

舰载装备便携式高精度振动监测系统的设计

王 朕¹, 秦 亮¹, 肖支才¹, 刘生华²

(1. 海军航空大学 岸防兵学院, 山东 烟台 264001; 2. 海军 91115 部队, 浙江 定海 316000)

摘要: 振动对武器装备的可靠性有着重要影响, 针对舰载装备缺乏全寿命振动数据监测设备的困境, 以 PC104 总线、高精度振动传感器和电源管理技术为基础研制了一款高精度、便携式、低功耗舰载装备振动检测仪, 并与安装数据分析软件的下位机一起构成振动监测系统; 应用表明, 该振动仪具有分辨率高、功耗低、安装简单、方便携带等优点; 通过对舰载装备全球海域、全时段的振动监测, 获取了典型海况下, 舰载装备的振动数据, 在现役装备的可靠性分析及新型装备的可靠性设计方面发挥了重要作用。

关键词: 舰载装备; 振动仪; 低功耗; 便携式

Design of Portable High Precision Vibration Measuring System for Warship Equipment

Wang Zhen¹, Qin Liang¹, Xiao Zhicai¹, Liu Shenghua²

(1. Institute of Coastal Defense Army, Naval Aeronautics University, Yantai 264001, China;

2. Naval 91115 Army, Dinghai 316000, China)

Abstract: Vibration has an important impact on the reliability of weapons and equipment. In this paper, one portable high precision vibration measuring instrument is developed based on the technology such as PC104 bus, high precision vibration sensor and power management in order to measure the vibration of warship equipment. The vibration measuring system is composed of this vibration instrument and one computer which has been installed with the data analysis software. Application shows this vibration instrument has advantages of high resolution, low power consumption, simple installation methods, easy to carry and so on. This vibration measuring system has been used to sample the global sea vibration data of warship equipment, the sampling data has played an important role in the reliability analysis for active equipment and the reliability design for new equipment.

Keywords: warship equipment; vibration instrument; low power consumption; portable

0 引言

随着亚丁湾护航、环球出访、联合演习等任务的不断增加, 我海军舰艇出海时间越来越长, 舰艇及舰载武器装备经受了全年全球各种海况下的考验, 但也为舰载装备的保障提出了新的难题。其中, 对舰载装备实施全时域、全海域环境状态监测, 对监测数据进行分析处理进而提高保障效率、增强可靠性、发挥武器效能是一个重要环节。针对舰载武器振动环境测量仪器缺乏的困境, 本文采用高精度振动测量传感器设计了一款便携式舰载武器振动监测系统, 能有效满足各种安装、贮存位置下舰载装备的振动测量。

1 总体设计

考虑到振动测量的便捷性与时效性, 舰载装备的振动测量与数据分析分别由三轴传感器、高精度振动监测仪和安装数据分析处理软件的下位机组成^[1-3], 如图 1 所示。其中, 4 个三轴传感器用来采集/监测舰船装备的振动冲击信号; 高精度振动监测仪由 PC104 主控模块、数据采集模块、12 路信号调理器、LVDS 显示屏、电源转换及管理模块、大容量数据存储模块和大容量锂电池组成, 完成对传感器

采集的振动数据初步处理和存储功能^[4]; 下位机为安装数据分析和处理软件的计算机, 用于完成对高精度振动监测仪下载数据的波形、功率谱等分析功能。通常, 高精度振动监测仪和传感器安装在被监测对象上(舰船或舰载装备), 高精度振动监测仪可由单相交流 220 V 供电, 也可由内部大容量锂电池供电; 下位机置于数据存储管理中心。

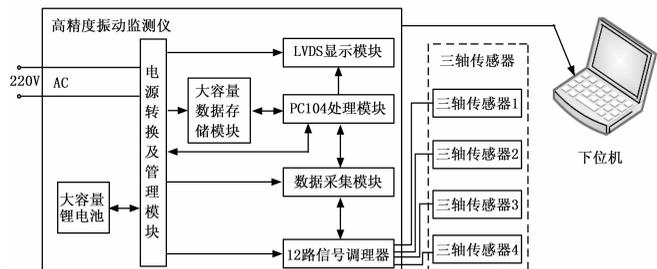


图 1 振动测量系统组成框图

2 硬件设计与选型

2.1 振动测量仪基本指标

根据被测对象及监测环境需求, 振动测量仪应满足以下基本指标:

