

文章编号: 2095-4980(2021)04-0733-07

## 基于 PPS 秒脉冲的多余物信号同步采集系统设计

孙志刚<sup>1</sup>, 高萌萌<sup>1</sup>, 蒋爱平<sup>\*1</sup>, 王国涛<sup>\*1,2</sup>, 郜雷阵<sup>2</sup>

(1.黑龙江大学 电子工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150080; 2.哈尔滨工业大学 电器与电子可靠性研究所, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要:** 为实现密封电子设备内部多余物信号的同步采集, 设计了一个基于秒脉冲(PPS)的多余物信号同步采集系统。针对多通道的多余物信号同步采集一致性差的问题, 采用双微控制单元(MCU)控制与内存共享结构, 将信号采集过程中的数据读写分离, 通过北斗 PPS 触发外部中断, 实现各通道信号采集的同步, 引用协调通用时间(UCT)为单脉冲内采集的多通道信号设置标签, 进行传输信号的再同步。测试表明, 各通道信号采集的同步误差在微秒范围内, 信号的时间标签一致, 为多余物信号的检测提供了重要参考价值。

**关键词:** 双微控制单元控制; 内存共享; 北斗秒脉冲; 协调通用时间

**中图分类号:** TN710

**文献标志码:** A

**doi:** 10.11805/TKYDA2020300

## Design of synchronous acquisition system for loose particle signal based on PPS second pulse

SUN Zhigang<sup>1</sup>, GAO Mengmeng<sup>1</sup>, JIANG Aiping<sup>\*1</sup>, WANG Guotao<sup>\*1,2</sup>, GAO Leizhen<sup>2</sup>

(1.School of Electronic Engineering, Heilongjiang University, Harbin Heilongjiang 150080, China;

2.Reliability Institute for Electric Apparatus and Electronics, Harbin Institute of Technology, Harbin Heilongjiang 150001, China)

**Abstract:** In order to realize the synchronous collection of loose particle signals generated inside sealed electronic equipment, a synchronous acquisition system for loose particle signal based on Pulse Per Second(PPS) is designed. Aiming at the problem of poor consistency in the synchronous acquisition of multi-channel loose particle signals, a dual Microcontroller Unit(MCU) control and memory sharing structure is adopted to realize the separation of data reading and data writing during the signal collection process. The external interrupt is triggered by Beidou PPS, and the synchronous collection of the signals in each channel is realized. By setting the Universal Time Coordinated(UCT) as the label of the multi-channel signal collected in a single pulse, the resynchronization of the transmission signal is realized. The test shows that the synchronization error of signal collection in each channel is at the magnitude of microsecond, and the time label of the signal is correct, which provides an important reference for the detection of loose particle signals.

**Keywords:** dual Microcontroller Unit(MCUs) control; memory sharing; Beidou Pulse Per Second (PPS); Universal Time Coordinated(UTC)

密封电子设备指的是具有特定功能的系统或系统内的重要组件, 如: 导弹、人造卫星、航空发动机、空间探测器等, 用于完成导航、通信、飞行控制等任务<sup>[1-2]</sup>。密封电子设备在生产制造与组装的过程中, 可能将一些金属碎屑、电焊飞溅物、松香和导线等微粒封装在设备内部从而形成多余物<sup>[3]</sup>。当密封电子设备受到冲击、振动、滑动和超失重等外力时, 多余物可能在设备内部做随机运动, 对电子设备的安全运行构成严重威胁。在人类的航天事业上, 曾发生过许多因为多余物造成重大事故的案例<sup>[4]</sup>。

收稿日期: 2020-06-29; 修回日期: 2020-08-03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51607059; 51077022); 黑龙江省自然科学基金资助项目(QC2017059); 黑龙江省博士后基金资助项目(LBH-Z16169); 黑龙江省高校基本科研业务资助项目(HDRCCX-201604); 黑龙江省教育厅科技成果培育资助项目(TSTAU-C2018016); 黑龙江大学校内资助项目(HDJMRH201912; 2012TD007; QL2015)

