

基于 DSP 的声压与振动数据采集系统的设计

肖邵予

(中国舰船研究设计中心 船舶振动噪声重点实验室, 武汉 430064)

摘要: 针对传统数据采集系统功能单一, 抗干扰能力差, 精度低, 内存小, 速度慢无法处理大量数据的问题, 设计了一款基于 DSP 处理器的声压与振动数据采集系统; 仪器内置的 FPGA 保障了高速数据采集, DSP 处理器和大容量 DDR2 存储器使得系统可以不依赖上位机而直接在设备底层进行 FFT 计算, 以太网接口有效地提高了数据传输的安全性和可靠性; 环境试验结果显示该系统性能稳定, 适用于如高温、低温、盐雾、高冲击等恶劣环境下的数据采集, 可以满足声压和振动信号的采样和分析要求。

关键词: 数据采集; 恶劣环境; 以太网

Design of Data Acquisition System Based on DSP for Acoustic Pressure and Vibration

Xiao Shaoyu

(Key Laboratory of Ship Vibration and noise, China Shipbuilding Research and Design Center, Wuhan 430064, China)

Abstract: In view of the deficiencies such as single functionality, poor anti-interference ability, low precision, small memory space and low speed of traditional data acquisition systems, a DSP-based data acquisition system for acoustic pressure and vibration was developed to cope with this problem. A built-in FPGA inside the instrument ensured the high-speed data acquisition, and the combination of DSP and DDR2 made the system can get efficient FFT computation from the embedded software rather than the program running on the remote host. Furthermore, the Ethernet protocol greatly improved the reliability and safety during data transfer progress. The result of environment test showed that the data acquisition system had a stable performance and was especially suitable for the applications in severe conditions such as high temperature, low temperature, sharp shock, salt spray environment, and completely met the requirements of sampling and analyzing acoustic pressure and vibration signals.

Keywords: data acquisition; severe environment; Ethernet

0 引言

在飞机、汽车、大型船舶、精密机床、工业测量等领域, 对设备状态的及时有效的的监测是一项重要而复杂的工作。例如在水下环境中, 潜艇的声压和振动就是非常重要的性能指标^[1]。对振动信号进行采集和分析可以实现危险预报、故障诊断、性能分析等多项功能。而传统的数据采集系统囿于成本, 大都采用 8 位或 16 位的 ADC, 分辨率较低; 主控单元通常用低端的 MCU, 内存小, 无法存储大量的数据, 加之 CPU 的主频不高, 难以应对高速数据采集, 更无法处理大量数据运算(如 FFT、IFFT 等)。

随着半导体技术和信息技术的迅速发展, 数字信号处理器的性能越来越强, 速度越来越快, 功能也日益丰富。由于 DSP 的快速发展有效地弥补了传统的微控制器的不足, 本项目采用 FPGA 和 TI 公司的 C6000 系列高性能 DSP 处理器作为数核核心, 每台设备有 5 个卡槽, 每个卡槽可以连续监测 8 个通道, 并且内置完善的 EMC 和 ESD 保护电路, 提供多通道同步采集、振级、声压级、数据列表、时域波形、频谱图、1/3 倍频程谱、事件触发等监测和分析功能。此外, 本系统配套的上位机软件操作简单功能丰富, 可设置时域采集参数和频域计算参数, 用户既可以按默认配置运行上位机软件, 也可以手动设置

各个参数。上位机可以在无人值守的情况下自动搜索设备并启动采集, 无需额外的繁琐操作。采集到的数据也会自动保存, 用户可以根据需要查询各个时段的时域和频域数据。

1 系统硬件设计

设备硬件由前端调理电路、高精度模/数转换电路、数字单元、时钟电路、通讯接口电路和电源等部分组成。FPGA 负责前端光耦和 ADS1278 的控制, 以及与上位机软件的通信。DSP 处理器专注于信号处理。传感器输出的信号经过前端的运放电路调理后输入到 ADC 进行模数转换。仪器完全由基于 Windows 的上位机软件通过 LAN 总线操作, 使系统能够实现远程控制和数据读取。仪器还内置 EMI 滤波器以防止浪涌电压冲击对设备的损坏, 保障仪器在工业环境中的正常使用。系统结构框图如图 1 所示。