监测信号路数: ≥ 12 ;

振动信号分辨率: $\leq 0.000\ 02\ \text{g}$;

监测频率: $0.1 \sim 1\ \text{kHz}$;

收稿日期:2017-12-27; 修回日期:2018-02-02。

作者简介:王 朕(1979-),男,山东聊城市人,硕士,副教授,主要从事武器装备测试、维修保障方面的教学科研工作。

- 工作温度： $-25\sim+75\text{ }^{\circ}\text{C}$ ；
 连续工作时间： ≥ 120 小时（DC 供电）；
 ≥ 90 天（220 VAC 供电）；
 重量： ≤ 15 kg（含蓄电池）；
 长宽高： $\geq 450\text{ mm}\times 300\text{ mm}\times 200\text{ mm}$ 。

2.2 高精度振动监测仪设计

2.2.1 PC104 主控模块选型

PC104 主控模块选用深蓝宇的 PCM-3587，该模块是一款性价比极高、尺寸极其紧凑、专为 PC104 应用设计的嵌入式控制模块。它的 Vortex86DX 处理器整合了南北桥、SPI BIOS、LPC、串/并口、高速 USB2.0 及 10 M/100 M 以太网等资源，尤其是采用的超低供电图形显示芯片 Volari™ Z9S 总耗电量仅为 1 W，但其 VGA 显示输出高达 $1\ 600\times 1\ 200$ ；此外，显示芯片 Z9S 可以很容易地连接平板显示，且支持 TFT 和 LVDS 输出。这些特点使得振动监测仪更容易实现设备体积小、功耗低等设计指标。

2.2.2 数据采集模块选型

数据采集模块选用深蓝宇的基于 PC104 总线 PCL-2101，该模块具有 16 路 12 位分辨率的模拟量输入通道、4 路 12 位分辨率的模拟量输出通道、24 路 TTL/CMOS 数字 I/O 通道、6 通道 16 位可编程定时器/计数器、4 路 8 位的 PWM 输出通道以及可编程外围接口等资源，且具有 250 kHz 的最大 A/D 采样率、1024 位数据深度 FIFO 缓存等优异性能指标，特别适用于结构紧凑、高可靠的嵌入式应用。

2.2.3 信号调理器

由于所选用高精度三轴振动传感器需要 24 VDC/4 mA 的恒流源供电，且输出信号叠加在 $8\sim 12\text{ V}$ 直流偏压上，因此需要对振动信号进行调理，振动仪选用了与三轴传感器相匹配的 8 通道信号调理器 LC0201。每通道均可有效滤除传感器叠加的直流偏压，调理信号频率可达 $0.1\text{ Hz}\sim 30\text{ kHz}$ ，工作电压为直流 $18\sim 36\text{ V}$ ，可提供三轴传感器所需的 24 VDC/4 mA 的直流恒流源。由于采用 4 个三轴振动传感器，共需 12 路信号调理通道，故需要两台信号调理器完成 12 路信号调理。

2.2.4 LVDS 显示模块

考虑到振动仪的便携性与功耗，显示模块选用了尹莱仕光电科技有限公司的 7 寸 LVDS 液晶模组+USB 触摸模块 SVB-LT0701-TP，它集成 LVDS 驱动板模块、USB 触摸控制模块、7 寸 LED 数字工控屏和 4 线电阻触摸屏；具有 24 位 LVDS 信号输入、标准 USB 接口、背光控制接口等资源；恒流 LED 背光工作模式，工作温度范围 $-20\sim+70\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，存储温度范围 $-25\sim+80\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，功耗小于 0.5 W；非常便于接入 ARM 系统和嵌入式工控主板。

2.2.5 电源转换及管理模块

振动仪交流 220 V 和直流蓄电池两种供电模式，若被监测装备可以提供 220 V 交流电，则采用交流供电，否则采用直流蓄电池供电；不管采用直流供电还是交流供电，都要转换为振动仪需要 5 V 和 24 V 两种直流电源。此外，

