

# 基于 LXI 总线的多通道振动信号测试系统设计

高媛<sup>1</sup>, 金天贺<sup>2</sup>, 胡志臣<sup>2</sup>

(1. 军委装备发展部装备项目管理中心, 北京 100032;  
2. 北京航天测控技术有限公司, 北京 100041)

**摘要:** 针对某些大型复杂装备的振动信号采集需求, 测控场景需对上百通道的振动信号实现同步测量; 而单一采集仪器很难满足百道测试需求, 因此, 文章研制了一种可扩展的多通道振动信号采集与分析系统; 该系统采用 LXI 总线架构, 其主控计算机与设备和设备间均采用 LAN 进行数据通信; 振动测量模块采用了大动态范围数据采集技术, 且主控系统软件采用分布式数据管理模式; 最终, 主控计算机以仪器驱动函数方式通过通信协议合理调控采集模块参数, 并通过综合数据分析得到振动信号的故障诊断结果; 通过对某型高速列车的轴箱轴承进行振动信号采集与数据分析, 得到某一轴承出现了故障, 验证了所设计测试系统的有效性。

**关键词:** 信号采集系统; 振动测试; 数据分析; LXI 总线

## Design of Multi-channel Vibration Signal Test System Based on LXI Bus

Gao Yuan<sup>1</sup>, Jin Tianhe<sup>2</sup>, Hu Zhichen<sup>2</sup>

(1. Equipment Project Management Center, Equipment Development Department of  
PRC Central Military Commission, Beijing 100032, China;

2. Beijing Aerospace Measurement & Control Technology Co., Ltd., Beijing 100041, China)

**Abstract:** In response to the demand for the acquisition of vibration signals of some large-scale and complex equipment, the measurement and control scenarios need to achieve simultaneous measurement of vibration signals of hundreds of channels. However, it is difficult for a single acquisition instrument to meet the requirements of a hundred-channel test. Therefore, an expandable multi-channel vibration signal acquisition and analysis system is developed in this paper. The system adopts the LXI bus architecture, and its host computer and equipment and its equipment all use LAN for data communication. The vibration measurement module uses a large dynamic range data acquisition technology, and the main control system software adopts a distributed data management mode. Finally, the main control computer reasonably regulates the parameters of the acquisition module through the communication protocol in the form of the instrument drive function, and can obtain the fault diagnosis result of the vibration signal through comprehensive data analysis. Through the vibration signal collection and data analysis of the axle box bearing of a certain type of high-speed train, it is found that a certain bearing has a fault, which verifies the validity of the designed test system.

**Keywords:** signal acquisition system; vibration test; data analysis; LXI bus

## 0 引言

振动信号采集仪是各类装备振动测试中必不可少的仪器设备, 可测试随机振动、正弦振动和冲击振动的特性, 在装备的模型吹风试验、飞机、高铁及部件振动试验测试中有着广泛的应用。振动信号采集仪与前端传感器、后端计算机处理单元一起组成自动测试系统<sup>[1-2]</sup>。

振动信号测试系统包括信号采集与实时分析软硬件、数据管理与信号处理软件, 其中采集单元可以实现对设备的正弦振动、冲击振动、随机振动数据采集, 数据分析软件能够对采集信号进行时域、频域分析, 如特征值提取、谱分析、阶次分析、模态分析等<sup>[3-5]</sup>。在装备研制过程中, 为检验其是否达到结构设计标准、设备运转是否正常, 需要对整机及其部件进行一系列振动测试<sup>[6]</sup>。无论是整机还

是部件试验, 单次试验成本都非常昂贵, 针对振动信号的采集, 需要振动信号采集单元具有大动态范围采集能力, 能够同步、精确的记录各测试点的振动情况, 并通过信号分析的方法准确评估试验结果, 提升装备研制保障能力<sup>[7-8]</sup>。同时, 由于大型装备多通道的振动测试需求, 最高需要测试上千通道的振动信号, 因此, 研制一种可集成式多通道振动信号测试系统具有十分重要的意义。

基于 LXI 总线的多通道振动信号测试系统具有使用灵活、测试通道数自由组合、大动态范围数据采集的优点, 且具备数据分析及故障诊断功能, 使用该测试系统可以提高装备研制及应用的综合保障能力<sup>[9-10]</sup>。

## 1 多通道信号采集系统设计

为满足装备多通道振动测试的需要, 设计了多种振动

收稿日期: 2021-01-09; 修回日期: 2021-02-18。

作者简介: 高媛(1979-), 女, 山东东营人, 博士, 高级工程师, 主要从事测试技术方向的研究。

引用格式: 高媛, 金天贺, 胡志臣. 基于 LXI 总线的多通道振动信号测试系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2021, 29(3): 93-98, 103.

