

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2416305

基于 STM32 与 FPGA 自适应谱线增强 轴承故障检测系统*

祝克辉 王衍学 戴伟杰

(北京建筑大学机电与车辆工程学院 北京 100044)

摘 要: 滚动轴承在运行过程中出现故障可能会造成严重的后果,对轴承进行在线检测具有重要意义。针对滚动轴承在线检测难题,设计一套基于 STM32 与 FPGA 的便携式轴承故障在线检测系统。在硬件方面,采用 FPGA 芯片作为数据处理单元,实现轴承振动信号 A/D 转换与在线采集,并对采集信号进行降噪、包络谱分析以及故障频率提取,利用 LCD 屏实时显示轴承振动信号时域波形与故障频谱。通过 STM32 单片机设计系统 UI 控制界面,对采样率、波形显示进行控制并显示诊断结果,实现人机友好交互。在算法方面,利用 FPGA 实现自适应谱线增强技术对采集信号进行降噪,通过包络谱分析获得故障频谱并提取故障特征频率。最后利用自建机械综合故障模拟试验台对该系统进行测试,实验结果表明系统可以有效提取轴承故障频率,对比软件检测方案速度提升约 30 倍,满足在线检测需求。

关键词: FPGA;自适应谱线增强技术;STM32;在线检测

中图分类号: TN98 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.40

Adaptive spectral line enhanced bearing fault detection system based on STM32 and FPGA

Zhu Kehui Wang Yanxue Dai Weijie

(School of Mechanical-Electronic and Vehicle Engineering, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China)

Abstract: The failure of rolling bearing in the running process may cause serious consequences, so it is of great significance to carry out on-line detection of bearings. A portable bearing fault on-line detection system based on STM32 and FPGA is designed to solve the problem of on-line detection of rolling bearings. In terms of hardware, the FPGA chip is used as the data processing unit to realize the A/D conversion and on-line acquisition of bearing vibration signal, and the signal noise reduction, envelope spectrum analysis and fault frequency extraction are carried out. The bearing vibration signal time domain waveform and fault spectrum are displayed in real time by LCD screen. The STM32 single chip microcomputer is used to design the system UI control interface, control the sampling rate, waveform display and display the diagnosis result, and realize human-computer friendly interaction. In the aspect of algorithms, adaptive line enhancement technology is implemented by FPGA to reduce the noise of the collected signals, and the fault spectrum is obtained by envelope spectrum analysis and the fault characteristic frequency is extracted. Finally, the system is tested by the self-built mechanical integrated fault simulation test bench. The experimental results show that the system can effectively extract the bearing fault frequency, and the speed is improved by about 30 times compared with the software detection scheme, which can meet the requirements of online detection.

Keywords: FPGA;adaptive line enhancement technology;STM32;on-line detection

0 引 言

滚动轴承是旋转机械应用最多的零件之一,当内圈、外

圈、滚动体等任意一个部分发生损坏,都会为设备正常工作埋下重大安全隐患^[1]。及时评估轴承运行状态,有利于避免因轴承故障导致机械设备出现安全隐患。当前机械结

收稿日期:2024-06-25

* 基金项目:国家自然科学基金(52275079)、广西科技重大专项(桂科 AA23062031)、北京市西城区优秀人才培养项目(06268321001)、青年北京学者项目(21147523014)、北京建筑大学研究生创新项目(PG2024143)资助

构越来越复杂,采集的轴承振动信号,通常包含很多外部干扰信号,会淹没轴承故障脉冲信号,如何降低噪声干扰并突出故障冲击具有重要意义。针对上述问题,目前应用非常广泛的方法是共振解调技术^[2],通过该算法处理轴承故障振动信号得到频谱图,可以提取轴承故障频率,进行后续故障诊断^[3]。但对于不同工况,共振解调算法中带通滤波器的带宽和中心频率不同,需要尝试多次才能确定,导致滤波效果不稳定,因此选择一种更具普适性的降噪算法具有重要意义。自适应谱线增强(adaptive line enhancement, ALE)技术可以用来提高谱线分量,抑制噪声成分,其核心是自适应滤波器可以克服带通滤波器的缺陷,适用性更强^[4]。文献[5]采用 ALE 技术对电液伺服振动台谐振谷进行抑制,相比于传统方法效果更好。杨婧等^[6]提出两级自适应滤波的谱线增强算法,可以更好抑制噪声并提高信噪比。因此 ALE 技术可以起到抑制噪声突出冲击信号的目的。