1.1 调理电路

前端调理电路在数据采集系统中有着至关重要的作用。如果信号在输入到模数转换器之前没有经过合理的处理, 例如电路中没有缓冲级, 那么信号就会在前级产生不小的损耗, 若高频噪声没被滤除就会叠加到实际信号中, 这些情况都会严重地影响到 ADC 采集的精度和系统的动态范围, 因此在信号输入到 ADC 之前必须经过必要的处理才能进行采集。

在本设备中, 前端调理电路由 TI 公司的高精度运放 OPA140 与低功耗差分运放 THS4521 组成。其中, OPA140 用作电压跟随器^[2]以提高输入阻抗, 正负 15V 供电, THS4521 输出差分信号以获得最优性能, 正 5V 供电。为改善

收稿日期: 2016-12-22; 修回日期: 2017-02-06。

作者简介: 肖邵予(1979-), 男, 主要从事振动噪声与控制方向的研究。

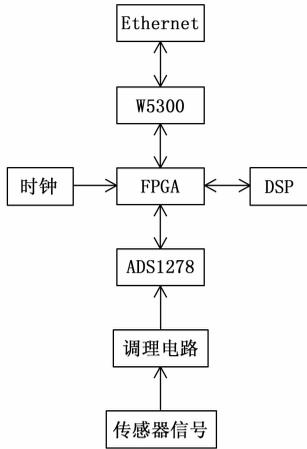


图 1 系统框图

信号调理的精度，电路中的电阻电容等元件均为高精密器件。设计了低通滤波器，可以有效地消除高频噪声进入采集单元。信号的切换采用高可靠性的光耦以降低功耗，且光耦的噪声低，非常适合在调理电路中做切换。传感器的信号首先经光耦切换至电压跟随器中，经过缓冲后输入到 THS4521 进行滤波降噪和差分输出^[3]。根据采集需求，每通道共有直流、交流和 ICP 三种耦合方式，且每通道都有各自的 ICP 电源，互不干扰。调理电路如图 2 所示。



图 2 前端调理电路框图

1.2 模数转换电路

对数据采集系统而言，除了具备高精度的前端信号调理电路外，采样速度、分辨率、动态范围、带宽、量程、采集的信号类型、接口协议等参数都是设计者必须考虑的问题^[4]，而这些参数都直接与模数转换器有关，因此一个符合需求的模数转换器也是最重要的器件之一。本项目采用的 ADC 为 24 位工业级模数转换器 ADS1278，采样率最高 144kSPS，支持 8 通道同步采集，且每个通道可独立开启或关闭，互不影响。ADS1278 内部集成有 8 个独立的 6 阶斩波稳定调制器、低纹波线性相位 FIR 滤波器、输入多路复用器等功能。ADS1278 使用方法简单，可直接配置相应的 I/O 口来操作它，省去了繁琐的对寄存器编程操作。ADS1278 的工作模式由 MODE [1: 0] 两根引脚设定，共有高速、高分辨率、低功耗和低速 4 种模式可供选择。ADS1278 转换的噪声小，信噪比很高因而满足了声压和振动信号的采集需求。

ADS1278 转换后的数据通过串行接口输出，并支持 SPI 和 Frame-Sync 两种接口协议。每个通道的数据可以通过各自通道的 DOUT 引脚并行输出，或者所有通道的数据通过 DOUT1 串行输出。接口协议和数据输出格式的选择是由 FORMAT [2: 0] 引脚确定。在 TDM 数据输出模式中，数据的输出顺序可以选择固定位置格式或动态位置格式。在固定位置格式下，所有通道的数据严格按通道顺序输出，其中已关闭的通道会强制输出 0 并占据数据流里相应的位置；在动态位置格式下，被关闭的通道将不产生数据输出，即输出的数据流全部是已开启通道的有效数据。考虑到本系统的数据量较大，