信号采集模块,包括 1 通道、3 通道、6 通道和 12 通道 4 种模块,可根据测试需要自由组合测试通道数,单模块可以作为一台独立的 LXI 总线虚拟仪器使用,也可以应用于分布式网络或集成到机箱内使用。机箱具有 5 个插槽,一个机箱可同时配置多个信号采集模块,且具备北斗同步功能,可以获取标准时间,实现远程分布式测试系统之间的同步。

振动信号采集系统采用 LXI 总线架构,设备之间通过 LAN 口进行通讯,支持精密时钟同步协议(PTP)功能,支持直流供电或 PoE 供电。可配置扩展接口,实现多台采集设备互联。多台振动采集模块可以先集成到一台 5 槽机箱中(以 12 通道采集卡为例,单机箱最多可集成 60 个通道),然后通过机箱的 LAN 口连接至主控计算机,如图 1 所示。

如果单机箱系统的通道数量不能满足测试应用需求,还可以采用多机箱采集模式,由一台主控计算机控制。设置其中一台机箱为 PTP 主时钟功能,其余机箱为 PTP 从时钟功能,主时钟机箱可以先通过北斗同步获取标准时间,然后再通过 PTP 实现分布式同步,其连接方式如图 2 所示。

某型高速列车轴箱轴承振动信号采集通道数多,单节列车具有 8 个轴箱,整车 16 节列车,整车需要测试通道数较多,为方便振动测试的需要,整车配备多台机箱,每台机箱配置 40 个测试通道,主控计算机通过 LAN 进行通讯采集机箱的振动信号,大幅提高了采集效率。

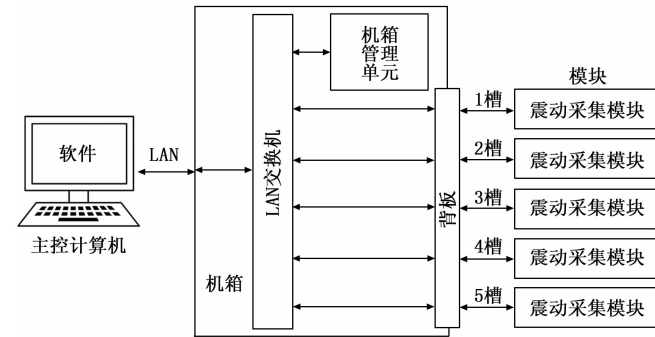


图 1 系统架构图

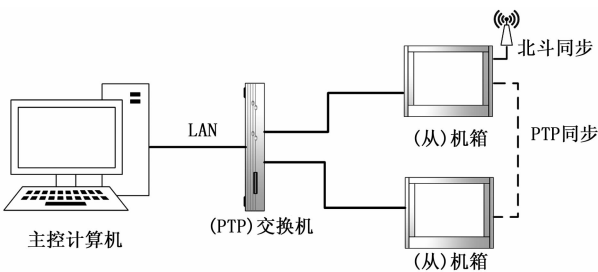


图 2 多机箱分布式采集系统

## 2 基于 LXI 总线的测试设备硬件设计

### 2.1 便携式机箱硬件设计

便携式机箱的核心是一台 PTP 交换机,符合 IEEE 802.3af 规范(PoE),内部连接 PTP 主时钟单元、机箱配置管理单元,外部连接至多 5 台模块化振动信号采集仪,并提供一个千兆以太网通信接口和一个附加支持 PoE 供电的 LAN 口。一旦振动采集模块安装在机箱中,即组合成一个便携式设备,支持至多 60 通道的振动信号同步采集。机箱提供单个千兆 LAN 通信接口,可以将多个机箱联网在一起,从而提供上百通道的测试系统。便携式机箱的硬件设计如图 3 所示,包括供电系统、PTP 主时钟单元、PTP 交换机单元、机箱配置管理单元等部分。