目前现有的轴承故障检测方案效果较好,但大都是离线进行^[7-8],对旋转状态下轴承进行实时检测,可以及时判断轴承是否存在故障^[9],从而有效避免由轴承故障引发的安全事故。何贞志等^[10]将轴承在线检测系统部署在 LabVIEW 上可以识别多种轴承早期故障,并应用在滚动轴承生产现场。马洋洋等^[11]采用 FPGA 和 STM32 实现了轴承信号的采集、传输以及时域特征计算。刘敬文等^[12]设计了基于 FPGA 的在线检测系统,完成轴承信号时域与频域波形的实时显示。徐雄等^[13]提出一种基于 K 均值和莱特准则的水电机组故障在线检测方案,实现近 100% 的故障检测率,为滚动轴承在线检测系统开发提供了参考方案。郭佑民等^[14]利用 LabVIEW 和 Access 等软件编程开发电机轴承故障监测系统,具有故障识别率高、交互性好等优点。

上述轴承故障检测系统都是采用电脑端软件进行控制,但实际工厂通常拥有许多台旋转机器,例如核电站中的增压水泵和真空泵都需要实时监测其振动信号^[15],倘若为每一台机械都安装计算机检测其运行状态,不仅占用空间还会影响生产,因此设计一套便携式、高效率的轴承故障检测系统具有重要意义。

本文工作的创新点如下:

1)通过 STM32 与 FPGA 设计一套便携式轴承故障检测系统,采用 STM32 开发系统控制界面,FPGA 作为数据处理单元,实现对轴承振动信号的采集处理并提取故障频率,最终完成便携式系统设计。

2)利用 FPGA 实现 ALE 技术对信号进行降噪,目前已有的轴承故障检测系统采用的是带通滤波,然而不同工况条件下,降噪效果并不稳定,因此本文系统采用 ALE 技术对信号进行滤波,以增强算法的通用性。

3)通过自建实验台验证系统的有效性和稳定性,并与软件检测方案进行对比,实验结果表明在实时性方面本文系统明显优于软件检测方案。

1 系统整体实现方案

1.1 整体方案设计

系统由 STM32 显示界面、模拟电路模块、FPGA(数据处理模块)、LCD 显示模块组成。STM32 单片机具有低功耗、丰富外设资源的优点^[16],实时操作性强,便于开发上位机界面。STM32 与 FPGA 采用 UART 通信,通过传输指令控制采样率、波形以及故障频谱显示,并给出轴承故障频率以及可能的故障类型。信号采集模块采用微型采集系统设计,具有低功耗及速度快的优势^[17],通过加速度传感器采集轴承振动信号,利用 A/D 模块将模拟信号转换为数字信号。数据处理模块通过 FPGA 实现,FPGA 具有并行计算能力强、功耗低等优点,可以实现高速信号采集以及数据处理,满足在线检测系统设计的要求,利用 ALE 技术对转换后的信号进行降噪处理,对处理后的信号进行包络谱分析和故障频率提取,并将结果传输至系统控制界面,最后将信号波形和故障频谱通过 LCD 屏显示。系统整体设计框图如图 1 所示。

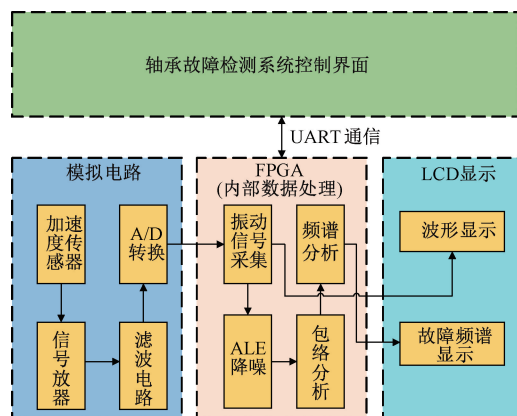


图 1 系统整体框图

Fig. 1 Overall block diagram of the system

1.2 轴承故障特征频率

在轴承旋转过程中,由于轴承元件的缺陷或表面不规则,会产生振动冲击,导致轴承的某个元件以固有频率振动。因此轴承故障特征频率成为诊断轴承故障类型的关键指标,其中,滚动轴承外圈故障频率(f_{OUTER})、内圈故障频率(f_{INNER})计算如下:

$$f_{OUTER} = \frac{Nf_r}{2}(1 - \frac{d}{D}\cos\alpha) \quad (1)$$

$$f_{INNER} = \frac{Nf_r}{2}(1 + \frac{d}{D}\cos\alpha) \quad (2)$$

式中: N 为滚子数; f_r 为转频; α 为径向方向接触角($^\circ$); d 为滚动体直径(mm); D 为节圆直径(mm)。

2 系统硬件架构

2.1 轴承故障检测系统界面

轴承故障检测系统界面通过 TFT-LCD 模块实现,采

用 STM32F407ZGT6 芯片作为控制芯片。为实现较好的人机交互体验,移植轻量级图形库(light and versatile graphics library, LVGL), LVGL 具有界面精美、资源消耗小等优点^[18]。轴承故障检测系统界面功能主要由波形显示、故障频谱显示、采样率控制、故障频率显示、轴承参数以及可能的故障类型 6 个模块组成, STM32 与 FPGA 采用 UART 通信传输控制指令与数据实现以上功能。