因此采用效率更高的时分复用动态位置格式和 Frame-Sync 接口协议。ADS1278 与 FPGA 的连接如图 3 所示。

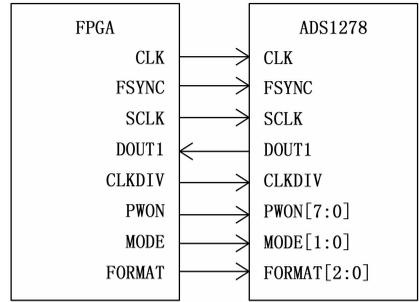


图 3 ADS1278 与 FPGA 的连接

电源的稳定性直接关系到模数转换器的工作状态。在本系统中，为向 ADS1278 稳定地供电，ADS1278 的所有电源网络均配置了完善的滤波电路。ADS1278 的 AVDD 为 5 V，IOVDD 为 3.3 V，由于用到了 144kSPS 的最高采样率，故 DVDD 为 2.1 V。

一个高性能的电压基准对精密数据采集系统是必不可少的^[5]。为此，本系统专门搭载了低温漂、超低噪声的 ADR440B 作为基准源，其噪声低至 1.2 $\mu\text{Vp-p}$ ，温漂低至 3 ppm/ $^{\circ}\text{C}$ 。可在 -40~125 $^{\circ}\text{C}$ 的宽温度范围内工作。为避免干扰，ADR440B 在 PCB 上布局靠近 ADS1278，且周围没有其他的走线。

1.3 数字单元

本系统的数字单元由 FPGA 和 DSP 组成。其中，FPGA 负责前端 ADS1278 数据的读取和控制，DSP 则专注于数据的处理。DSP 通过集成的 uPP (通用并行接口) 与 FPGA 通信，保障了数据的高速传输。

由于舰船的结构特殊，构造范围广，监测点分散在各处，很多监测项目又具有实时性的特点，因此对于各部位监测数据需要非常准确的时间同步，即所有的通道都应在同一个时刻采集，一旦出现微小偏差，不仅会造成监测结果的不准确，还严重影响了对舰船状态的研究分析，后果很严重。因此，为了实现同步，每个卡槽的 FPGA 和 ADS1278 均使用由设备统一提供的高精度的同步时钟信号；DSP 使用外接的 24 MHz 工业级晶振，且扩展了 Flash 和 DDR 存储器。FPGA 与 DSP 的连接如图 4 所示。

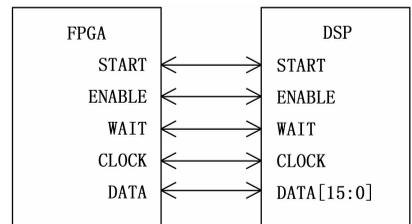


图 4 FPGA 与 DSP 的连接

1.4 通信接口

本系统通过以太网实现下位机与上位机的数据交互。PHY 芯片采用 100 Mb/s 的 W5300。该芯片内部集成 10/100 M 以太网控制器，支持固件 TCP/IP 协议，适用于高性能的嵌入式领域，与 FPGA 采用 8/16 位并行总线接口。根据通信需

求，W5300 配置为 16 位数据总线直接地址模式。此外，为满足 IEEE 802.3 电气隔离要求，无失真地传输以太网信号，通信接口电路中还配备了网络变压器电路^[6]。FPGA 与 W5300 的连接如图 5 所示。

