

基于ARM微控制器的无线测振仪设计

陶致琪, 韩 辉

沈阳理工大学机械工程学院, 辽宁 沈阳

收稿日期: 2026年8月3日; 录用日期: 2026年9月1日; 发布日期: 2026年9月14日

摘 要

振动信号高精度采集与分析是工业设备状态监测及故障诊断的核心支撑技术。针对传统有线测振仪器布线繁杂、现场部署灵活性不足的短板, 研究研制了一套基于ARM微控制器的无线测振系统。该系统采用STM32F407VET6作为下位机主控, 利用ADXL357高精度三轴MEMS数字加速度传感器采集振动信息, 通过nRF24L01+ 无线数传模块将原始振动数据实时上传至上位机。标准振源测试结果显示, 系统可精准复现正弦激励时域波形; 经PC端FFT频域分析后, 频谱主峰与振源设定频率匹配度良好, 验证了软硬件整体设计方案的有效性与可行性。

关键词

STM32, 振动信号, 信号处理, 无线传输

Design of a Wireless Vibration Meter Based on ARM Microcontroller

Zhiqi Tao, Hui Han

School of Mechanical Engineering, Shenyang Ligong University, Shenyang Liaoning

Received: August 3, 2026; accepted: September 1, 2026; published: September 14, 2026

Abstract

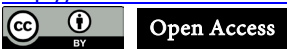
In the field of modern industrial equipment condition monitoring and fault diagnosis, the precise acquisition and analysis of vibration signals are essential for evaluating equipment health. To address the issues of cumbersome wiring and poor flexibility inherent in traditional wired vibration measurement equipment, this paper designs and implements a wireless vibration measurement system based on an ARM microcontroller. The system utilizes the STM32F407VET6 as the core microcontroller unit (MCU) for the data acquisition node. It employs a high-precision 3-axis digital MEMS accelerometer, ADXL357, for vibration signal collection, and wirelessly streams the raw data

to a host PC via an nRF24L01+-based transmission module. Experimental results demonstrate that the system can accurately reproduce the time-domain sinusoidal waveforms generated by a standard vibration source. Furthermore, Fast Fourier Transform (FFT) analysis conducted on the PC side reveals that the main peak frequency in the frequency domain perfectly matches the set frequency of the standard source, thereby verifying the correctness and feasibility of the hardware and software design.

Keywords

STM32, Vibration Signal, Signal Processing, Wireless Transmission

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



1. 引言

机械设备运行过程中，振动是反映零部件运行工况最直观的物理量，绝大多数机械故障发生初期均会体现为振动幅值、频率成分、能量分布的异常变化，因此振动监测已成为工业设备故障预警的主流技术手段[1]。传统监测方案多采用压电式加速度传感器搭配同轴屏蔽电缆构建有线采集网络，该方案存在三方面工程短板：其一，工业现场多机组、复杂空间场景下线缆铺设工程量大，设备移动、多点分布式监测场景适配性差；其二，模拟量长线传输易受变频器、电机等强电磁设备干扰，引入谐波噪声造成信号畸变；其三，整套采集硬件体积庞大，难以集成至小型旋转构件、密闭设备内部完成测点布设。

伴随 MEMS 微传感技术与短距离高速无线射频通信技术迭代，基于嵌入式微控制器、数字 MEMS 传感器的微型无线测振终端成为研究热点。渠婷婷等基于 ZigBee 无线组网架构，构建振动诊断模型的在线监测系统。牛志刚采用 LoRa 与 Wi-Fi 混合通信架构，实现高频信号的实时采集与数据融合。秦乐等基于 4G 技术提出了一种无线振动测试系统节点设计方案。这些无线通信技术虽然具有成本低和功耗低的优点，但传输速率和距离有待提升。2.4G 的射频模块支持不限长度数据包连续透传，同时传输距离最大达 3000 m。因此，本文选用该射频模块作为通讯模块，完成了硬件器件选型、电路设计、嵌入式采集程序和上位机信号解析软件开发，并依托标准振动台开展宽频标定试验，验证系统测量性能。