2.2 A/D 转换模块

A/D 转换模块采用 AD9280 芯片,该芯片采样精度为 8 bit,会将采集信号数值量化在 0~255 区间内,具有高性能、低功耗等特点。AD9280 芯片与 FPGA 连接原理图如图 2 所示,其中 data[7:0]为采集的 8 位轴承振动信号, OTR 信号判断采集的模拟电压值是否超出量程, AD_CLK 为 A/D 芯片的时钟信号,用于控制数据采样率, STBY 设置为低电平,确保 A/D 芯片可以正常工作。

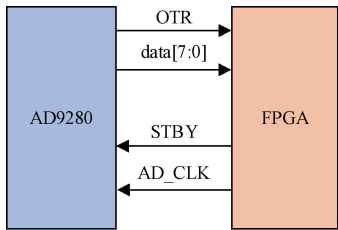


图 2 AD9280 与 FPGA 连接

Fig. 2 The AD9280 connects to an FPGA

3 FPGA 系统模块设计

3.1 FPGA 内部结构设计

FPGA 主要内部结构如图 3 所示,实现的功能主要有信号缓存、ALE 技术降噪、包络分析及频谱分析,通过轴承故障检测系统界面发送控制指令,更改时钟延迟模块中延

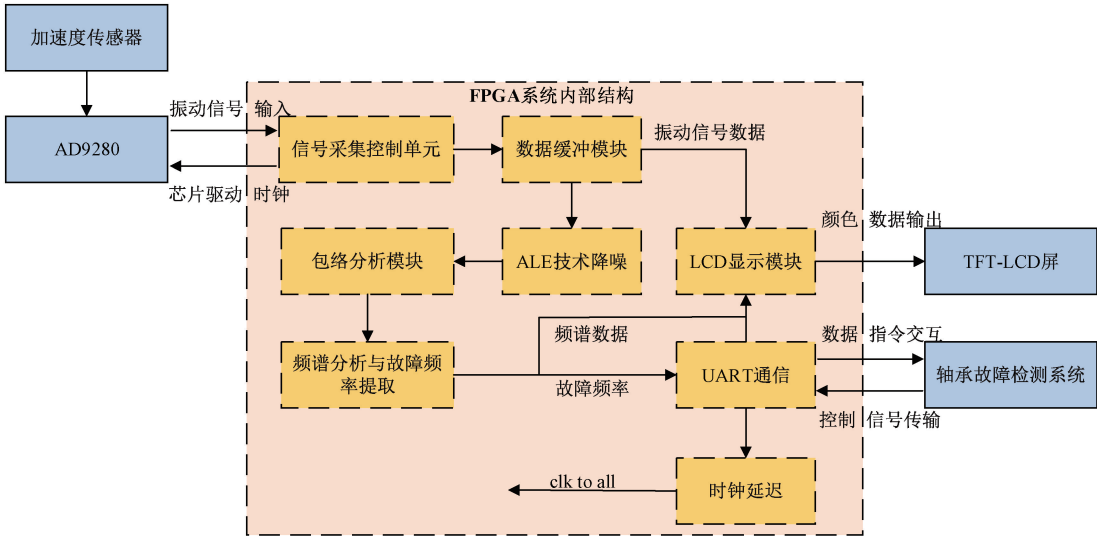


图 3 FPGA 内部结构

Fig. 3 FPGA internal structure

迟计数器参数,输出 A/D 芯片时钟,从而改变采样率,根据指令控制 LCD 显示模块显示波形。降噪后的信号经过包络分析以及频谱分析,获得故障频谱,并将故障频率提取出来,发送至系统控制界面。

3.2 信号缓存模块

轴承信号采样率一般为 12 kHz 或 25 kHz,采样速率较低,为保证轴承检测系统的实时性和后续模块工作准确性,因此设计信号缓存模块,实现信号数据快速读取。信号缓存模块如图 4 所示,轴承振动信号经过 A/D 模块转换后,使用 FIFO(先进先出队列)对数据进行临时缓存, FIFO 读使能(rd_en)、写使能(wr_en)分别由 FIFO_rd、FIFO_wr 两个模块进行控制, din_vld 和 dout_vld 分别是信号输入与输出使能线,当 FIFO 缓存 4 096 个数据点后,读使能拉高,开始输出数据, dout_vld 拉高,控制后续模块读取数据,防止时序混乱, FIFO 中的数据取完后,拉低读使能和

dout_vld,拉高写使能和 din_vld,开始下一组数据写入。

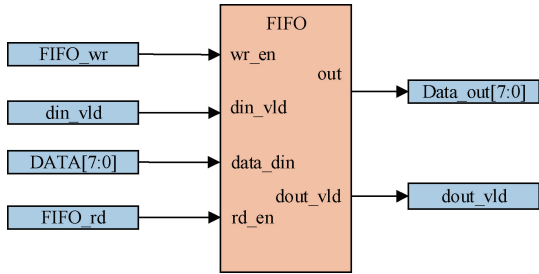


图 4 信号缓存模块结构

Fig. 4 Signal cache module structure

3.3 ALE 技术降噪模块

ALE 技术最早由 Windrow 等提出,其广泛应用于频谱计算及窄带检测等领域^[19]。ALE 技术可以在外界干扰源未知、噪声信号和被测对象信号相似的情况下,可以有