\*通信作者: 蒋爱平 email:1988014@hlju.edu.cn; 王国涛 email:wanggt@hlju.edu.cn

为应对多余物问题,美国宇航局最早研究并提出了微粒碰撞噪声检测(Particle Impact Noise Detection, PIND)法,其原理可以简述为:通过外部震动,激活电子设备中的多余物,使其与设备的内壁或设备内器件发生碰撞,附着在电子设备侧壁的声发射传感器感应到碰撞产生的应力波,转化成电压信号,即多余物信号<sup>[5]</sup>。由于多余物质量轻、体积小,因此,声发射传感器采集的多余物信号为微弱的小信号,且伴随有噪声,需要对该信号进行处理和采样,所得有效的数字信号才能用于后续研究。

目前对信号采集处理的研究大多是针对大信号,对微弱小信号采集系统的研究设计较少。陈红远等针对微弱电压信号,开发了一种基于 ADS1274 的同步采集系统<sup>[6]</sup>。陈蕾等设计了一个 8 通道肌电信号同步采集系统,有效去除了噪声干扰,实现对表面肌电信号的处理<sup>[7]</sup>。李宗敏等基于 FPGA 设计了一种自动调节增益的微震信号采集系统,实时快速地根据微震信号幅度变化自动调节放大器增益,采用抽取滤波的方法降低了对抗混叠滤波器性能的要求<sup>[8]</sup>。本文在前人研究基础上,结合我国自主化北斗导航系统,设计一种基于北斗秒脉冲(PPS)的多余物信号同步采集系统,实现对 PIND 法获得的微弱多余物信号进行处理、采样与传输,最终将采集的多余物信号发送至上位机显示与存储。

## 1 多余物信号同步采集系统设计

本文设计的多余物同步采集系统包含微弱信号调理电路、同步信号采集电路与信号传输三部分,分别实现对微弱多余物信号的放大与滤波、同步采集与数据传输。图 1 为系统的组成框图,图中最左侧为 PIND 法检测装置,通过上位机驱动摆台激励多余物运动。

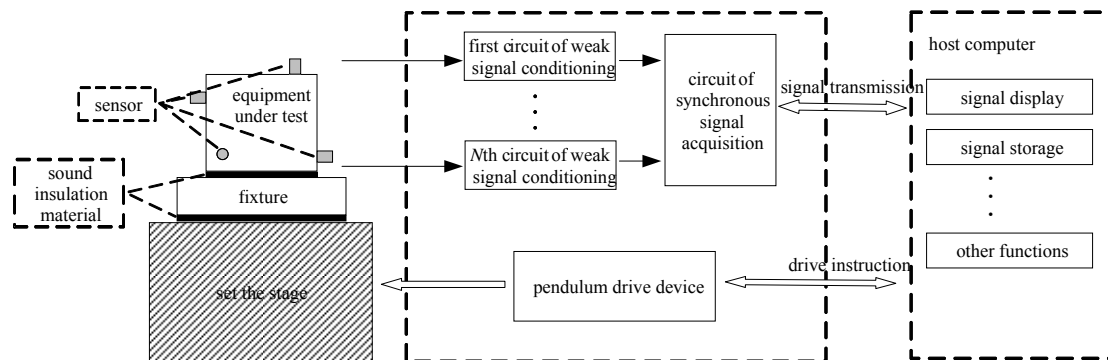


Fig.1 Block diagram of system composition

图 1 系统组成框图

### 1.1 微弱信号调理电路

微弱信号调理电路由声发射传感器、两级放大电路、滤波电路和一级同相比例放大电路组成。声发射传感器完成多通道的微弱多余物信号获得,各通道所得信号经两级放大电路实现初步放大,经滤波电路去除噪声干扰,再经一级同相比例放大电路调整放大倍数,最终输入同步信号采集电路。