为充分提高蓄电池供电效率、尽可能延长无交流供电时系统工作时间，综合运用电源管理总线、电压动态调整、动态电能均衡等技术研制了智能化数字电源管理电路，该电路与过热、过压、电流监测、220 VAC/24 VDC 转换电路和 24 VDC/5 VDC 转换电路共同构成电源转换与管理模块^[5]，如图 2 所示。

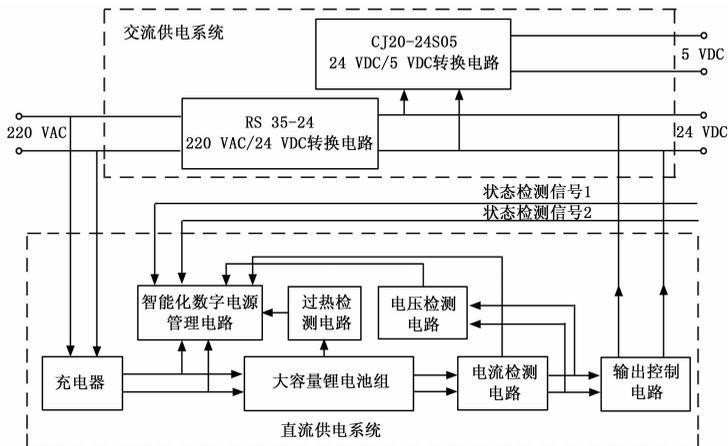


图 2 电源转换及管理模块原理图

2.3 三轴振动传感器

依据监测需求，考虑舰载装备特点^[6]，三轴振动传感器选用了朗斯测试技术有限公司的 LC0161 压电加速度传感器，该传感器内装微型 IC 放大器，将传统的压电加速度传感器与电荷放大器集一体，能直接与记录、显示和采集仪器连接，简化了监测系统、提高了测试精度和可靠性；其振动信号分辨率为 $0.000\ 02\text{ g}$ ，X 轴、Y 轴和 Z 轴的灵敏度分别为 $1\ 008\text{ mV/g}$ 、 $1\ 000\text{ mV/g}$ 和 $1\ 008\text{ mV/g}$ ，频率测量范围为 $0.1\sim 1\ 000\text{ Hz}$ （ $\pm 10\%$ ），可抗 300 g 冲击，温度范围为 $-30\sim+80\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，适应全球 95% 以上海域。

LC0161 三轴振动传感器采用先进的隔离剪切和三角剪切结构，美国原装进口的微型 IC 放大器基本组成为 MOS 场效应管，并由输入端的高阻值电阻与传感器电容构成一个一阶高通滤波器，由此确定传感器测量中的低频截止频率。内置 IC 传感器信号输出具有两线联接特征，即信号输出线与供微型 IC 放大器用的恒流源输入线为同一根线，另一根为地线，信号输出线可以用屏蔽效果好的低噪声同轴电缆。传感器内部结构以及与信号调理器电气连接如图 3 所示。