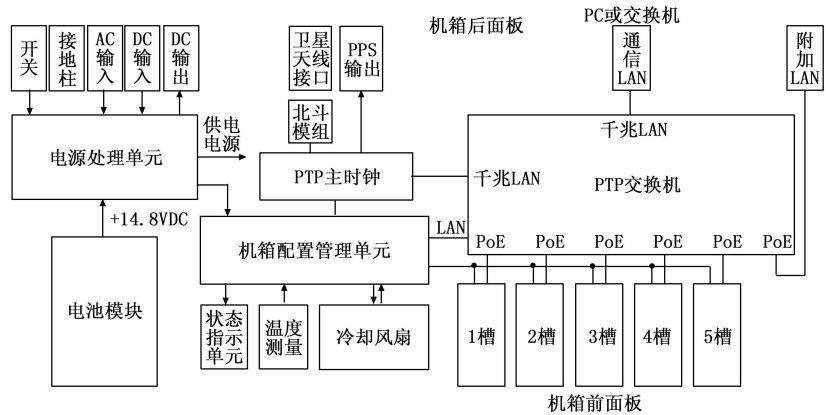


图 3 便携式机箱硬件组成图

#### 2.1.1 供电系统

机箱支持外部 AC、DC,内部电池供电等多种供电方式,如图 4 所示。外部输入 AC 电源电压为  $220\text{ V} \pm 10\%$ 、频率为  $50\text{ Hz} \pm 5\%$ ,外部输入 DC 电源为  $10 \sim 32\text{ V}$ (配外部电源适配器),通过内部电源转换单元统一输出  $14.8\text{ V}$  的直流电源,能够提供约  $120\text{ W}$  的输出功率(机箱最大功率  $90\text{ W}$ )。电池模块为可充电式锂电池,采用可插拔式结构,输出电压为  $14.8\text{ V}$ ,总容量  $91\text{ Wh}$ ,支持机箱满载条件下连续工作 1 小时。此外,机箱还提供 1 个  $12\text{ V}$  直流输出,输出电流  $1\text{ A}$ ,可以为多种附件供电。

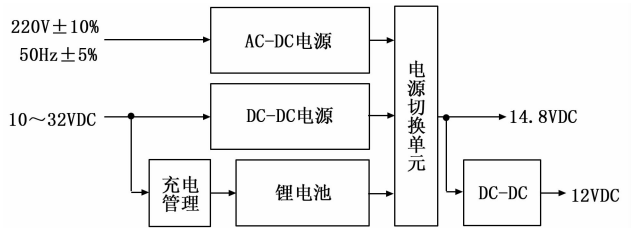


图 4 机箱供电系统功能框图

#### 2.1.2 PTP 主时钟单元

PTP 主时钟支持北斗时间同步,可实现多机箱测试系统分布式同步采集,方便对采样数据进行绝对时间标记,如图 5 所示。

PTP 主时钟以支持 IEEE 1588-2008 的处理器为核心, 基于嵌入式实时系统运行 PTP 协议栈, 执行最佳主时钟算法。通过北斗模组接收标准时间, 通过内部高稳晶振进行时钟保持, 硬件时间戳精度可优于 10 ns。PTP 主时钟单元提供 1 个 PPS 秒脉冲输出, 方便验证系统的同步性能。通过配置端口或 LAN 口, 可对 PTP 主时钟进行配置。

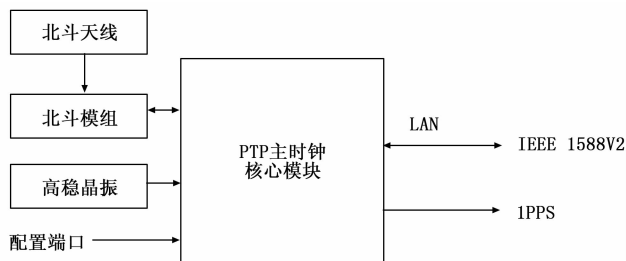


图 5 PTP 主时钟单元功能框图

### 2.1.3 PTP 交换机单元

PTP 交换机单元是机箱的核心部件, 用于连接机箱内、外各个 LAN 功能单元, 其硬件设计如图 6 所示。以太网交换单元以高性能交换芯片为核心, 实现基本的以太网数据包交换; PTP 处理单元主要实现 PTP 时间标记、报文修改等功能; 以太网 PHY 分为 100 Mbps、1 000 Mbps 两类, 其中, 100 Mbps 的 PHY 与 PoE 电源处理单元融合, 对外输出多个符合 IEEE 802.3af 规范的千兆 LAN 口, 供外部仪器连接; 1 000 Mbps 的 PHY 直接通过 RJ-45 连接器输出, 不具备 PoE 功能, 主要实现机箱对外 LAN 口、PTP 主时钟授时的高速通信。

### 2.1.4 机箱配置管理单元

机箱作为一个独立的网络设备, 具有自身的 IP 地址, 通过配置管理单元实现远程访问与配置管理。机箱配置管理单元以低功耗 ARM 处理器为核心, 运行嵌入式 Linux 操作系统, 主要负责对机箱供电电源、内部温度、冷却风扇进行监测与控制, 对 PTP 主时钟、交换机和各个 LAN 仪器槽位进行控制管理, 以及负责机箱自身的网络配置。机箱的关键状态可通过机箱面板上的状态指示单元显示, 所有状态均可通过上位机软件获取。机箱具有完备的安全保护机制, 如电源管理、冷却管理。

