

基于声发射技术的桥梁关重结构监测系统的设计与实现

贺恒毓^{1,2}, 李封浩^{1,2}, 熊子琛^{1,2}, 李楠^{1,2,3*}

(1. 西北工业大学自动化学院 西安 710129;

2. 西北工业大学深圳研究院 深圳 518057;

3. 西安电子科技大学高性能电子装备机电集成制造全国重点实验室 西安 710071)

*Email: nan.li@hotmail.co.uk

摘要: 声发射 (Acoustic Emission, AE) 是一种精度高, 干扰少的动态无损检测技术, 基于 AE 信号的检测方法是获取重要对象状态的一种有效手段。AE 技术广泛应用于各类材料或结构件的无损检测, 桥梁关重结构健康监测尤其需要高精密的 AE 监测系统。本文针对桥梁关重结构的健康监测, 设计了基于 FPGA 的声发射采集硬件系统, 实现了对 AE 信号的实时采集、数据清洗、实时传输等, 并在 ARM 端开发了上位机软件, 构成了面向桥梁关重结构健康监测的精密声发射监测系统, 推动了智能数字化检测技术的发展与转型。

关键词: FPGA; ARM; 声发射; 桥梁结构健康监测

1、研究背景

声发射 (Acoustic Emission, AE) 作为一种动态无损检测手段, 具有易于获取, 精度高, 干扰少等特点, 已广泛应用于机械、航空、汽车以及化工等领域 [1]。当材料产生形变、裂纹等损伤时, 均伴随着 AE 信号的产生。正确获取 AE 信号是针对桥梁关重结构进行健康监测的关键, 决定其监测质量和分析水平。

AE 检测中需要实时采集大量的流式数据。现场可编程门阵列 (FPGA) 以强大的并行处理能力和高频率等优点, 适用于此类高频信号采集 [2]。先进精简指令集计算机 (ARM) 以其低功耗、可扩展性强等优点, 适用于嵌入式系统开发。结合 FPGA 与 ARM, 可构成集数据实时采集、分析功能于一体的 AE 采集分析系统。

2、研究内容

本文设计的精密声发射采集分析系统由数据采集电路与“FPGA+ARM”控制处理核心两部分组成。

数据采集电路模块主要包括放大电路、抗混叠滤波器电路、单端转差分电路以及模数转换 (ADC) 电路; FPGA 的主要作用是驱动 ADC 芯片及其外围电路, 并接收 ADC 采集的 AE 数字信号, 对其进行数据清洗工作, 并通过千兆以太网将处理后的数据传输至 ARM 端; ARM 的主要作用是接收 FPGA 端发送的数据, 并在 ARM 端开发上位机软件对数据的时域信息、频谱信息等进行实时显示,

并通过部署相应的算法，对 AE 信号中所需的特征信息进行提取。如图 1 所示为声发射无损检测原理及系统总体设计框图。

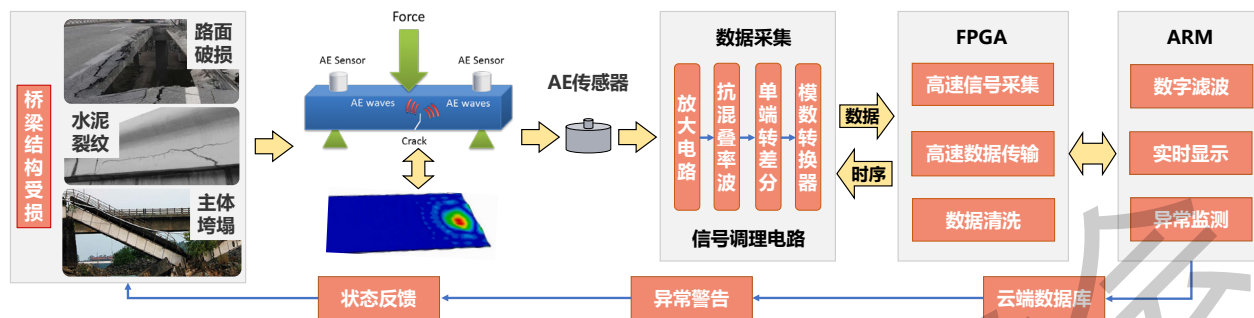


图 1. 声发射无损检测原理及系统总体设计框图

放大电路的作用是在信号链路前端实现对微弱 AE 信号的放大，便于后续电路进行精密采集与处理。本文选择 TI 公司的仪表放大器芯片 INA849，其可通过改变接入电路的电阻阻值，实现对被采集信号不同倍数的放大。