效降低噪声干扰。该技术核心在于实现自适应滤波器,其原理图如图 5 所示,其中输入信号为 $X(n)$,由噪声信号 $v(n)$ 和期望信号 $s(n)$ 组成,将延迟 t 时间后的信号 $X_t(n)$ 作为滤波器参考信号,该信号包含 $s_t(n)$ 和 $v_t(n)$;延迟信号 $X_t(n)$ 经过自适应滤波器滤波得到输出信号 $Y(n)$,也是期望信号 $s(n)$ 的最佳估计值; $E(n)$ 为 $X(n)$ 与 $Y(n)$ 的误差信号,是噪声信号 $s(n)$ 的最佳估计值。滤波器通过误差信号不断反馈,从而调整自己的参数,实现噪声信号去相关,保留有用信号,最终实现降噪。

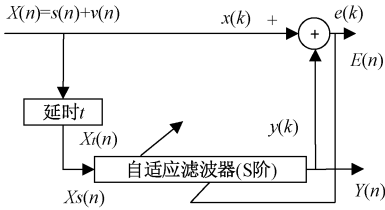


图 5 自适应谱线增强技术原理

Fig. 5 Principle of adaptive line enhancement techniques

设原始输入信号为:

$$X(n) = [x(1), x(2), \dots, x(n)]^T \quad (3)$$

延迟 t 后的信号,即滤波器的输入信号为:

$$X_t(n) = [x_t(1), x_t(2), \dots, x_t(1)]^T \quad (4)$$

设滤波器阶数为 S , k 时刻滤波器的输入信号以及权向量分别为:

$$X_s(k) = [x_t(k), x_t(k-1), \dots, x_t(k-S+1)] \quad (5)$$

$$W(k) = [w_0(k), w_1(k), \dots, w_{s-1}(k)]^T \quad (6)$$

k 时刻,滤波器输出为:

$$Y(k) = W(k)^T X_s(k) \quad (7)$$

此时误差信号为:

$$E(k) = X(k) - W(k)^T X_s(k) \quad (8)$$

滤波器中的权系数更新公式为:

$$W(k+1) = W(k) + 2\mu X_s(k) E(k) \quad (9)$$

μ 为步长因子用来控制算法收敛速度以及稳定性,但收敛速度与算法稳定性是相互矛盾的,因此本文系统采用基于 S 函数的变步长方法控制步长因子来解决该问题,公式如下:

$$\mu = \beta \left\{ \frac{1}{1 + e^{-\alpha |e(n)|m}} - 0.5 \right\} \quad (10)$$

式中: $\beta > 0$ 是控制函数范围的常数; $\alpha < 0$, m 是控制函数形状的常数,决定曲线上升速度; $e(n)$ 为误差。

ALE 技术主要是由延迟模块,加法器,自适应滤波器 3 部分组成,其中延迟模块由 FIFO 和状态机构建。FPGA 实现 ALE 技术的核心在于构建自适应滤波器模块,主要通过权值更新模块、加法器及乘法器完成滤波器设计,自适应滤波算法硬件实现模型图如图 6 所示。

首先将信号 $X(k)$ 以 4 096 个数据点为一组输入滤波器进行滤波,同时将信号输入延迟模块中,当滤波器输出

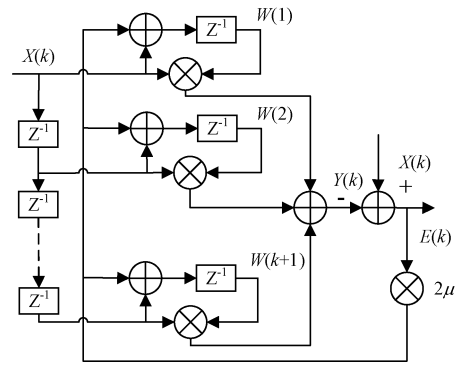


图 6 自适应滤波算法实现模型

Fig. 6 Adaptive filtering algorithm implementation model

后,根据输出信号 $Y(k)$ 求出误差信号 $E(k)$,将误差信号 $E(k)$ 和延迟结束的信号 $X(k)$ 同时传入权值更新模块计算权向量 $W(1)$,再将 $W(1)$ 送入滤波器中,然后再输入下一组数据 $X(k+1)$ 继续重复上述步骤,实现完整滤波。