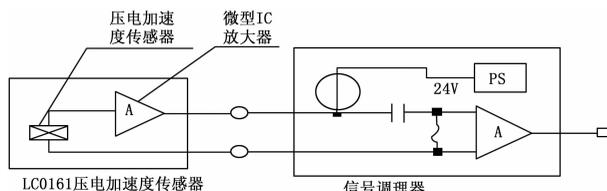


图 3 三轴振动传感器内部结构及与信号调理器连接图

3 软件设计

振动监测系统的软件部分除数据显示、报警、参数设置等基本程序外，主要包括数据采集程序、数据处理程序

和数据分析程序, 其中数据采集程序安装在振动仪上, 数据处理程序和分析程序安装在下位机上^[7-8]; 重点介绍数据采集、数据处理和数据分析的设计。

3.1 数据采集程序

数据采集程序将 4 个三轴振动传感器采集的 12 路模拟信号转换为数字信号并存储, 流程如图 4 所示。数据采集程序首先对 PCL-2101 数据模块进行初始化, 然后通过向一个 8 位的通道选择寄存器写入地址来选择振动监测数据输入通道, 寄存器的低 4 位选择低通道, 高 4 位选择高通道, 若低 4 位和高 4 位为相同值, 则表示是同一个通道, 这样 A/D 变换时, 模块选中的通道寄存器会自动递增到选择范围内的下一个通道, 避免了在同一组通道上进行 A/D 变换时变更通道地址; 通道选择后, 完成模拟前端电路设置大概需要 10 μs, 而后即可在选择的通道上进行 A/D 变换; 由于 A/D 变换器完成一次 A/D 变换至少需要 10 μs 的时间, 而处理器和软件运行都很快, 因此需要一个查询来完成延迟等待; 完成 A/D 变换后, 就可以从 A/D 变换器中读取变换后的数据, 该数据是一个 12 位的数据, 读数据时, 先读出一个低 8 位的数据、再读出一个高 4 位的数据, 最后得出的 12 位无符号整数即为该次采集数据; 数据存储后, 即可结束采集或转换通道进行再次采集。

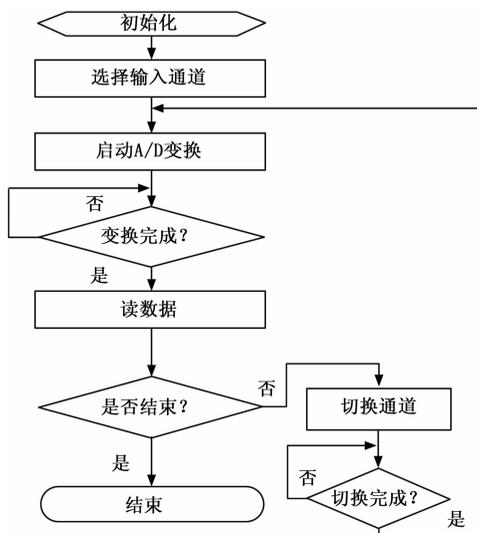


图 4 数据采集程序流程图

3.2 数据处理程序

综合考虑振动监测仪监测数据量大与内置存储空间有限的问题, 监测数据采用了占用空间较小的二进制模式进行存储, 且各传感器采集的数据是连续存储的, 因此, 采集的数据是按时间序列存储的一长串二进制文件, 而数据处理程序主要完成 12 个通道采集数据的分离及数据由二进制转换为十进制两个功能。由于 PCL-2101 模块具有 12 位的分辨率, 即每采集一个数据占 12 个二进制位, 而 2 块模块的模拟量输入最多 16 路, 因此可用 4 位二进制数表示, 这样采集的数据和通道号合起来共 16 位, 组成 2 个字节, 即每个 A/D 数据占 2 个字节, 其高 4 位为采集数据的通道位, 低 12 位为采集的加速度值的二进制表示。因此, 可将

高 4 位作为数据通道分离的标志符, 其值应小于 12。充分利用高 4 位数据, 确定每个采集数据的起始与终止是关键, 也是数据处理的难点之一。数据处理流程如图 5 所示。其中, “搜索标志位” 用于界定单次采样数据的位置; “数据起始标志位” 和 “数据结束标志位” 用于判定该次数据是否为对应通道的数据; “搜索规则” 用于判定分离的数据通道; “转换规则” 用于避免转换的数据不是采集的 12 位振动传感数据。