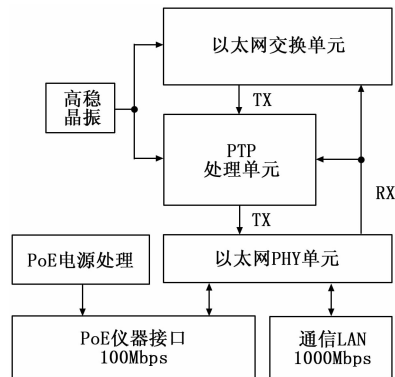


图 6 PTP 交换机单元功能框图

## 2.2 振动信号采集模块硬件设计

共研制 4 款振动信号采集模块, 它们具有不同的通道密度和信号带宽 (1 通道 204.8 kHz、3 通道 102.4 kHz、6 通道 51.2 kHz、12 通道 25.6 kHz), 可以覆盖不同应用场合下装备振动测试的需要。

振动信号采集模块主要由主控单元、信号调理单元、电源/信号隔离单元、以及状态指示单元等几部分组成。不同规格的采集模块仅前端信号调理通道数量不同, 其主控单元的硬件架构一致。振动信号采集模块的硬件设计如图 7 所示。

### 2.2.1 主控单元

主控单元以 ARM 处理器为核心, 运行嵌入式 Linux 操作系统, 对外实现 LAN 通信, 对内实现各单元电路的管理。FPGA 可编程逻辑电路实现多种时序逻辑, 如各通道 ADC 同步采集、双缓存数据存储逻辑等。DSP 处理单元对 ADC 采样数据进行实时处理, 包括大小量程数据选择、采集数据归一化处理、校准补偿、数字信号滤波、频谱分析等。

理论上 24 位 ADC 动态范围为 144 dB, 但实际单一量程因噪声影响往往只能实现 110 dB 左右, 本系统采用双量程整合方式来实现 140 dB 动态范围。设计采用 2×24-bit A/D 方式实现 140 dB 高动态范围的信号采集, 同一通道分为 ±316 mV、±10 V 两个量程 (±316 mV 小量程信号经 30 dB 放大至 ±10 V), 每个量程通道具有相同的电路结构,

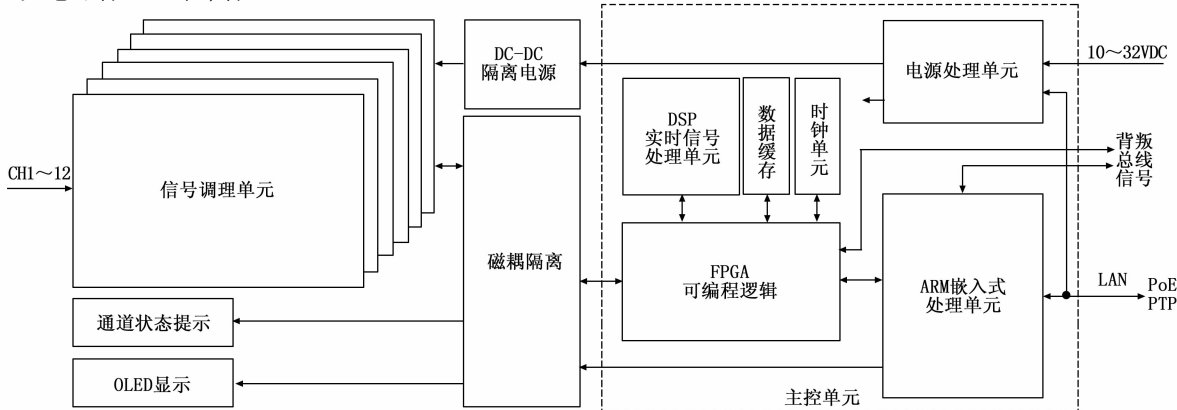


图 7 振动信号采集模块硬件

包括差分放大电路、模拟低通滤波器和 24-bit A/D 转换电路，2 路信号同时采集，如图 8 所示。大小量程数据选择单元获取同一时刻的 2 个 24-bit 数据，计算信号的幅度，根据信号大小选择对应量程的数据，并将数据存储，从而实现大小量程的自动切换。