3.4 包络分析模块设计

包络分析是根据振动冲击脉冲来检测轴承故障状态的有效方法,FPGA 实现包络分析步骤如图 7 所示,Hilbert 变换采用 FIR IP 核实现,滤波器系数由 MATLAB 中的 Fdatool 工具箱确定,生成 Coe 文件导入 FIR IP 核中,将获得的实部信号与虚部信号导入 Mult IP 核中获得乘积信号,信号经过加法器相加后输入到 Cordic IP 核进行开方获得输出信号。

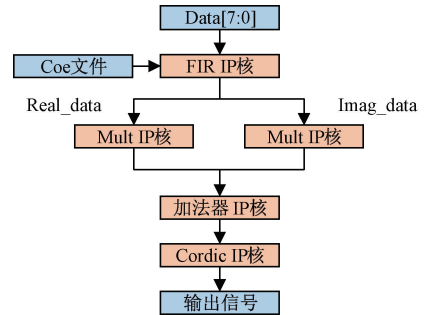


图 7 包络分析模块

Fig. 7 Envelope analysis module

3.5 频谱分析模块设计

频谱分析模块采用快速傅里叶变换 (fast Fourier transformation, FFT) IP 核实现 FFT 算法,FFT IP 核可分为基-2 和基-4 两种结构类型,基数越高,其计算时间复杂度越小^[20]。为满足系统实时性要求,FFT 实现选用基-4 I/O 突发结构实现 4 096 点 FFT 运算,该结构采用流水线设计,利用多个小的简单运算完成一个大的复杂运算,可以显著提升运算效率。

FFT IP 核提供频谱坐标输出,通过遍历算法找到频谱数据的最大值等,并输出此时对应的坐标,在采样率已知的情况下可以计算出该点对应的频率,通过这种方法可

以提取轴承振动信号的故障频率。

3.6 LCD 显示模块设计

显示模块采用 7.2 寸 TFT-LCD 显示屏,分辨率为 800 pixels×480 pixels,由 ILI9341 控制器驱动 TFT-LCD 屏显示,该控制器采用 RGB888 格式存储颜色数据,因此屏幕颜色的读取写入均通过 24 根数据线来控制,利用 FPGA 控制输出 24 位数据可以实现波形显示,LCD 波形显示模块如图 8 所示,为了保证显示效果,先将波形数据放进 RAM 缓存中,其中 addr[11:0]为读地址信号,然后将输出数据与 LCD 显示模块中的像素信号纵坐标进行数值比对,确定该数据点位于屏幕上的具体位置,最后输出 24 位 RGB 数据,实现信号波形与故障频谱显示。

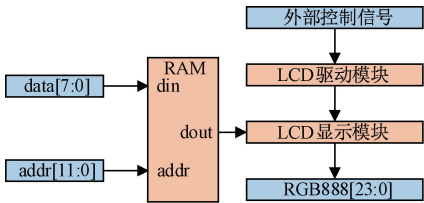


图 8 LCD 显示模块
Fig. 8 LCD display module

4 实验与结果分析

为验证该便携式检测系统的有效性和可行性,在自建机械故障综合故障模拟实验台上进行实验测试,实验台主要分为 3 个部分,分别是驱动电机、联轴器以及故障轴承,故障轴承安装在电机附近,实验所用轴承型号为 ER-12K 深沟球轴承,其参数如表 1 所示,实验轴承为内圈故障。

表 1 滚动轴承 ER-12K 参数

Table 1 Rolling bearing ER-12K parameters

内圈 直径/ mm	外圈 直径/ mm	滚动体 直径/ mm	节圆 直径/ mm	滚动体 个数	接触角/ (°)
25.4	52	7.937 5	33.477	8	0

将电源模块、系统控制界面、A/D 模块、信号放大器、FPGA 模块及波形显示界面进行集成,组成便携式轴承故障检测系统,实验中将系统采样率设置为 25.6 kHz,保持电机转频为 39.84 Hz。待电机转速稳定后开始实验,实验平台如图 9 所示。

4.1 轴承故障诊断实验

为验证该检测系统的有效性和稳定性,进行 2 次不同实验,分别将具有外圈故障以及内圈故障的滚动轴承安装在实验台上,根据式(1)和(2)计算滚动轴承外圈故障及内圈故障的理论特征信号频率为 121.58 Hz 和 197.14 Hz。两次实验结束后,轴承故障检测系统界面显示结果如图 10 所示,波形显示界面如图 11 所示。可以看出,系统提取的