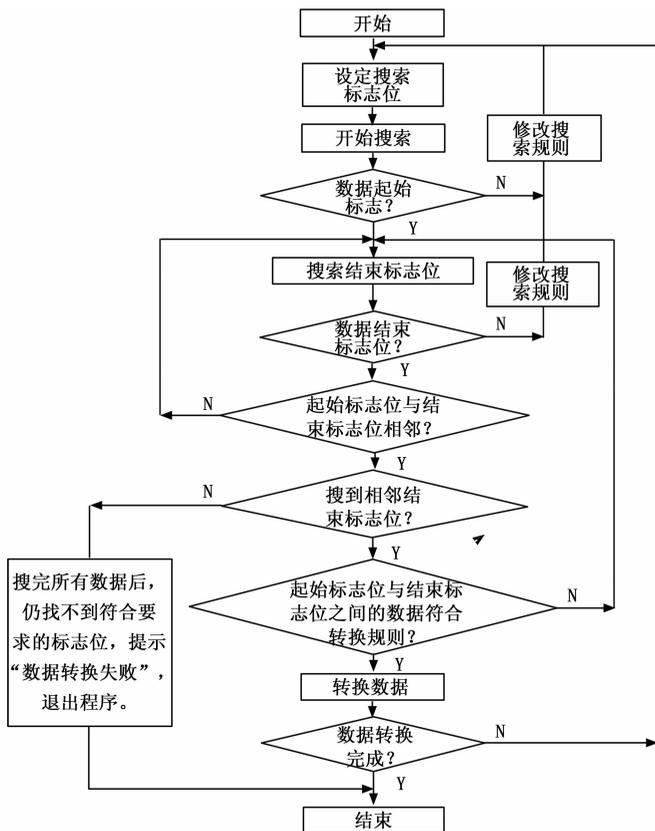


图 5 数据转换程序流程图

3.3 数据分析程序

理论上, 可利用各种算法对采集的数据进行分析, 达到对舰载装备的监测目的。本系统中, 主要对数据进行数据显示及功率谱分析, 得到在典型海况和工作情况下舰载装备的受到的冲击范围、频次与功率谱。数据分析程序主要利用安装于下位机的 Matlab 软件编程完成, 时域显示较为简单, 即绘制 3.2 中转换数据和采样时间 (或采样点数) 波形。随机振动功率谱分析中的功率谱密度是结构在随机振动载荷激励下响应的统计结果, 一般可表示为功率谱密度值与频率的关系曲线。在此采用了改进的周期图估计方法来对监测的振动信号进行功率谱分析^[9-10], 体现在两个方面, 一是用平均法降低功率谱估计的方差, 即将数据分成不重叠的数据段, 然后求平均的周期图, 平均的段越多, 估计结果的方差也就越小, 但随着分段的增加, 虽然方差减小了, 估计的偏差会变大, 因此在使用平均周期图法时, 需要在估计期望值偏差和估计方差之间进行权衡; 二是使用非矩形窗的方法来改进周期图估计方法, 即在周期图前

给每段信号加一个非矩形的数据窗，因为窗在两边渐变为 0，所以这种方法降低了由于重叠导致的段间统计相依的效应，且实践表明，取合适的窗函数（如海明窗、汉宁窗或凯塞窗）和一半段长度的重叠率，可以最有效的降低估计的偏差。

4 应用结果及分析

4.1 某型舰载装备振动环境的监测

振动仪研制成功后，对多型舰船、多型舰载装备进行多海况、全天候振动环境监测，取得了大量振动监测数据，为舰载装备的设计、维修保障和可靠性分析提供了真实、海量数据支持。图 6 为应用该振动仪对某型舰载导弹舰上贮存状态下振动环境监测应用图，图中 4 个三轴振动传感器通过强力磁座吸附于设备上（也可以通过转接螺栓等其他固定方式以适应不同监测环境），且传感器安装方向 Z 轴指向舰艏方向，X 轴指向水平向上，Y 轴与 X 轴、Z 轴构成右手系指向右弦；绿色箱子为振动仪；黑色箱子为传感器及数据传输线存放箱。由于监测对象无交流供电系统，因此，监测全程采用内置蓄电池组直流供电，经实际记录，蓄电池可供振动仪以 24 次/s（12 个通道每秒钟各采集 2 次）的采样频率不间断工作 144 小时。



图 6 某型舰载装备振动监测图

4.2 实验结果分析

针对某次军舰远洋训练时，海况较好且快速航行状态下，对舰载导弹的振动监测数据（1 号传感器）处理后，绘出的时域振动波形如图 7~图 9 所示。可以看出，舰载导弹受到的上下振动冲击较为平衡，典型值为 0.012 g，最大不超过 0.028 g；左右振动冲击不平衡，左右向典型值分别为 0.01 g 和 0.025 g，左右向最大值分别为 0.28 g 和 0.059 g；前后振动冲击不平衡，前后向典型值分别为 0.017 g 和 0.015 g，前后向最大值分别为 0.037 g 和 0.019 g。

