</sup>。

$$f_c = \frac{1}{2\pi C_f R_f} \quad (1)$$

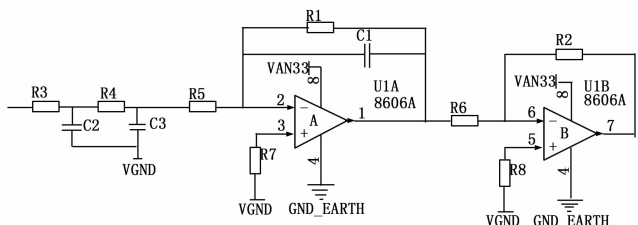


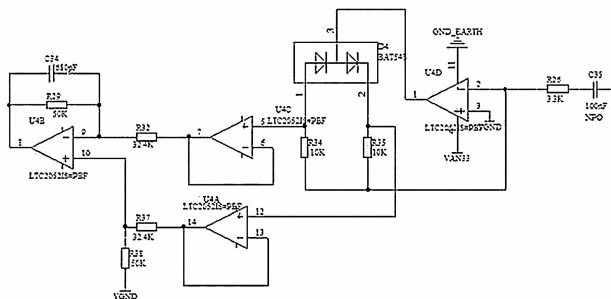
图 3 信号放大电路图

### 2.3 包络检波电路设计

滤波电路后的高频信号进入包络检波电路进行包络检波处理。包络检波电路由 3 个部分组成, 如图 4 所示。由于整个系统使用单电源 3.3 V 供电, 信号以偏置电压 1.5 V 为参考, 所以在进入包络检波电路之前先经过一个电容进行隔直操作, 去除偏置电压。利用二极管的单向流通效应, 在第一级电路中将信号的正负半轴分开。如图 5 所示, 当图 5 (a) 表示输入

的正弦信号, 图 5 (b)、(c) 分别为这级电路输出的信号正、负半轴信号。

其次使用两个运放作为跟随器, 防止信号由于负载的影响而发生变化。最后一级为低通放大滤波电路, 将负半轴信号输入到运放的负极, 正半轴信号输入到运放的正极, 这样输出波形中负半轴的信号翻转到正半轴。由于硬件对信号进行绝对值操作后峰峰值减小, 所以通过电阻配置对输出信号进行放大, 放大倍数为 1.5~2 倍。输出波形如图 5 (d) 所示。<sup>[4]</sup>



### 2.5 软件设计

本仪器软件主要包括采集存储模块、数据计算模块、主控模块及各外围接口模块组成,如图 7 所示。其中主控模块负责接收和发送控制指令,比如接收按键输入信息、控制电源管理芯片上下电、接收电源管理芯片低电压指示信号、接收 RTC 时间信息、并给采集模块发送启动指令、接收数据处理结果传送到显示模块。采集驱动模块负责驱动 A/D 转换器进行模拟信号到数字信号的转换;数据处理模块负责将 A/D 采集的数据进行去直流、求峰值及 DFT 计算等。显示模块负责驱动 LCD 显示屏将计算结果实时显示在仪器上;通信模块负责驱动串口与外界进行数据传输。

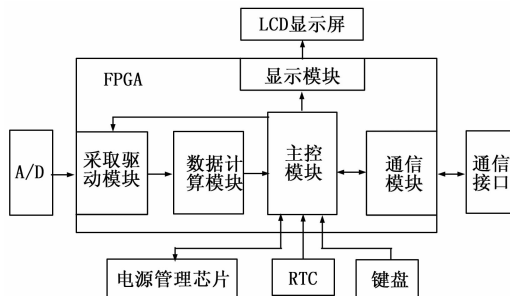


图 7 软件设计框图

便携式巡检仪上电后首先进行初始化操作,之后等待按键响应,当按键按下时主控模块给采集驱动模块发送开始指令,A/D 转换器开始工作并将采集到的数据存在片内 FIFO 中,当数据数量达到 4 096 个之后通过流水模式传给 DFT 模块进行计算,并在 LCD 上显示计算结果。若按键持续按下则持续进行计算并在 LCD 上实时刷新计算结果,当按键松开后,停止采集驱动模块和数据计算模块工作,并锁定 LCD 上显示的结果<sup>[6]</sup>。