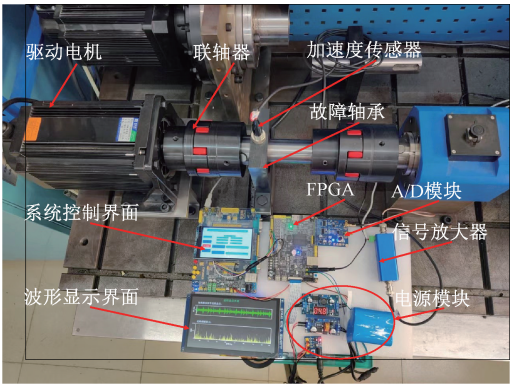
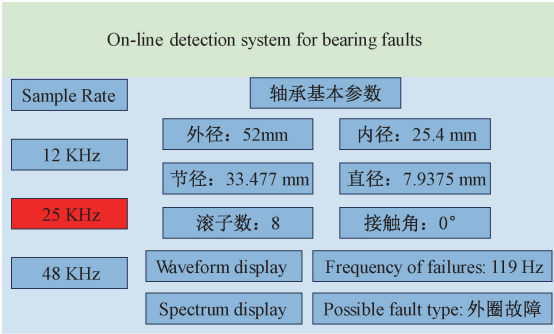
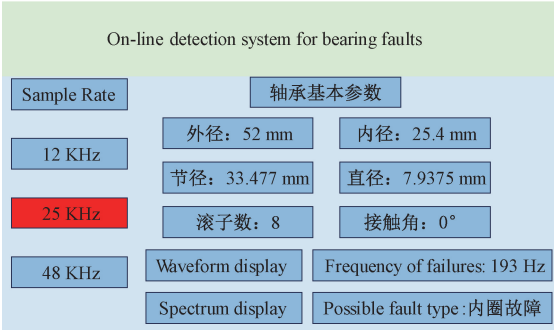


图 9 实验平台
Fig. 9 Experimental platform

故障频率为 119 Hz 和 193 Hz,近似于理论故障频率,并可以准确分辨轴承的故障类型。



(a) 外圈故障系统界面
(a) Outer ring fault system interface



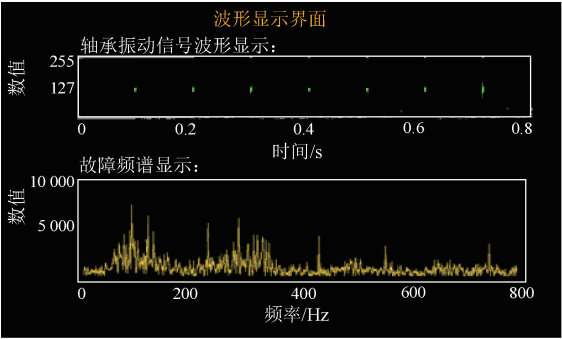
(b) 内圈故障系统界面
(b) Inner ring fault system interface

图 10 轴承故障检测系统界面

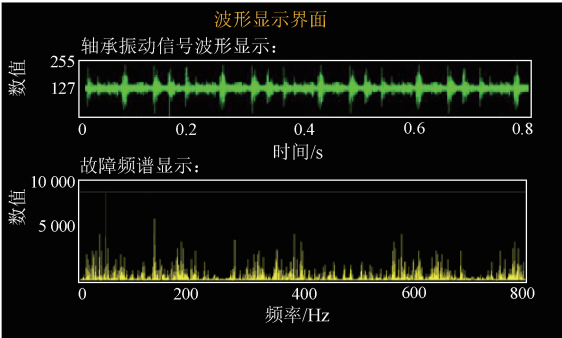
Fig. 10 Bearing fault detection system interface

4.2 ALE 降噪性能分析

通过实际测试证明系统能较准确提取轴承故障特征频率,可以区分轴承故障种类。文献[12]所实现的轴承故障在线检测系统采用的滤波算法为带通滤波,为验证 ALE 技术降噪的性能,将采集的信号导入 Vivado 软件中进行仿真,通过传统带通滤波器和 ALE 技术对轴承外圈故障和内圈故障信号分别进行滤波降噪并对比两种滤波方法的效果,其中 FPGA 实现带通滤波采用调用 FIR IP 核的方



(a) 轴承外圈故障信号波形与频谱
(a) Bearing outer ring fault signal waveform and spectrum



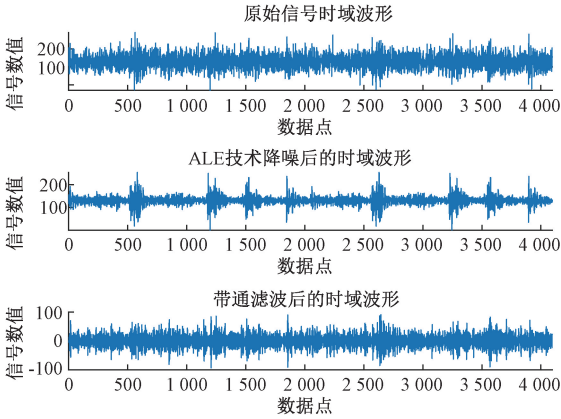
(b) 轴承内圈故障信号波形与频谱
(b) Bearing inner ring fault signal waveform and spectrum