2. 系统总体架构

本系统采用分层式分布式架构，分为下位机无线采集节点与 PC 上位机分析终端两大模块。系统总体架构如图 1 所示。

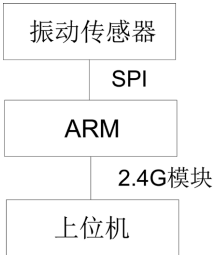


Figure 1. Overall system architecture
图 1. 系统总体架构

下位机节点以 STM32F407VET6 为控制核心, ADXL357 三轴加速度传感器作为振动感知单元, 通过 SPI 高速总线读取三轴加速度原始数据; 依托 DMA 控制器实现数据无 CPU 干预搬运, 缓存数据达到阈值后经由 nRF24L01 + 射频模块将原始采样数据完整透传至上位机, 仅负责数据采集与转发, 不执行复杂信号运算。

上位机终端通过串口接收无线模块转发的振动数据流, 完成数据包解析、时域波形实时绘制; 积累固定长度采样序列后执行去直流预处理、FFT 频域变换、幅值归一化计算, 输出高精度频谱曲线, 实现振动信号时频域联合分析。

分层架构优势在于: 一方面减少下位机实时运算压力, 保障 4000 Hz 高频采样无丢包; 另一方面上位机具备充足算力, 可拓展小波分析、故障特征提取、人工智能诊断等高级算法, 系统扩展性更强[2]。

3. 硬件系统设计

3.1. 主控微处理器选型

系统需支撑 4000 Hz 三轴同步采样、SPI 高速数据读取、无线模块高频发包, 对处理器运算速度、总线带宽、DMA 资源提出较高要求。选用 STM32F407VET6 嵌入式微控制器, 内核为 ARM Cortex-M4 32 位 RISC 架构, 最高主频 168 MHz, 集成硬件 DSP 运算单元、多路高速 SPI 外设与多通道 DMA 控制器。DMA 可实现传感器数据存储后台自动搬运, 避免 CPU 轮询占用资源, 保障采样时序严格同步。

芯片最小系统包含电源供电、8 MHz 外部高速晶振 HSE、复位电路、SWD 调试接口。外部 8 MHz 无源晶振接入锁相环 PLL, 经倍频后输出 168 MHz 系统主时钟, 满足高速外设时序需求。芯片内置硬件滤波与数字校准单元, 可在采集阶段完成原始数据初步校正, 提升信号信噪比[3]。

3.2. 传感器的选择及其通讯方式

振动测量对传感器基底噪声、线性度、温漂指标要求严苛, 本文选用 ADI 公司 ADXL357 三轴 MEMS 数字加速度计, 核心性能指标如下: 噪声密度低至 $80 \mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$, 内置 20 位高精度 ADC 与硬件抗混叠数字滤波器, 最高输出数据速率 ODR 可达 4000 Hz; 具备优异温度稳定性, 高低温工况下温漂误差极小, 适用于工业现场长期连续监测[4]。传感器同步输出 X/Y/Z 三轴向加速度数字量, 可完整获取设备三维振动特征。

ADXL357 硬件兼容 I²C、SPI 两种数字通信总线。针对较高频率场景, 被测信号频率达 1000 Hz, 依据采样定理, 采样频率需设为 4000 Hz; ADXL357 的最高采样频率为 4000 Hz, 可满足要求。因此, 本文针对 4000 Hz 高频采样场景, 对比两种总线的传输能力: 单次三轴采样输出 20 位/轴数据, 对齐为 24 bit (3 字节); 三轴单次采样共 9 字节有效数据, 叠加寄存器地址、读写控制、帧间隔开销后, 系统所需通信带宽远超 100 kbps [5]。ADXL357 外部电路如图 2 所示。