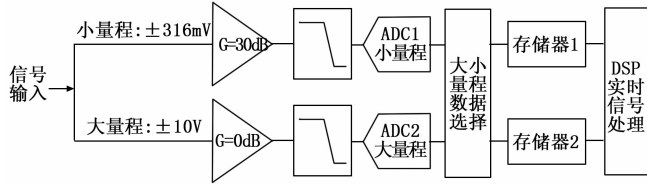


图 8 双 AD 采集硬件设计

DSP 处理器主要实现实时信号处理，包括：实时校准、数字低通滤波、实时振动信号运算等。

LXI 总线接口主要实现 LXI 各类基础服务、PTP 同步服务、硬件触发等。考虑到仪器低功耗的特点，LXI 接口单元以 i.MX6 系列 ARM 处理器为核心，运行嵌入式 Linux 操作系统，对外实现 LAN 通信，对内实现各单元电路的管理。

### 2.2.2 信号调理单元

信号调理电路主要由 IEPE 激励电路、TEDS 适配电路、辅助量程衰减电路、差分放大电路、低通滤波电路、ADC 转换电路，以及通道自检、通道保护、过载检测等电路等组成，如图 9 所示。

振动信号采集模块具有多类型信号连接方式，可采集电压、IEPE、TEDS 类型的信号，输入信号适配示意图如图 10 所示。

假设图 10 中开关均为常开状态，可通过切换开关 K1~K4 来适配不同的输入信号类型，如表 1 所示。

振动信号采集模块为每个测量通道提供 4 mA 的恒流源输出，为外部 IEPE 振动传感器提供电流激励。IEPE 振动加速度信号检测使用 2 线制连接方式，激励电流输出连接至信号正端，负端可对地连接一个 50 Ω 的电阻构成伪差分输入，振动信号通过交流耦合后送调理采集单元，耦合电容和 1 MΩ 电阻构成高通滤波电路。IEPE 振动传感器接线如图 11 所示。

表 1 输入类型 vs 开关状态

输入类型	K1	K2	K3	K4
电压(DC 耦合)	0	0	0	0:差分 1:单端
电压(AC 耦合)	0	0	1	
正余弦编码	0	0	0	
IEPE 振动	1	0	1	
TEDS	—	1	—	

恒流源采用精密电压基准和差分运放结合方式，并在输出端增加保护电路。

采集模块还支持 IEEE 1451.4 智能 TEDS 传感器适配，通过 TEDS 可获得传感器的灵敏度、序列号、制造商、校准日期等关键参数，可校正传感器的频率响应，提高采集精度。

具有 TEDS 功能的振动传感器通常是模拟信号和数字信号复合传输，仪器外部接口连接方式和 IEPE 一致，可通过仪器内部电子开关进行振动采集电路和 1-wire 数字读取电路的切换。TEDS 智能传感器的接线如图 12 所示。

仪器具有过压保护功能，如果输入信号幅度显著超出量程，输入将进入保护模式并保持 0.5 s，直至信号幅度回落至量程区间。在过压保护模式下，输入被部分切断，同时输入阻抗显著提高（信号将大幅度衰减，但仍可以采集到）。

在不同的量程下，过压保护限值电压不同：在 ±10 V 基本量程时，设定过载保护电压为 ±12 V；在 ±31.6 V 扩展量程时，设定过载保护电压为 ±50 V。过压保护原理如图 13 所示。

过压保护电路先对输入信号进行 1:5 无源衰减，如果检测到衰减后的信号幅度超出设置的限值，则自动断开过载限流保护开关，输入串接的 10 MΩ 分压电阻，实现输入通道的保护。当输入瞬间过压时，信号线上的钳位二极管对后续电路进行保护。