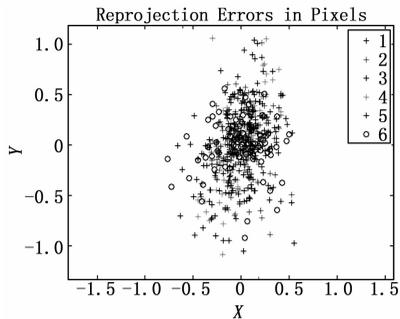


图 5 FPGA 与 W5300 连接图

2 软件设计

2.1 数据通信

本系统要求数据实时上传，因此以太网能否顺利传输数据很重要。以 8 通道，144 kSPS 采样率（此为最大数据量的配置）为例，每个卡槽每秒采集到的数据量为 $8 \times 24 \times 144\ 000 = 27.648\ \text{Mb/s}$ ，远低于 $100\ \text{Mb/s}$ ，因此以太网完全满足本系统的数据传输需求。

由于嵌入式系统对实时性要求较高，故系统采用速度较快的 UDP 网络协议。通信过程中，时域数据包与频域数据包的长度和编码格式不同以便上位机软件识别与解析。

2.2 软件流程

本系统的底层代码设计包括 DSP 和 FPGA 两部分。其中，FPGA 负责原始数据的采集，并将原始数据传输到上位机和 DSP。DSP 则专注于频域处理并将计算后的结果回传至 FPGA。

设备上电后，DSP 配置 uPP 为接收端以便接收来自 FPGA 的配置命令或采样数据；FPGA 则初始化网口，并默认配置 ADS1278 为 144 k 采样率，所有通道全部使能和交流输入模式。此后就等待上位机发出命令。若收到配置命令，则执行相应的命令；若收到开始采集命令，则开始采集并实时上传数据。DSP 每隔 10 分钟对 10 秒内的数据进行处理，待 FFT 计算完成后再将数据回传到 FPGA，随后 FPGA 将频域数据包上传至上位机。

因数据量较大，为了使 FPGA 与 DSP 之间的数据传输效率更高，不仅采用了 uPP 并行口，而且还开启了 DSP 自带的 DMA 功能以搭配 uPP 接口传输数据，使得 CPU 不用干预 uPP 的数据传输过程，将资源分配于其他的任务，显著地减轻了 CPU 的负担。此外，为了优化 DSP 的程序，底层软件针对系统的存储空间和程序要实现的功能，合理地分配了内存空间。程序流程图如图 6 所示。

2.3 算法改进

在底层软件中进行 FFT 计算是本系统的一大特色功能。传统的数据采集系统都是在上位机做频域计算，不仅对 PC 配置要求高，耗费资源，而且使得上位机软件体积庞大，开发和维护复杂^[7]。为改善这种不足，本项目将频域计算移到专门配备的高性能 DSP 处理器中，并开发了改进型的高效率 FFT 算法。

传统的 FFT 算法通常假定输入是复数输入^[8]，然而很多

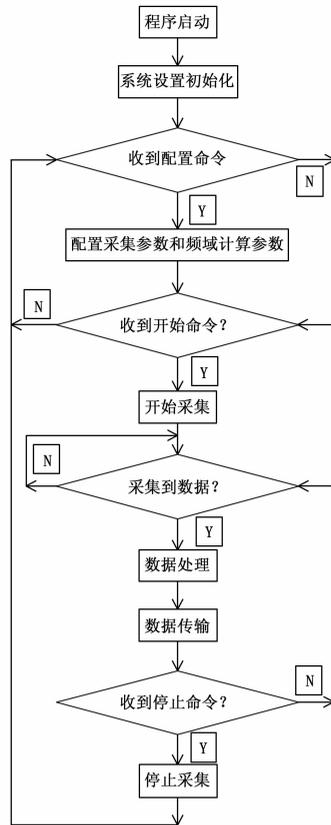


图 6 程序流程图

实际应用中只有时域的实数数据输入，如 ADC 采集到的就只有时域数据。解决这个问题的典型办法是将长度为 N 的实输入信号扩充为长度为 N ，虚部为 0 的复输入信号。

$$x_{\text{real}} = \{ 1, 2, 3, \dots \}$$

$$x_{\text{cplx}} = \{ 1, 0, 2, 0, 3, 0, \dots \}$$

这种方法简单但明显效率不高。为提高频域计算的效率，特在底层软件开发了无须扩充输入信号序列的算法，该算法主要有两大优势——节省存储空间和缩短计算时间。

改进型算法中，假定 $g(n)$ 是一个长度为 N 个点的实序列 (N 是偶数)，要得到长度为 N 的复 FFT 结果，只需用到长度为 $N/2$ 的 FFT 计算。具体步骤如下：