抗混叠滤波器电路的作用是为了尽可能地消除信号链路中“频率混叠”现象对有效信号的影响，防止信号失真。图 2 所示为滤波器硬件原理图。

本文使用高精度国产运放芯片 SGM8302 设计四阶巴特沃斯滤波器 (Butterworth filter) 进行抗混叠滤波器设计，巴特沃斯滤波器在阻带内具有较高的阻带衰减和陡峭的截止特性，可有效去除高频噪声和杂波信号。

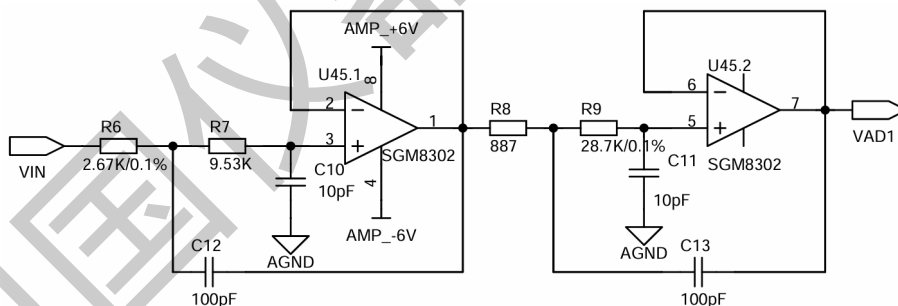


图 2. 四阶巴特沃斯滤波器原理图

模数转换电路将所采集的 AE 模拟信号转化为数字信号。本文选择使用 ADI 公司的 ADC 芯片 LTC2311，其采样率范围为 1KHz~5MHz，采样精度为 16bit。如图 3 所示为 ADC 芯片的工作时序原理图。

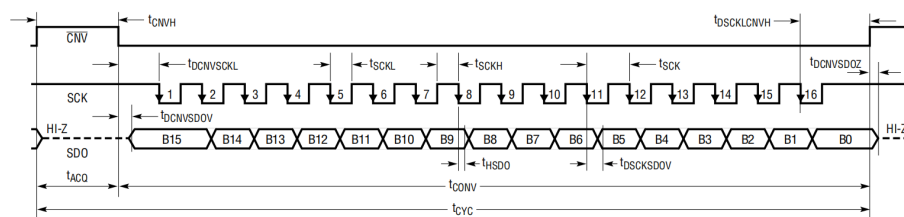


图 3. LTC2311-16 工作时序原理图

本着技术自主可控原则，推动精密智能采集分析仪器国产化的进程，本文选择使用国产紫光同创 Logos 系列 FPGA 器件：PGL50H；同时，选择使用国产全志科技的 T5 系列 ARM 器件：T507 芯片。绘制硬件电路 PCB，采用六层板进行设计，PCB 电路 3D 模型如下图 4(a) 所示，硬件实物如图 4(b) 所示：