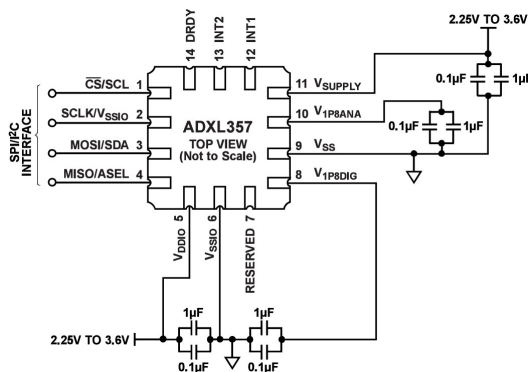


Figure 2. External circuit of ADXL357

图 2. ADXL357 外部电路

I²C 总线标准模式带宽仅 100 kHz, 快速模式最高 400 kHz, 且为半双工通信, 协议冗余开销大, 连续高频读取时易造成传感器 FIFO 缓存溢出、数据丢包, 无法满足 4000 Hz 采样时序要求[6]。

SPI 为全双工同步高速串行总线, ADXL357 支持最高 10MHzSPI 时钟, 传输延迟极低, 可瞬时清空传感器内部 FIFO 缓存, 为高频采样预留充足带宽裕量。

在电源和 GND 之间接入电容, 减少电源对采集信号的干扰。因此硬件电路采用 SPI 总线完成 STM32 与 ADXL357 的数据交互, 配套外围电源、滤波电容构成传感器基础电路[7]。

3.3. 无线通讯模块的选择

在 4000 Hz 采样率下, 系统每秒原始数据净载荷超过 100 kbps, 无线传输链路需满足高速连续数据流稳定转发。

主流无线传输技术 ZigBee 与 LoRa 虽组网能力或传输距离占优, 但其实际空口带宽极低, 无法满足连续波形的实时透传; Wi-Fi 与蓝牙 BLE 带宽充足, 但 TCP/IP、GATT 协议栈占用大量 MCU 内存与算力, 发射功耗高, 不利于电池供电微型节点长期工作[8]。nRF24L01 + 射频芯片的 E34-2G4D27D 2.4G 专用高速数传模块, 支持不限长度数据包连续透传, 协议轻量化, CPU 解析开销极低, 发射功耗可控, 适配电池供电便携式测振终端。E34 与 STM32F407VET6 连接图如图 3 所示。

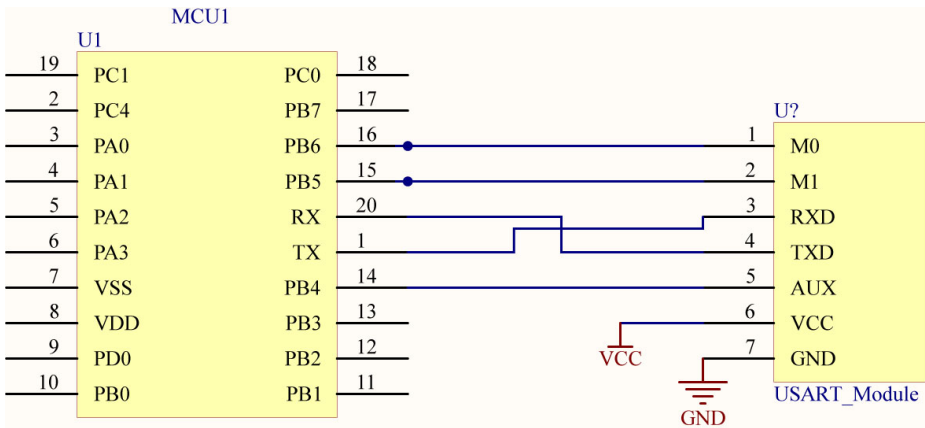


Figure 3. Circuit connection of E34 module
图 3. E34 电路连接

4. 软件系统设计

4.1. 下位机程序设计

下位机开发环境采用 STM32CubeIDE, 基于标准 C 语言编写, 核心目标为严格时序下无损采集三轴振动数据并无线透传。为规避轮询采样造成 CPU 资源浪费, 采用 FIFO 阈值中断触发、批量读取的数据采集机制, 下位机程序流程图如图 4 所示, 程序逻辑流程如下:

- 1) 系统初始化: 配置系统时钟、SPI 外设、DMA 控制器、nRF24L01 + 无线模块、ADXL357 传感器, 设置传感器输出速率 4000 Hz, 配置 FIFO 中断触发阈值;
- 2) 持续监测传感器 FIFO 缓存, 当缓存数据量达到设定阈值时触发硬件中断;
- 3) SPI 总线配合 DMA 批量读取三轴加速度数据, 存入片内环形缓冲区;
- 4) 缓冲区累积指定采样点数后, 封装数据包通过无线模块完整透传至上位机, 清空缓冲区并进入下一轮采集循环。

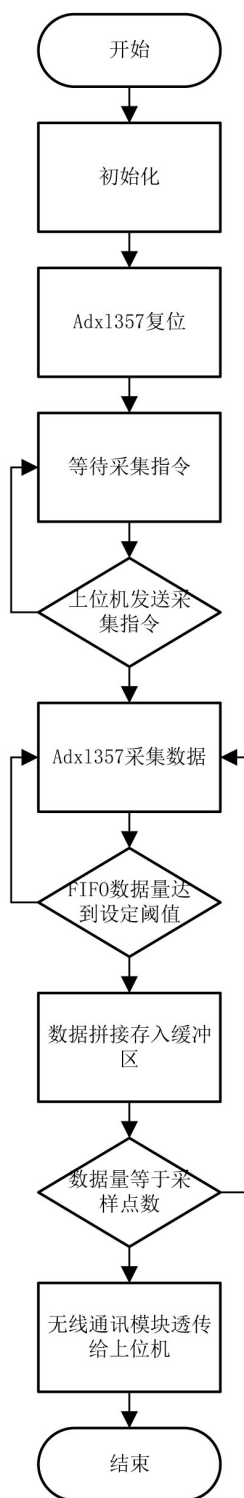


Figure 4. Flow chart of lower computer program
图 4. 下位机程序流程图

依托 SPI 多字节连续读取时序, 最大限度缩短数据读取耗时, 保障 4000 Hz 采样时序无偏移, 杜绝数据丢失。SPI 多字节读取时序图如图 5 所示。

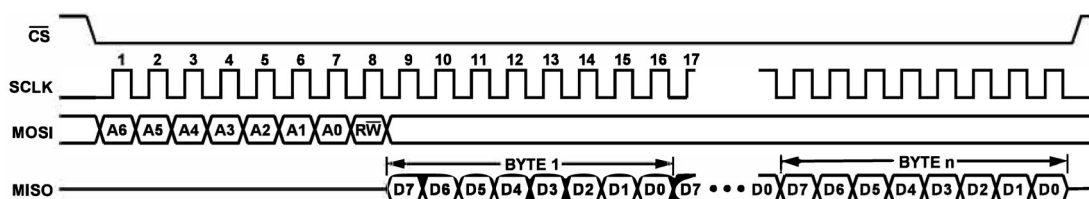


Figure 5. Timing diagram of SPI multi-byte reading

图 5. SPI 多字节读取时序图

为保证传输数据的正确, 对进行无线传输的数据帧格式进行了严格规定, 包含帧头、帧尾和校验位。具体定义见图 6。

```
uint16_t* tx_current=tx_address[i];
uint16_t subIndex=i*(Cap_Number/8);
uint16_t tx_chek=0;
tx_current[0]=0x7A;
tx_current[1]=0xA7;
tx_current[Cap_Number/8+4]=0x7E;
tx_current[Cap_Number/8+5]=0xE7;
tx_current[2]=i;
for(uint16_t j=0;j<Cap_Number/8;j++)
{
    tx_current[j+3]=ad_data[subIndex+j];
    tx_chek+=tx_current[j+3];
}
tx_current[Cap_Number/8+3]=tx_chek;
```