1) 构建长度为 $N/2$ 个点的复数值序列 $x(n) = x_1(n) + jx_2(n)$ ，其中， $x_1(n) = g(2n)$ ， $x_2(n) = g(2n+1)$ ；

2) 对复数值序列 $x(n)$ 做 $N/2$ 点的复 FFT 计算，得到 $X(k) = \text{FFT}\{x(n)\}$ ；

3) 经过额外的运算，从 $X(k)$ 得到 $G(k)$ ，

$$G_r(k) = X_r(k) A_r(k) - X_i(k) A_i(k) + X_r(N/2-k) B_r(k) + X_i(N/2-k) B_i(k),$$

$$G_i(k) = X_i(k) A_r(k) + X_r(k) A_i(k) + X_r(N/2-k) B_i(k) - X_i(N/2-k) B_r(k),$$

其中， $k = 0, 1, \dots, N/2-1$ ， $X(N/2) = X(0)$ ， $A(k)$ 和 $B(k)$ 分别是正弦系数和余弦系数。

上式只计算了 $G(k)$ 的前 $N/2$ 个点，因为实序列的 FFT 具有对称性， $G(k)$ 余下的 $N/2$ 个点可按如下公式计算：

$$G_r(N/2) = X_r(0) - X_i(0)$$

$$G_i(N/2) = 0$$

$$Gr(N-k) = Gr(k), k = 1, 2, \dots, N/2-1$$

$$Gi(N-k) = -Gi(k)$$

经过以上步骤，一个完整的 N 点 FFT 计算就已完成。

2.4 上位机软件

本数据采集系统有配套的上位机软件，因而用户可以远程控制设备的运行和读取数据。上位机软件实时存储测量数据，即使因断电导致监测中断，中断之前的数据也会自动保存。软件具有定时测量功能，用户可以根据实际需要提前设定好测试参数与间隔时间，让仪器在无人值守下自动定时测量，为监测提供方便。抗混滤波器可实时关闭、打开，缺省以分析频率抗混，可实时编辑抗混频率。上位机软件截图如图 7 和图 8 所示。

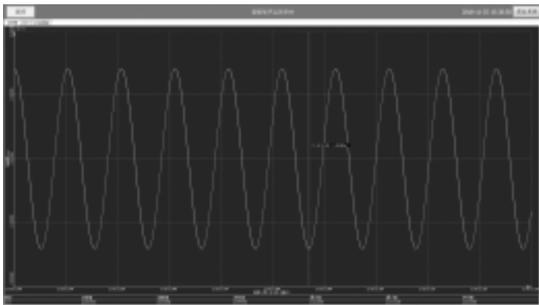


图 7 时域波形截图

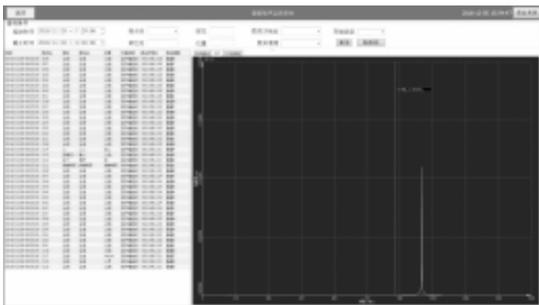


图 8 频域波形截图

3 试验结果与分析

为了验证系统的性能，进行了本底噪声测试、DC 电压测试、AC 电压测试、通道串扰测试、IEPE 测试、共模抑制比测试等多组试验。

设备运行在 52 kHz 采样率时，以 PCB 手持式校准仪作为振动源，振源为有效值 1 g，频率 159.2 Hz 的正弦信号，以 PCB 振动传感器 352C33 作为信号输入源，其灵敏度为 101.2 mV/g。测量数据如表 1 所示。