由于每个振动传感器的输出特性有差异,在首次使用或者使用便携式巡检仪一段时间之后,需要使用标准振动台对传感器进行标定操作,作为后续计算的参考值。

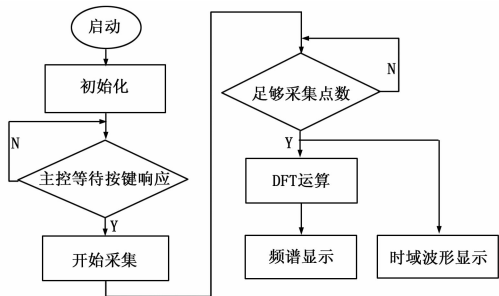


图 8 程序流程图

### 3 实验结果与分析

选取某石化企业的常减压蒸馏装置进行实验,实验机组概貌图如图 9 所示。使用传统方法对该机组进行日常巡检时,图中监测点的振动速度波形图如图 10 所示。振动速度在 2 mm/s 左右,远低于 ISO10816-3 标准中的报警限值。接下来使用本仪器进行包络检测,其包络时域波形图和包络频谱图如图 11~12 所示,可以发现包络峰值已达到 6 gIE 以上,已经超过设

定的报警门限 5 gIE,并且在包络频谱图中也可以发现其故障特征。因此,普通的振动诊断方法无法发现轴承初期的故障,本仪器的包络检测可以对轴承的故障进行早期诊断。

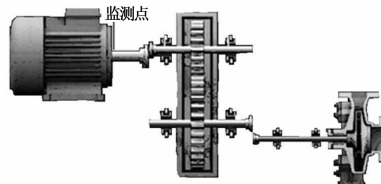


图 9 实验机组概貌图

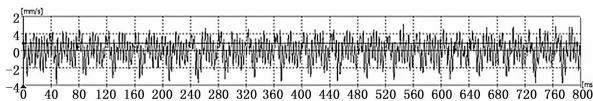


图 10 振动速度波形图

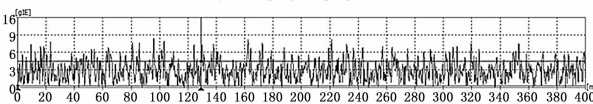


图 11 包络波形图

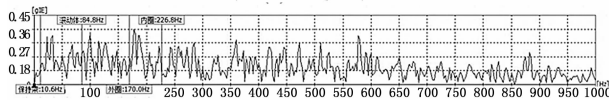


图 12 包络频谱图

### 4 总结

针对轴承设备的故障诊断一直是故障诊断中的难点,轴承齿轮的早期磨损故障会形成很弱的冲击,通过提取加速度高频包络信号可检测到此故障信号,本文基于此原理设计了一款便携式轴承状态监测仪。本仪器使用加速度振动传感器获取振动信号并通过放大、滤波、包络检波电路提取包络信号,通过 A/D 转换为数字信号并由 FPGA 通过运算得到频域信息,为轴承故障诊断提供参考。本仪器体积小小巧方便携带,可进行实时检测,可以发现设备表面疲劳损伤、磨损等早期故障,提早预防事故的发生,具有重要的诊断意义。

#### 参考文献:

- [1] 黄建红,汪庆年,章顺华,等. 基于小波包频带能量特征的包络分析在滚动轴承故障诊断中的应用 [J]. 南昌大学学报:理科版, 2006, 30 (4): 402-405.
- [2] 张 璇. 基于小波包和 EMD 的滚动轴承故障信号分析 [D]. 北京:北京化工大学, 2008.
- [3] 李 智,陈祥初. 包络分析及其在设备故障诊断中的应用 [J]. 测试技术学报, 2002, 16 (2): 92-95.
- [4] 章 兢. 多电机运行状态计算机在线监测系统 [J]. 仪器仪表与分析监测, 1992, 1: 3.
- [5] 师 皓. 基于嵌入式系统的便携式设备巡检仪研发 [D]. 北京:北京化工大学, 2012.
- [6] 张保钦,等. 基于的管道泄漏信号检测系统的设计 [J]. 计算机测量与控制, 2014, 22 (3): 703-705