图 11 波形显示界面

Fig. 11 Waveform display interface

式,滤波器系数由 MATLAB FDAtool 工具箱确定。

仿真结束后,将 Simulation 仿真的原始信号以及 2 种方法降噪后的数据截取 4 096 个点导出至 txt 文件中,将文件中的数据导入 MATLAB 软件中进行仿真,3 种信号时域波形图如图 12 所示。可以看出轴承振动信号经过带通滤波器和 ALE 技术处理后,ALE 技术降噪效果明显好于带通滤波器,采用 ALE 技术可以更有效的抑制噪声,使轴承故障冲击特征更加明显,对于轴承故障诊断效果的提升更强。



(b) 内圈故障信号降噪对比
(b) Noise reduction comparison of inner ring fault signal

图 12 降噪效果对比

Fig. 12 Noise reduction effect comparison

4.3 系统性能分析

本文系统采用 FPGAXc7a35tfgg484-2 芯片作为数据处理单元,系统运行时钟频率为 100 MHz,通过 Vivado2022.2 软件实现 FPGA 工程。FPGA 内部计算资源与存储资源如表 2 所示,其中数值信号处理器 DSP 使用 17.78%,缓冲单元 BUFG 使用 21.88%,查找表 LUT 使用 12.83%,FPGA 芯片内部资源分配合理,且留有余量,便于系统进一步开发。

表 2 计算资源与存储资源消耗

Table 2 Computation and storage resource consumption

资源名称	消耗量	资源总量	使用率/%
LUT	2 668	20 800	12.83
LUTRAM	181	9 600	1.89
FF	2 766	41 600	6.65
BRAM	7.5	50	15.00
DSP	16	90	17.78
IO	57	250	22.80
BUFG	7	32	21.88
MMCM	1	5	20.00

为测试系统的实时性能,将算法部署在 MATLAB2019.2 软件中,利用软件检测方案与本系统进行对比,其中 CPU 型号为 Intel i5-9300H,主频为 2.4 GHz。将上文滚动轴承外圈和内圈故障信号作为测试信号,对比结果如表 3 所

表 3 实时性能对比

Table 3 Compares real-time performance

本文系统		MATLAB		理论频率/
时间/ms	频率/Hz	时间/ms	频率/Hz	Hz
2.11	119.00	68.24	122.96	121.58
2.03	193.00	64.02	192.16	197.14

(a) 外圈故障信号降噪对比
(a) Noise reduction comparison of outer ring fault signal

示。由表3可知,两种在线检测方案计算结果均与理论值相近,但软件端所用时间分别为本系统的32.34倍和31.54倍,证明本文设计系统检测速度更快,效率更高。

5 结 论

本文针对滚动轴承无法在线实时高效诊断的问题,搭建了一套基于STM32与FPGA自适应谱线增强轴承故障检测系统。首先利用STM32实现系统控制界面,采用FPGA实现轴承振动信号高速采集,并实现ALE技术对信号滤波降噪,解决目前轴承故障在线检测系统所用带通滤波适应性差的问题,对降噪后的信号进行频谱分析和故障频率提取,通过LCD屏实时显示信号波形与故障频谱,最后将各个功能模块进行集成,完成便携式系统设计。通过自建机械故障实验台对系统有效性以及实时性进行验证,结果表明,系统可以正确提取故障频率并分辨故障类型。在性能方面,与软件检测方案对比,在二者诊断结果均接近于理论值的情况下,本文系统诊断速度提升约30倍,实时性更强,解决传统检测方案效率低的问题,满足在线检测需要。

参考文献

- [1] LI G ZH, TANG G, LUO G G, et al. Underdetermined blind separation of bearing faults in hyperplane space with variational mode decomposition[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2019, 120:83-97.
- [2] 胡鑫磊. 基于自适应共振解调的滚动轴承故障诊断系统设计[D]. 石家庄:石家庄铁道大学, 2021.
HU X L. Design of rolling bearing fault diagnosis system based on adaptive resonance demodulation[D]. Shijiazhuang:Shijiazhuang Tiedao University, 2021.
- [3] 刘文朋, 杨绍普, 李强, 等. 一种自适应共振解调方法及其在铁路轴承故障诊断中的应用[J]. 振动与冲击, 2021, 40(18): 86-93.
LIU W P, YANG SH P, LI Q, et al. Adaptive resonance demodulation method and its application in the fault diagnosis of railway bearings[J]. Journal of Vibration and Shock, 2021, 40(18): 86-93.
- [4] 陈明义, 马增强, 张安, 等. 基于VMD和自适应谱线增强技术的滚动轴承故障诊断[J]. 轴承, 2019, (6): 51-55.
CHEN M Y, MA Z Q, ZHANG AN, et al. Fault diagnosis of rolling bearing based on VMD and adaptive spectral line enhancement techniques [J]. Bearing, 2019, (6): 51-55.
- [5] 王涛. 基于自适应谱线增强器的电液伺服振动台谐振谷抑制的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学, 2017.
WANG T. Research on the electro-hydraulic servo shaking table resonant valley suppression based on

adaptive line enhancer [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2017.