表 1 IEPE 测试数据

通道	输入值/g	测试值/g
1	1	0.992
2	1	0.992
3	1	0.992
4	1	0.992
5	1	0.989
6	1	0.990
7	1	0.989
8	1	0.989

CMRR (共模抑制比) 测试，输入正负极短接作为共模信号输入正极，设备地作为共模信号的负极，标准信号源输入 1 kHz 信号，以最大不失真信号的有效值为准，将采集显示的不失真最大有效值与实际信号源输入的有效值对比，取 20 常用对数，即为共模抑制比。CMRR 测试数据如表 2 所示。

表 2 共模抑制比测试数据

通道	输入值/mV	测试值/ μ V	CMRR/dB
1	190 mv	380 μ V	53.9
2	190 mv	390 μ V	53.7
3	190 mv	516 μ V	51.3
4	190 mv	485 μ V	51.8
5	190 mv	460 μ V	52.3
6	190 mv	400 μ V	53.5
7	190 mv	360 μ V	54.4
8	190 mv	420 μ V	53.0

由以上表格数据可见，本系统采集精度高，线性度好，实现了稳定的振动信号采集。

4 结论

普通的数据采集系统在高温、低温或盐雾等恶劣环境下采集精度不高甚至不能运行。相较于普通的数据采集系统，本系统更注重功能的多样性以及在恶劣环境下的可靠性和精度。在硬件方面，本系统全部使用工业级芯片和精密器件 (如精密电阻和工业级基准源芯片)，并有相应的防潮防冲击等工艺，通过严格的环境试验表明这些器件和工艺确保了每个物理环节在恶劣环境下都能正常运行。在软件方面，频域数据的计算由设备底层的 DSP 处理器完成，并且为了提高程序的效率还改进了 FFT 的算法，使得上位机软件能够免去繁琐的 FFT 计算，减轻了上位机的负担。上位机软件高度智能化，占用资源少，可以在无人值守时自动保存并分析数据，无需额外的操作。实验结果表明，本套数据采集系统有着出色的性能和可靠性，操作简单功能丰富，能在恶劣的环境下稳定地运行，具有重要的工程实际应用价值。

参考文献:

- [1] 陈志敏, 黄映云, 彭敏, 周音. 基于 ADAMS 的船舶隔振系统性能研究 [J]. 振动与冲击, 2007, 26 (8): 101 - 103.
- [2] 申晶, 张晓林. 一种低功耗 CMOS 并行双频低噪声放大器 [J]. 吉林大学学报 (工学版), 2013, 43 (2): 485 - 490.
- [3] 陈铁旭, 李儒章, 石立春. 一种用于 $\Sigma-\Delta$ A/D 转换器的运算放大器设计 [J]. 微电子学, 2011, 41 (1): 27 - 33.
- [4] 朱康生, 洪赢政, 黄斌. ADS1278 在高精度数据采集系统中的应用 [J]. 电子设计工程, 2009, 17 (4): 24 - 28.
- [5] 许育森, 胡炜. 一种新型全 CMOS 低功耗基准源的设计 [J]. 微电子学, 2013, 43 (6): 742 - 746.
- [6] 李珏, 赵继德. 一种工业控制数据采集系统硬件平台设计 [J]. 计算机测量与控制, 2009, 17 (8): 1648 - 1650.
- [7] 应龙, 何琳, 黄映云, 汪玉. 限位器对隔振系统抗冲击性能的影响 [J]. 振动与冲击, 2005, 24 (2): 71 - 76.
- [8] 李维嘉, 曹青松. 船舶振动主动控制的研究进展与评述 [J]. 中国造船, 2007, 48 (2): 68 - 79.