仪器对多处关键电路进行过载检测，包括：信号过载、IEPE 过载、幅度/频率超限、共模电压过载等。仪器过载检测单元功能框图如图 14 所示。

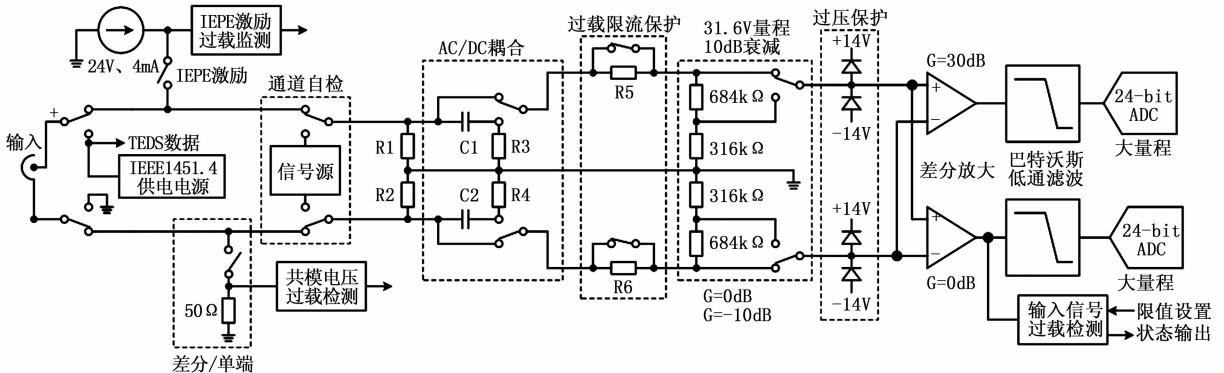


图 9 信号调理电路图

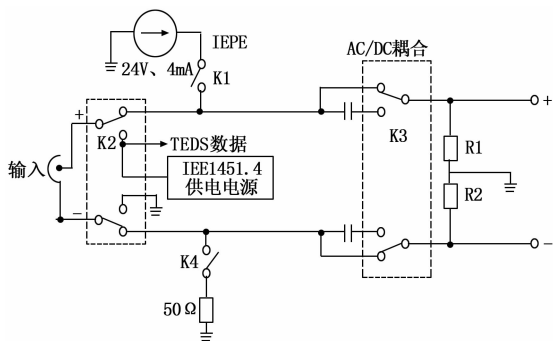


图 10 输入信号适配示意图

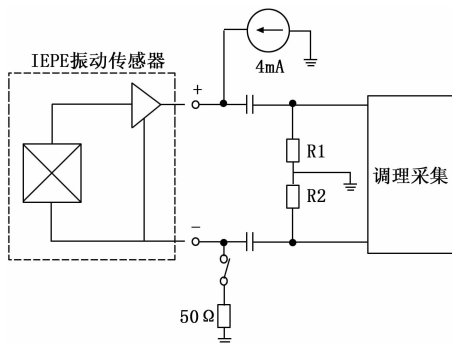


图 11 IEPE 振动传感器接线图

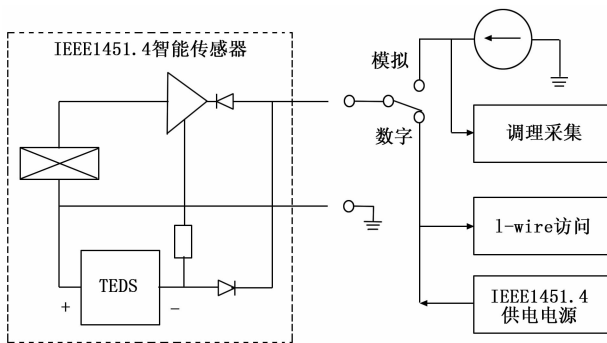


图 12 TEDS 智能传感器接线图

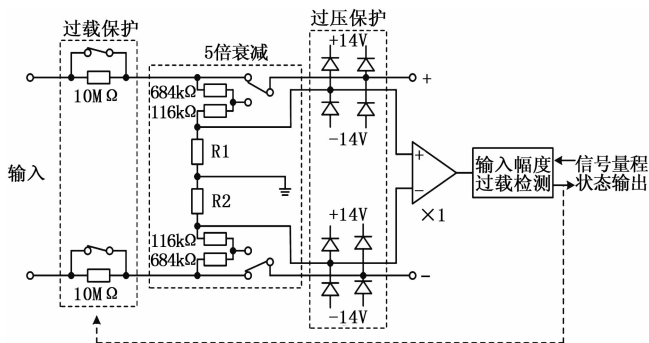


图 13 过压保护原理框图

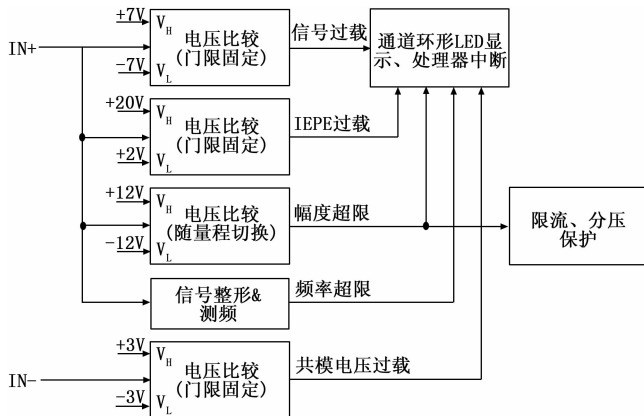


图 14 过载检测功能框图

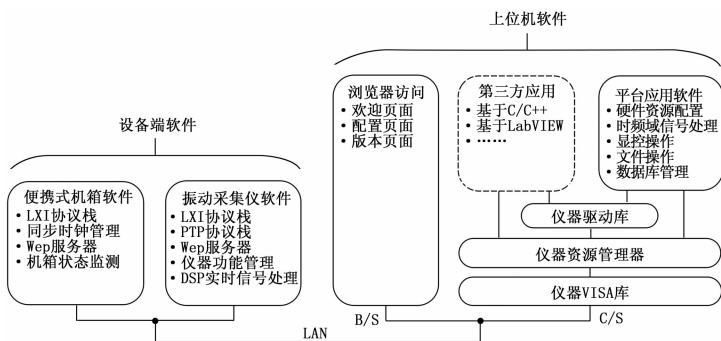


图 15 软件总体架构图

- 1) 振动信号采集模块、便携式机箱均符合 LXI 总线规范，通过 LAN 口通信，支持 B/S、C/S 访问方式；
- 2) 振动信号采集模块、便携式机箱均提供基于 C 语言、LabVIEW 的驱动软件，方便用户采用多种工具开发第三方应用，实现系统集成；
- 3) 平台应用软件提供各类振动信号的时频域分析功能；
- 4) 平台应用软件具有对采集原始数据文件、分析报告输出的功能。

硬件设备端软件主要基于 ARM 处理器的嵌入式 Linux 系统、DSP 处理器的编程环境进行开发。上位机软件基于 Windows 系统，采用 C++ 语言开发，面向对象编程、全插件架构，系统稳定可靠且扩展性强。

DSP 主要负责对 ADC 采样数据进行实时处理，硬件原理如图 16 所示。