#### 1.1.1 声发射传感器

密封电子设备结构的复杂造成多余物信号在设备中传播路径的复杂,同时信号在传播过程中受到衰减和畸变的影响,单声发射传感器无法完全获取设备内产生的多余物信号。因此,多传感器布局对密封电子设备内多余物信号的捕捉至关重要。本文设计  $400\text{ m} \times 400\text{ m} \times 400\text{ m}$  的正方体模型来模拟密封电子设备,设备内部用 3 块金属隔板以相互正交的方式分隔成 8 个独立的空间,在模型表面的不同位置放置 4 个一致性良好的同类型的声发射传感器来同步采集多余物信号<sup>[9]</sup>,如图 2 所示。

本文选用 PXR04 型号的声发射传感器,该传感器的谐振频率为 40 kHz,在灵敏度为 60 dB 处的频率带宽为 15~165 kHz,采集的信号包含更多的特征和信息,满足频率选择和幅值范围的要求。

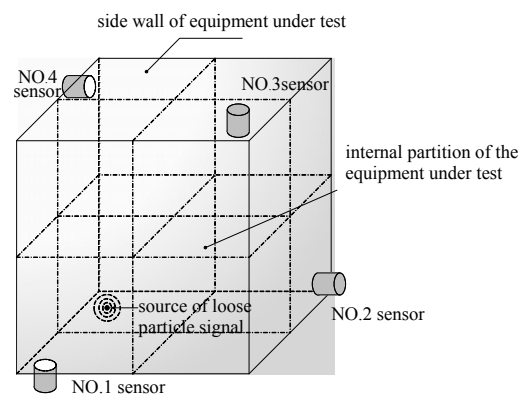


Fig.2 Schematic diagram of acoustic emission sensor arrangement

图 2 声发射传感器布置示意图

1.1.2 放大与滤波电路

声发射传感器捕捉的微弱多余物信号，幅值最大为几十毫伏，需要对微弱信号进一步处理，提高其信噪比和抗干扰能力。放大电路对微弱信号进行放大，使之满足同步信号采集电路的输入电压要求；滤波电路滤除多余物信号频率范围外的信号干扰，减少多余物信号中的背景噪声，提高信噪比。此外，在声发射传感器和两级放大电路之间设计了阻抗匹配电路，使两者之间的阻抗相匹配，减少信号因不匹配造成的能量损失。

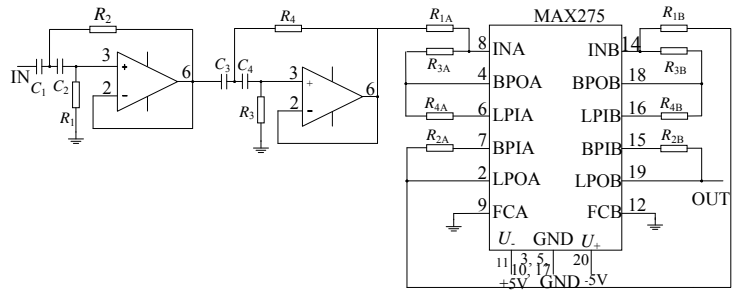


Fig.3 Circuit of bandpass filter  
图 3 带通滤波电路

微弱多余物信号经高屏蔽专用声音数据线输入到两级放大电路，放大方式为同相比例放大。两级放大电路的前两级均采用固定放大倍数，即  $A=1+R_3/R_2$ ，选用电阻  $R_3=9.1\text{ k}\Omega$ ， $R_2=1\text{ k}\Omega$ ， $A=10.1$ 。由于多余物信号的频率主要集中在  $20\sim 100\text{ kHz}$ ，本文将带通滤波器的通带频率范围设计为  $20\sim 180\text{ kHz}$ ，滤波电路由四阶高通滤波器和四阶低通滤波器组成<sup>[10]</sup>，如图 3 所示。其中，高通滤波电路采用四阶高通巴特沃兹滤波器电路，截止频率为  $20\text{ kHz}$ ，由 2 个运算放大器和分立元件电阻及电容组成，通过计算可得： $C_1=C_2=C_3=C_4=1\text{ nF}$ ， $R_1=R_3=11.3\text{ k}\Omega$ ， $R_2=R_4=3.92\text{ k}\Omega$ 。低通滤波电路采用集成的连续时间有源滤波器 MAX275 进行设计，完成的  $180\text{ kHz}$  低通滤波器的电阻详细参数如表 1 所示。一级同相比例放大电路设计在滤波电路之后，同样采用前文所述的单级放大电路结构。其中，电阻  $R_3$  用于调整放大倍数，使各通道的信号放大倍数一致。