- [6] 杨婧, 程乃平, 倪淑燕. 两级自适应谱线增强算法在弱信号检测中的性能分析[J]. 兵器装备工程学报, 2019, 40(3): 155-160.
YANG J, CHENG N P, NI SH Y. Performance analysis of two level adaptive line enhancement algorithm in weak signal detection [J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2019, 40 (3): 155-160.
- [7] WANG Y J, DING X X, ZENG Q, et al. Intelligent rolling bearing fault diagnosis via vision ConvNet[J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(5): 6600-6609.
- [8] ZHU J, CHEN N, SHEN CH Q. A new multiple source domain adaptation fault diagnosis method between different rotating machines [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2021, 17(7): 4788-4797.
- [9] SHAO Y H, KANG R, LIU J. Rolling bearing fault diagnosis based on the coherent demodulation model[J]. IEEE Access, 2020(8): 207659-207671.
- [10] 何贞志, 陈於学, 邵明辉, 等. 基于LabVIEW的滚动轴承缺陷在线智能检测系统[J]. 仪表技术与传感器, 2017, (7): 72-75.
HE ZH ZH, CHEN Y X, SHAO M H, et al. On-line detection system for defect of rolling element bearings based on LabVIEW [J]. Instrument Technique and Sensor, 2017, (7): 72-75.
- [11] 马洋洋, 陈宏. 基于FPGA和STM32的机械故障监测系统[J]. 仪表技术与传感器, 2022(7): 66-69.
MA Y Y, CHEN H. Mechanical fault monitoring system based on FPGA and STM32[J]. Instrument Technique and Sensor, 2022(7): 66-69.
- [12] 刘敬文, 李俊峰, 乔晓康, 等. 基于FPGA的滚动轴承故障在线检测系统设计[J]. 仪表技术与传感器, 2023 (4): 53-57.
LIU J W, LI J F, QIAO X K, et al. Online fault diagnosis system for rolling bearing based on FPGA[J]. Instrument Technique and Sensor, 2023(4): 53-57.
- [13] 徐雄, 林海军, 刘悠勇, 等. 融合PCA与自适应K-Means聚类的水电机组故障检测在线方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(3): 260-267.
XU X, LIN H J, LIU Y Y, et al. On-line detection method of hydraulic turbine combining PCA and adaptive K-Means clustering[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36(3): 260-267.
- [14] 郭佑民, 宋明瑞, 郭啸. 电机轴承故障监测系统设

- 计[J]. 电子测量技术, 2023, 46(11): 179-184.
- GUO Y M, SONG M R, GUO X. Design of motor bearing fault monitoring system [J]. Electronic Measurement Technology, 2023, 46(11): 179-184.
- [15] CHENG W, XIE SH SH, XING J, et al. Interactive hybrid model for remaining useful life prediction with uncertainty quantification of bearing in nuclear circulating water pump[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2024, 20(2): 2154-2166.
- [16] WANG R, WANG T H. Design of intelligent pension online monitoring system under the environment of internet of things[J]. Instrumentation, 2023, 10(3): 53-64.
- [17] 任勇峰, 冯宇航, 刘东海. 基于 FPGA 的多通道数字变换器的设计与实现[J]. 国外电子测量技术, 2022, 41(4): 176-180.
- REN Y F, FENG Y H, LIU D H. Design and implementation of multi-channel digital converter based on FPGA[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2022, 41(4): 176-180.
- [18] 余胜贤. 基于蓝牙 Mesh 和 WiFi 的智能家居控制系统设计与实现[D]. 杭州:杭州电子科技大学, 2023.
- YU SH X. Design and implementation of smart home control system based on bluetooth mesh and WiFi[D]. Hangzhou: Hangzhou Dianzi University, 2023.
- [19] 赵景波, 刘慧敏, 张磊. 基于谐波小波的自适应谱线增强及其应用研究[J]. 电机与控制学报, 2013, 17(10): 77-84.
- ZHAO J B, LIU H M, ZHANG L. Adaptive line enhancement based on harmonic wavelet application research[J]. Electric Machines and Control, 2013, 17(10): 77-84.
- [20] 李浩, 王厚军, 肖磊, 等. 高速并行数字调制信号的产生与实现[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(2): 110-118.
- LI H, WANG H J, XIAO L, et al. Generation and implementation of high-speed parallel digital modulation signals[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(2): 110-118.

作者简介

祝克辉, 硕士研究生, 主要研究方向为 FPGA 开发、信号处理。
E-mail:17630974192@163.com

王衍学(通信作者), 教授, 博士生导师, 主要研究方向为装备故障诊断与智能维护、剩余寿命与健康管理及信号处理与特征提取等。
E-mail:wyx1999140@126.com