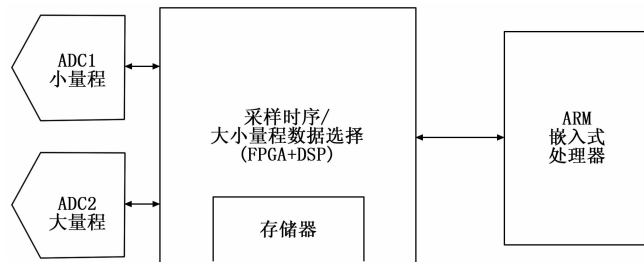


图 16 DSP 实时信号处理硬件原理

### 3 软件设计

振动测试系统软件总体架构如图 15 所示。

软件主要实现以下功能：

在数据采集过程中, 首先由 ARM 嵌入式处理器完成对 FPGA 模块、DSP 模块的参数设置, 启动采集; 然后 FPGA 模块输出指定采样时序控制 ADC1 和 ADC2 进行同时采集, 并对获取到的两路 AD 转换数据进行大小量程数据选择, 并将数据归一化成 32-bit 数据, 将处理后的数据先后存储到存储器中, 再向 DSP 发起中断请求; DSP 接收 FPGA 中断, 查询存储器状态, 依次读取数据, 并进行校准补偿、数字信号滤波、正余弦编码信号处理等信号处理, 并将处理后的数据存储在存储器中, 向处理器发起中断请求; 处理器接收到 DSP 中断后, 查询存储器状态, 依次读取数据, 并将数据发送至上位机。

平台应用软件主要包括: 硬件管理、信号处理、显控操作、文件操作、第三方应用接口等几个部分。其中, 信号处理是软件的核心, 包括基本数据处理、高级信号分析和应用测量分析软件, 基本数据处理软件可以实现基本的时域、频域信号分析; 高级信号处理软件可以实现模态分析、阶次分析和冲击响应谱分析; 应用测量分析软件针对实际工程应用中的各类随机振动、周期(正弦)振动和冲击振动信号进行处理, 包括随机、谐波、滚扭和冲击等振动信号分析模块, 可实现对随机振动、正弦振动、冲击振动等各类振动信号的数据处理, 并可通过专家数据库实现故障诊断。

#### 4 实验结果与分析

针对某型高速列车在运用过程中遇到的轴箱轴承故障问题, 采用所设计的基于 LXI 总线多通道振动信号测试系统对其轴箱轴承的振动信号进行了采集与分析。单列车的轴承分布如图 17 中左图所示, 由于所测试的轴箱轴承数量庞大, 故在此以某节车的 4 号轴承为例, 振动加速度传感器布置如图 17 中右图所示。