表 1 MAX275 外围电阻的阻值  
Table1 Resistance value of peripheral resistance of MAX275

resistance	value/kΩ	resistance	value/kΩ
$R_{1A}$	2.21	$R_{1B}$	2.32
$R_{2A}$	11.30	$R_{2B}$	11.30
$R_{3A}$	1.21	$R_{3B}$	3.01
$R_{4A}$	6.19	$R_{4B}$	6.19

1.2 同步信号采集电路

同步信号采集电路的结构如图 4 所示，由 A/D 转换电路、信号采集微控制器单元(MCU)、双口 RAM 与信号传输 MCU 组成，微弱信号调理电路与同步信号采集电路之间的阻抗匹配电路用来匹配两者之间的阻抗。

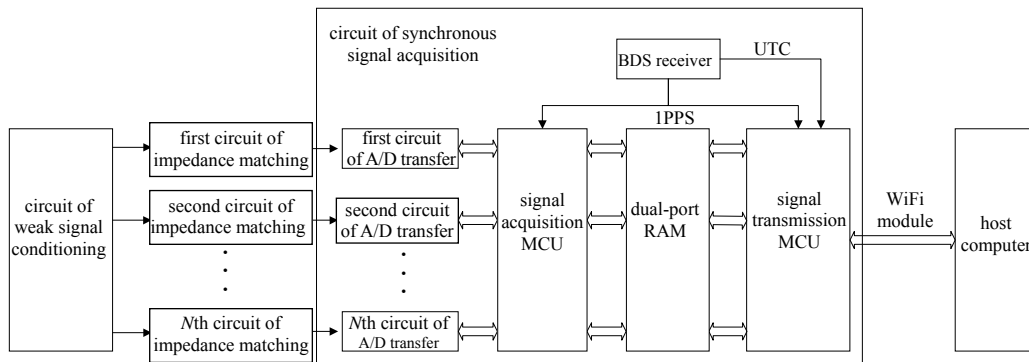


Fig.4 Block diagram of circuit of synchronous signal acquisition  
图 4 同步信号采集电路结构框图

匹配信号输入 A/D(Analog/Digital)转换电路进行高速采样，信号采集 MCU 将 A/D 转换电路输出的数字信号通过双口 RAM 的左端口写入数据存储区，写入完成后向信号传输 MCU 发送数据读取指令，信号传输 MCU 在双口 RAM 的右端口读取数据，读取完成后通过 WiFi 模块将数据传输至上位机进行显示与存储。其中，北斗卫星导航系统(BeiDou Navigation Satellite System, BDS)接收器通过天线接收北斗导航系统返回的 PPS 和 UTC 时间，同步触发信号采集 MCU 的外部中断，进而控制各通道进行同步信号采集。

1.2.1A/D 转换电路

考虑到多余物信号的频率范围为  $20\sim 100\text{ kHz}$ ，为保证能不失真地恢复原始信号，由奈奎斯特采样定理可知：采样频率要大于被采样信号最高频率的两倍，即多余物信号的采样频率至少需设置为  $200\text{ kHz}$ ，故本文将 A/D 转换电路的采样频率设计为  $500\text{ kHz}$ 。采用 AD7892 型号的模数转换芯片，其转换精确度为 12 位，针对微弱信号调理电路输出的  $-5\sim +5\text{ V}$  模拟电压，芯片可分辨的最小模拟电压为： $1\text{LSB}=10\text{ V}/4096=2.44\text{ mV}$ 。