Figure 6. Data frame format

图 6. 数据帧格式

4.2. 上位机程序设计

本上位机基于 Visual Studio 平台 VB.NET 开发, 整体流程分为无线数据接收解包、时域波形实时渲染、FFT 频域特征分析及振动阈值报警, 其中 FFT 频谱解算为核心功能。

传感器静态倾角会引入直流偏移分量, 造成频谱零频幅值畸变, 需在傅里叶变换前消除基线偏移, 计算公式为:

$$x'(n) = x(n) - \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} x(i) \quad (1)$$

式中 $x(n)$ 为原始采集振动序列; N 为单次 FFT 运算采样点数; $x'(n)$ 为去除直流分量后的校正序列。为抑制有限长信号截断引发的频谱泄露, 在去除直流分量后引入窗函数加权处理。选用汉宁窗对校正后的时域振动序列进行加权平滑, 削弱信号首尾幅值突变; 由于窗函数会衰减信号总能量, 频谱幅值计算时引入对应窗函数补偿系数还原真实振动加速度幅值, 有效降低旁瓣干扰, 提升频域峰值识别精度。

对预处理后序列执行离散傅里叶变换, 将时域振动信号转换为频域复数序列, 如式(2):

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x'(n) \cdot e^{-j \frac{2\pi}{N} kn} \quad (2)$$

式中 $X(k)$ 为变换后的复数序列, k 由 0 至 $N-1$ 为频点序号。

求取复数频点能量模值, 如式(3):

$$|X(k)| = \sqrt{\text{Re}[X(k)]^2 + \text{Im}[X(k)]^2} \quad (3)$$

式中 $\text{Re}[X(k)]$ 、 $\text{Im}[X(k)]$ 代表复数序列的实部和虚部。

由于 FFT 变换频谱具备正负频率对称特性, 能量均分至两侧频域, 需对模值做归一化还原真实振动加速度幅值, 如式(4):

$$A(k) = \frac{2}{N} |X(k)| \quad (4)$$

式中 $A(k)$ 为最终在频谱图上显示的真实振动幅值[9]。

为实现设备异常振动实时预警, 软件在时域预处理阶段加入振动有效值(RMS)阈值报警功能。RMS 能够表征振动整体能量水平, 相比单峰值更适合设备长期健康监测。系统先对去除直流分量后的三轴加速度序列分别计算振动 RMS, 然后将计算结果与用户自定义报警阈值对比; 当任意轴 RMS 数值超过设定阈值时, 系统立即触发多级报警。RMS 振动有效值计算公式为:

$$x_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} [x'(n)]^2} \quad (5)$$

式中 x_{rms} 为振动有效值, $x'(n)$ 为去除直流分量后的校正序列。

5. 无线振动传感器测试实验

为定量评估系统测量精度、带宽响应与无线传输稳定性, 搭建标准振动台标定实验平台。将无线测振节点刚性固定于高精度激振台台面, ADXL357 采样速率固定为 4000 Hz, 避免高频激励信号混叠; 振动台输出 5~995 Hz 连续正弦激励信号, 上位机同步接收无线数据、绘制时域波形并执行 FFT 频谱分析标准振动台(如图 7 所示)。对比标准振动台参考加速度与本系统测量结果, 量化测量误差。