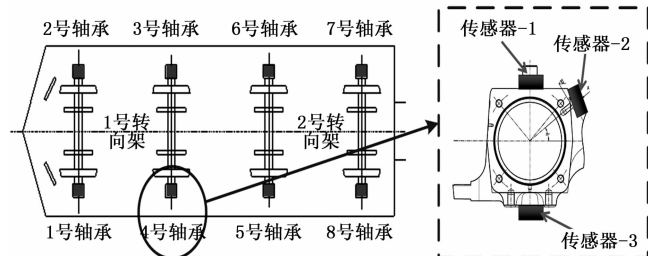


图 17 某列车轴箱轴承振动信号采集分布图

当列车分别以 200 km/h 和 250 km/h 速度运行时, 对其轴箱轴承进行振动信号采集, 然后利用所设计的数据分析软件, 基于倒谱分析和希尔伯特包络解调算法对测试得到的 4 号轴箱轴承振动加速度数据进行分析处理, 得到的部分结果如图 18 所示。在车速为 200 km/h 时, 不论是轴

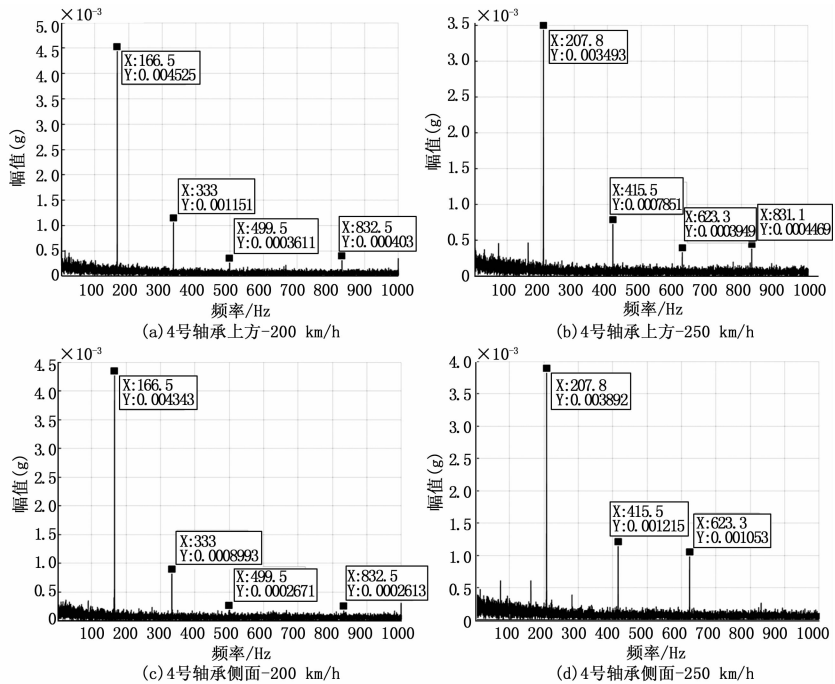


图 18 某列车 4 号轴箱轴承振动信号频谱图

承上方还是侧面, 4 号轴箱轴承在频率为 166.5 Hz、333 Hz、499.5 Hz 和 832.5 Hz 时均出现明显的振动幅值, 且其振动频率成倍增加; 当列车运行速度为 250 km/h 时, 出现了同样的振动现象, 仅振动频率发生了变化, 这一现象表明 4 号轴承出现了明显的故障或损伤。经过对 4 号轴承的实际观察, 发现其外圈出现明显的压痕, 这与实测得到的轴承出现故障结果一致。

通过对某型高速列车轴箱轴承的振动信号进行采集, 并利用所设计的数据分析软件对测试数据进行处理, 得到某轴箱轴承出现故障的结论, 验证了所设计的基于 LXI 总线多通道振动信号测试系统的合理性和有效性。

#### 5 结束语

针对大型复杂装备研制和应用过程中振动信号的采集与分析需求, 研制了一种可集成式多通道振动信号采集与分析系统, 可同时对上百通道的振动信号进行采集, 并具备信号分析与故障诊断能力, 提高了装备在研制与应用过程中的综合保障性能。

#### 参考文献:

- [1] 谢玲芳, 孟令军. 基于 Zynq 的振动信号采集及频谱分析 [J]. 仪表技术与传感器, 2020 (11): 116-119.
- [2] 兰淑静, 张华杰, 吴天安, 等. 基于 DSP 的振动信号采集系统研究 [J]. 电子设计工程, 2020, 28 (14): 16-20.
- [3] 孙苗钟, 殷磊, 谈炳发, 等. 振动信号处理与多功能时频分析系统的研究 [J]. 天津科技大学学报, 2020, 35 (4): 58-64.
- [4] 吴定祥, 刘峻宇, 任赛璞, 等. 动平衡测试系统中振动信号的采集 [J]. 测控技术, 2018, 37 (12): 85-88.

(下转第 103 页)