使用 AD7892 转换芯片将模拟信号转换为数字信号的过程中, 为避免信号采集 MCU 的高频信号对 A/D 数据转换产生影响, 需在 A/D 转换电路和信号采集 MCU 之间进行隔离, 进而使 A/D 转换电路的数字供电电源、数据总线接口与信号采集 MCU 的供电电源、I/O 口隔离, 提高 A/D 转换过程的抗干扰能力, 实现信号的高速高精度采集。选用 SI8460BB 型号的数字隔离芯片, 其最大数据速率为 150 Mbps, 可以有效对 A/D 转换电路和信号采集 MCU 实现隔离。

### 1.2.2 信号采集 MCU

信号采集 MCU 需要对大量数据进行快速采集与处理, 本文采用 ARM 公司设计的 STM32F407 芯片为 MCU, 该芯片具有 32 位处理器 Cortex-M4 核, 主频最高可达 168 MHz, 集成有 FPU 和 DSP 指令, 同时具有 12 个 16 位和 2 个 32 位定时器, 满足通过多个定时器同时对 4 通道进行高速采样, 以及对采样信号的快速读写控制和及时传输。

信号采集 MCU 接收到信号传输 MCU 反馈的采集命令后, 开启外部中断 0 和外部中断 9。其中, 外部中断 0 用于接收 PPS, 当 PPS 有效触发外部中断 0 时, 开启定时器中断控制 A/D 的采样速率; 外部中断 9 用于检测 A/D 转换芯片的 BUSY 管脚电平状态, 当管脚处于低电平状态时, 触发外部中断 9 开始对 A/D 转换电路输出的数字信号进行读取, 并将读取的数据快速写入双口 RAM 的一个存储区。在完成写数据后, 通过 PB1 管脚向信号传输 MCU 发送数据读取的指令, 并将此刻 A/D 转换电路输出的数字信号写入双口 RAM 的另一个存储区。在此过程中, 信号采集 MCU 实时判断是否有来自信号传输 MCU 反馈的停止采集命令, 确认该命令后关闭中断并停止工作。

### 1.2.3 双口 RAM

本文采用双 MCU 的控制结构, 通常情况下, 2 个 MCU 之间的通信方式有串口通信、DAM 通信、标准总线结构通信以及基于共享内存空间的通信等。基于数据传输快、实时性高的考虑, 本文采用基于共享内存的通信方式数据读写。

选用 Cypress 公司的 16 K×18 bit 的 CY7C4265 先进先出(First In First Out, FIFO)芯片作为双口 RAM, 并将其数据存储区分成两个, 分别进行数据的写入和读取。当信号采集 MCU 向一个数据存储区完成数据写入后, 即完成 8K×18 bit 的数据写入(判断半满时), 会发送一个数据读取指令给信号传输 MCU。在信号传输 MCU 进行该数据存储区的数据读取时, 信号采集 MCU 会继续向另一个数据存储区进行当前采样信号的写入, 同样在写完后发送数据读取指令给信号传输 MCU 进行该存储区的数据读取, 而此时信号采集 MCU 又将新一轮的采样数据重新写入第一个数据存储区。通过读写分离的方式, 避免 2 个 MCU 因对同一地址同时读写而造成冲突。

### 1.2.4 BDS 接收器

选用 S1216F8 型号的北斗模块接收北斗导航系统返回的 PPS 和 UTC 时间, 该模块共有 5 个管脚, 分别为: VCC, GND, TXD, RXD 和 PPS。其中, 管脚 TXD 和 RXD 连接到信号采集 MCU 与信号传输 MCU 串口 3 的管脚上, PPS 管脚连接到信号采集 MCU 与信号传输 MCU 外部中断的输入管脚上。

信号采集 MCU 通过定时器对多余物信号的采样频率进行控制, 在定时器控制的采样频率满足设计要求时, 信号采集 MCU 通过 PPS 每隔 1 s 的时间对各通道使用的定时器中断同步一次, 达到信号采集同步的目的。信号传输 MCU 通过 PPS 每隔 1 s 获得一次 UTC 时间, 将获取的 UTC 时间添加到当前时刻读取的存储区数据前, 完成数据的时间标定。