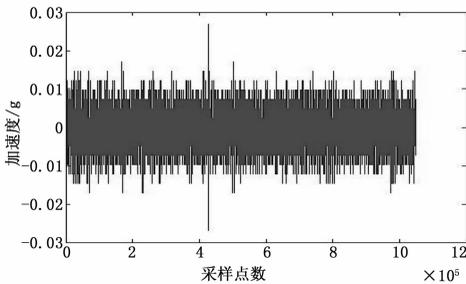


图 7 1 号传感器 X 轴（上下）振动波形图

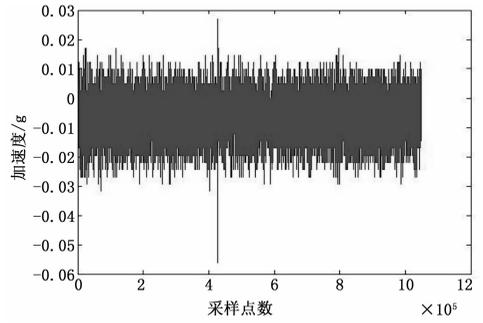


图 8 1 号传感器 Y 轴（左右）振动波形图

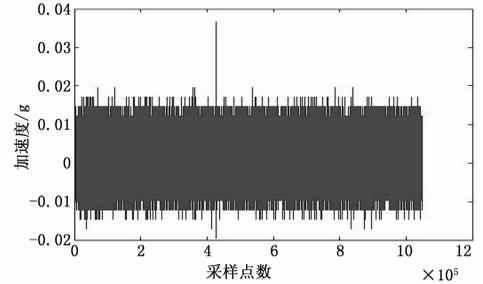


图 9 1 号传感器 Z 轴（前后）振动波形图

等各类舰艇，利用远洋训练、实弹演习、综合演练、全球出访等各种时机，采集了各种海域、各种海况下舰载装备承受的振动/冲击参数。国内各武器装备生产厂家对大批量采集数据进行分析处理，将分析结果用于现役装备改进和新型装备设计，有效提高了装备的适应性和可靠性。实际应用表明，该系统具有精度高、体积小、功耗低、易于运输、便于安装、可靠性高等优点。

参考文献：

- [1] 焦丽婷, 姚智刚. 某初速测量雷达中数据采集分析系统的设计与实现 [J]. 自动化应用, 2017 (5): 58-59, 103.
- [2] 俞乐, 丁国清. 基于高分辨率模数转换器的振动信号采集系统设计 [J]. 电子设计工程, 2016, 24 (24): 187-189, 193.
- [3] 崔璨, 邓圣, 代航阳, 等. 基于嵌入式计算机的核测系统设计与应用 [J]. 计算机测量与控制, 2016, 24 (3): 48-50, 54.
- [4] 韩力, 王世赞, 王军, 等. 多传感器动态参数实时采集与存储方法研究 [J]. 液晶与显示, 2017, 32 (5): 372-378.
- [5] 湛文韬, 孙靖国, 解文涛, 等. 机载核心处理平台电源管理系统 [J]. 电光与控制, 2014, 21 (11): 70-74.
- [6] 朱丽, 王小辉. 压电加速度计在试飞测试中的研究 [J], 中国科技信息, 2017 (19): 24-25.
- [7] 何佩玲. 振动信号测试与分析 [J]. 中国计量, 2016 (6): 103-104.
- [8] 鲍耀翔, 陈武. 振动测量误差影响因素探析 [J], 仪器仪表用户, 2016, 23 (8): 22-23, 75.
- [9] 袁慎钦. 地震动的谱分析及在 Matlab 中程序的实现 [J], 科技展望, 2016 (7): 193.
- [10] 熊齐, 陈南晖, 方霞. 基于 MPI 的 Welch 功率谱估计并行算法的实现 [J]. 计算机工程与应用, 2014, 50 (12): 194-197.

5 结束语

掌握全球各海域全天候海况参数对实现我国海军前出作战、全球保障、装备适应性和可靠性设计具有重要意义，本系统设计研制后，批量装配于我国海军护卫舰、驱逐舰