Figure 7. Standard vibration shaker
图 7. 标准振动台

低频至全频段激励下系统均可完整复现标准正弦振动波形: 160 Hz 中频激励时, 时域曲线平滑、周

期特征清晰；995 Hz 高频激励下，波形密集但幅值稳定、包络完整，无明显失真、截断畸变，证明系统 4000 Hz 采样带宽可覆盖 0~1 kHz 有效测量区间，满足常规机械故障振动检测带宽需求。160 HZ 时频域波形图如图 8、图 9 所示；各测试频点加速度测量数据如表 1 所示。

Table 1. Vibration measurement data of wireless vibrometer
表 1. 无线测振仪测振数据

频率/(HZ)	振动校准参考系统/(m·s ⁻²)	无线测振仪/(m·s ⁻²)
5	0.13	0.137
10	0.51	0.507
20	2.40	2.467
40	5.00	4.903
80	5.60	5.577
160	5.70	5.652
325	3.90	3.864
495	2.40	2.371
995	1.80	1.813

5 Hz 低频段相对误差绝对值为 5.38%。除 5 Hz 低频点外，其余 8 个测试频点的相对误差绝对值均小于 3%，整体测量精度满足工业现场设备振动监测的通用精度要求。

对 5 Hz、160 Hz、495 Hz、995 Hz 频谱曲线分析可得，频谱主峰位置与激励设定频率完全对应，无明显频谱泄露、谐波干扰，系统时频域测量一致性良好，无线传输过程未引入额外噪声。