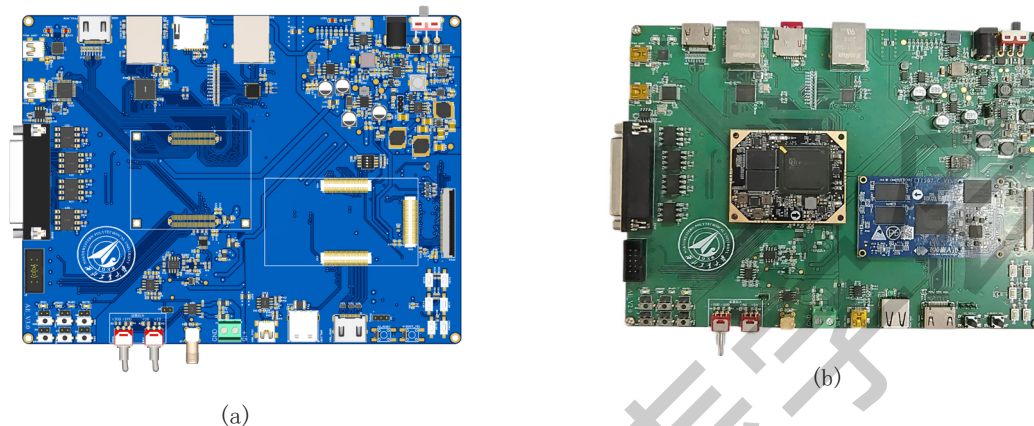


图 4. 硬件电路 3D 模型及实物图

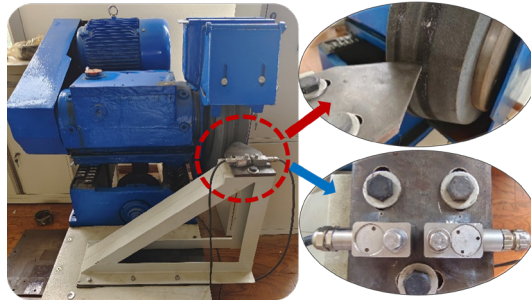
本文选择在 Ubuntu 18.04 环境下开发上位机软件，其主要功能包括实时显示被采集信号的时域信息、频谱信息，实时计算并显示被采集信号的特征值等，ARM 端软件界面如下图 5(a) 所示。在实验室环境下对该采集分析系统进行测试，使用信号发生器产生频率为 243KHz 的正弦波信号，并进行信号采集实验如下图 5(b) 所示。



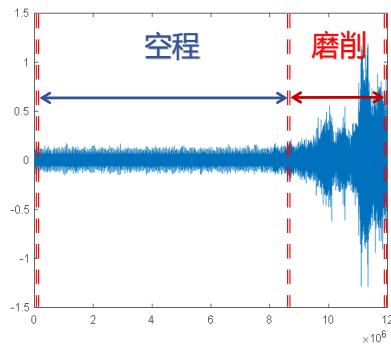
图 5. 上位机软件界面及实验室信号采集测试图

为验证该系统可针对桥梁关键结构进行健康监测的功能，本文以砂轮磨床为实验对象，在工程现场对系统进行测试，如下图 6(a) 所示。通过采集其不同运行状态下产生的 AE 信号，并计算其均方根 (RMS) 值，以此为特征参数判断磨床的运行状态。

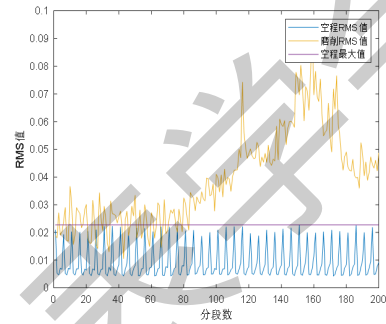
如图 6(b) 所示，分别为砂轮运行在空程、磨削状态下产生 AE 信号，图 6(c) 所示分别为空程状态 RMS 值 (蓝色)，磨削状态 RMS 值 (橙色)。可见，该系统可正确采集砂轮磨床运行产生的 AE 信号，通过 RMS 值准确判断砂轮磨床的运行状态。



(a)



(b)



(c)

图 6. 砂轮磨床功能测试及其 AE 信号的时域信息与 RMS 值

3、结论

本文设计了基于声发射技术的桥梁关重结构监测系统，实现了对 AE 信号的实时采集、数据清洗、实时传输等。以砂轮磨床为应用对象，在工程现场进行了功能测试，验证了该系统的可靠性与实用性。未来工作中，应进一步优化电路设计，提高硬件集成度，推动智能数字化检测技术的发展与转型。

基金资助：

国家自然科学基金面上项目 52275545；

陕西省科技厅 - 重点产业创新链（群）- 工业领域（2023-ZDLGY-41）；

广东省基础与应用基础研究基金（2023B1515120080）

参考文献

- [1] Gholizadeh S, Leman Z, Baharudin B. A review of the application of acoustic emission technique in engineering[J]. Struct. Eng. Mech, 2015, 54(6): 1075-1095.
- [2] Khedkar A A, Khade R H. High speed FPGA-based data acquisition system[J]. Microprocessors and Microsystems, 2017, 49: 87-94.