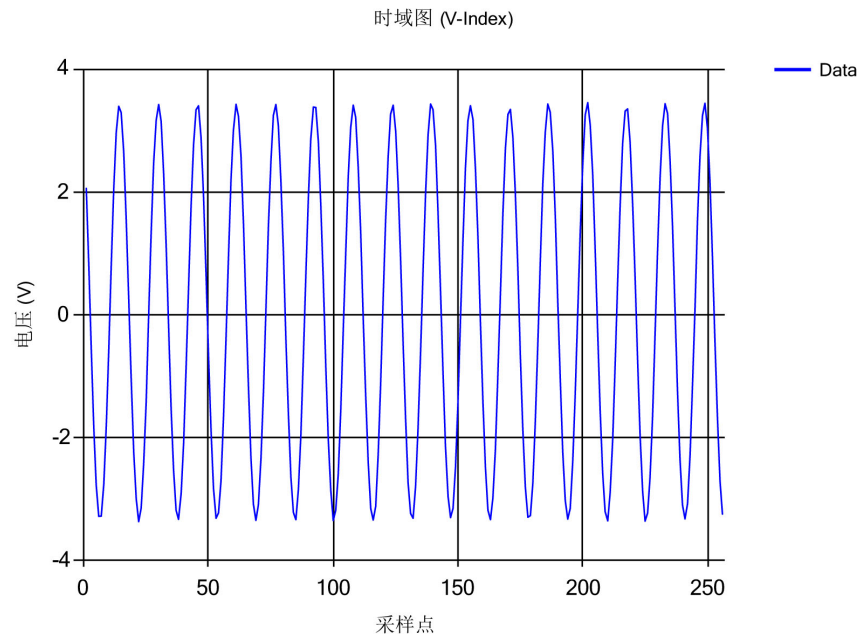


Figure 8. Time-domain waveform at 160 Hz
图 8. 160 HZ 时域波形图

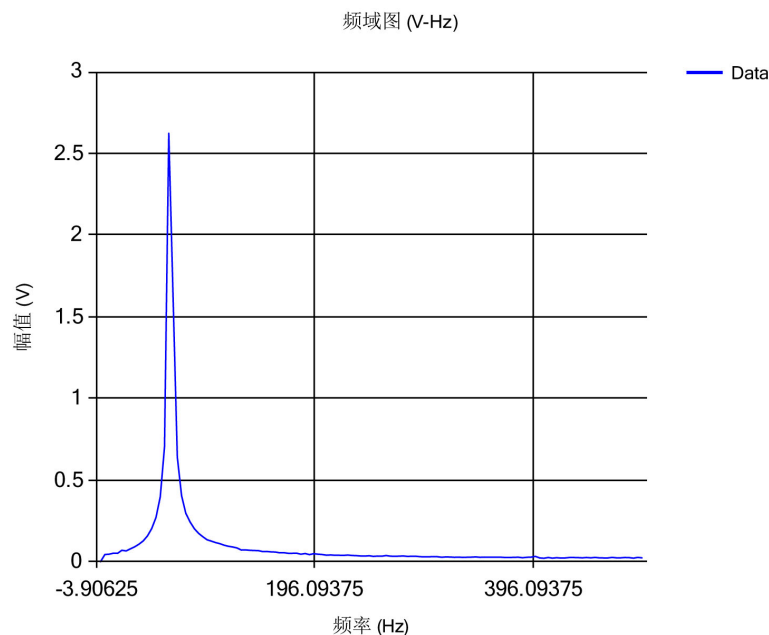


Figure 9. Frequency-domain waveform at 160 Hz

图 9. 160 Hz 频域波形图

6. 结论

针对传统有线振动监测设备布线复杂、部署灵活性差、模拟信号易受电磁干扰等工程短板,同时兼顾现有 ZigBee、LoRa、4G 等无线传输方案在传输带宽、连续波形透传能力上的局限,本文完整设计了一套基于 STM32 ARM 微控制器的无线高精度振动采集仪。该系统采用“下位机高速采集透传、上位机集中时频分析”分层架构,硬件选用低噪声三轴 MEMS 加速度计 ADXL357 搭配高速 SPI 总线保障高频采样精度,基于 nRF24L01 + 模块实现轻量化高速无线数据传输;嵌入式终端采用中断 + DMA 批量采集机制保障时序稳定,上位机集成去直流预处理、FFT 频谱分解和幅值归一化全套信号处理算法。

标准振动台标定实验证明本系统在 5~995 Hz 宽频区间内测量精度高、无线传输稳定,时域波形还原完整,频域频谱定位准确,可实现工业设备振动信号长期、分布式在线监测。该微型无线测振装置硬件体积小、功耗低,适配复杂工业现场测点布设,同时上位机预留算法拓展接口,可为后续基于深度学习、机器学习的智能故障诊断研究提供标准化振动数据采集平台。

参考文献

- [1] 付文虹. 基于 MEMS 的振动分析仪的设计[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
- [2] 段智敏, 李驰, 丛培田, 等. 基于 STM32F407 的风机故障检测远程振动信号采集方法[J]. 仪表技术与传感器, 2017(6): 176-178, 182.
- [3] 康晨渲, 韩辉. 大型船用螺旋桨静平衡测试系统的高精度信号处理与数据采集[J]. 成组技术与生产现代化, 2025, 42(2): 43-48.
- [4] 夏欣. 面向无线振动传感器短时振动信号的分析与诊断[D]: [硕士学位论文]. 马鞍山: 安徽工业大学, 2021.
- [5] 程林波, 王文梁, 李学. ADXL357 加速度计原理及其在超声测井仪器中的应用[J]. 电声技术, 2022, 46(5): 105-107.
- [6] 陈骞, 高宁, 丁光洲. 基于 STM32H743 单片机的 I²C 批量通信系统设计及其应用[J]. 电子与封装, 2026, 26(5): 66-72.

- [7] 房向荣. 单片机 I²C 总线和 SPI 接口总线复用方法研究[J]. 微电机, 2011, 44(7): 112-115.
- [8] 邢凯. 基于单片机的室内无线环境监测系统设计与应用[D]. [硕士学位论文]. 南宁: 广西民族大学, 2014.
- [9] 邹璨, 寻滔源, 蔡俊, 等. FFT 硬件加速器在桥梁健康监测系统中的设计与应用[J/OL]. 集成电路与嵌入式系统: 1-9. <https://doi.org/10.20193/j.ices2097-4191.2025.0154>, 2026-03-25.