## 1.3 数据传输

数据传输部分包含信号传输 MCU、WiFi 模块和上位机。信号传输 MCU 控制 WiFi 模块与上位机基于套接字(Socket)通信建立连接, 在其完成从双口 RAM 的存储区读取数据后, 按照读取顺序存储在发送缓冲区, 并引入 UTC 时间进行整合, 通过发送套接字将整合的数据及时传输到上位机, 上位机将数据进行显示与存储。

### 1.3.1 信号传输 MCU

信号传输 MCU 同样采用 STM32F407 芯片作为 MCU, 其主要功能有: 对 WiFi 模块进行初始化配置, 使其工作于串口 STA 模式并接入局域网内, 通过读取指定上位机的 IP 地址和端口信息, 与上位机建立通信连接。连接建立后, 接收上位机发送的采集命令, 将该命令反馈至信号采集 MCU 并同时开启外部中断 0 和外部中断 1, 当 PPS 有效触发外部中断 0 时, 开启串口中断接收北斗接收器返回的 UTC 时间。在接收到信号采集 MCU 发送的数据读取指令时, 触发外部中断 1, 开始从双口 RAM 的存储区中读取数据, 并将串口接收的 UTC 时间给读取完成的数据添加时间标签, 通过 WiFi 模块将数据传输至上位机。在此过程中, 信号传输 MCU 实时判断是否有来自上位机的停止采集命令, 确认该命令后, 反馈至信号采集 MCU 并同时关闭中断、停止工作。

### 1.3.2 WiFi 模块

信号传输 MCU 需将单脉冲的采样数据及时传输至上位机，本文选用有人物联网公司的 USR-WIFI232-A2 WiFi 模块作为通信载体，该模块具有 AP(Access Point)、STA(Station)、AP+STA 三种无线组网方式，最大支持同时与 32 台设备连接，满足不同场景的应用需求。同时，该模块支持 10~100 Mbps 的以太网通信速率，满足本文大数据量的即时通信需求。

## 2 同步采集系统工作流程

同步采集系统的工作流程如图 5 所示。信号传输 MCU 与上位机建立通信连接后，判断上位机发出的采集命令并反馈给信号采集 MCU，同时开启外部中断 0 和外部中断 1。信号采集 MCU 接收到采集命令后，初始化 A/D 转换电路和双口 RAM，并开启外部中断 0 和外部中断 9。当 PPS 有效触发中断 0 时，开启定时器控制 A/D 转换电路的采样速率，通过中断 9 判断 BUSY 管脚的电平状态，低电平时触发中断 9 开始读取采样数据，并写入双口 RAM 的存储区，在完成写数据后发送数据读取指令至信号传输 MCU。信号传输 MCU 触发中断 1 开始读取数据，当 PPS 有效触发中断 0 时，接收当前的 UTC 时间进行时间标定，并将标定数据通过 WiFi 模块传输至上位机进行显示与存储。此过程中，信号传输 MCU 对上位机是否发送停止采集命令进行实时判断，确认后反馈至信号采集 MCU，同时进行关闭中断和停止工作。

## 3 系统测试与结论

设计的微弱信号调理电路实物如图 6 所示，包含阻抗匹配、两级放大、带通滤波和一级同相比比例放大等部分，完成对声发射传感器输出的微弱多余物信号的处理，最终输出至同步信号采集电路。

同步信号采集电路接收上位机的指令，接收微弱信号调理电路输出的有效信号，引入 PPS 与 UTC 时间，完成同步匹配和时间标定，将同步采集的 4 通道多余物信号发送至上位机进行显示与存储，及后续其他功能。本系统同步采集的 4 通道多余物信号在上位机实际显示结果如图 7 所示。通过点击“手动测试”，即由上位机向信号传输 MCU 发送测试指令，最终由信号采集 MCU 进行本次实验测试。图中通道 1 至通道 4 的信号波形为本系统采集的 4 通道同步多余物信号，可以发现，信号在时间刻度上连续对应，说明本系统对同一多余物信号采集的实现效果良好。另外，信号在幅值刻度上因为声发射传感器距离多余物信号源的不一有所不同。

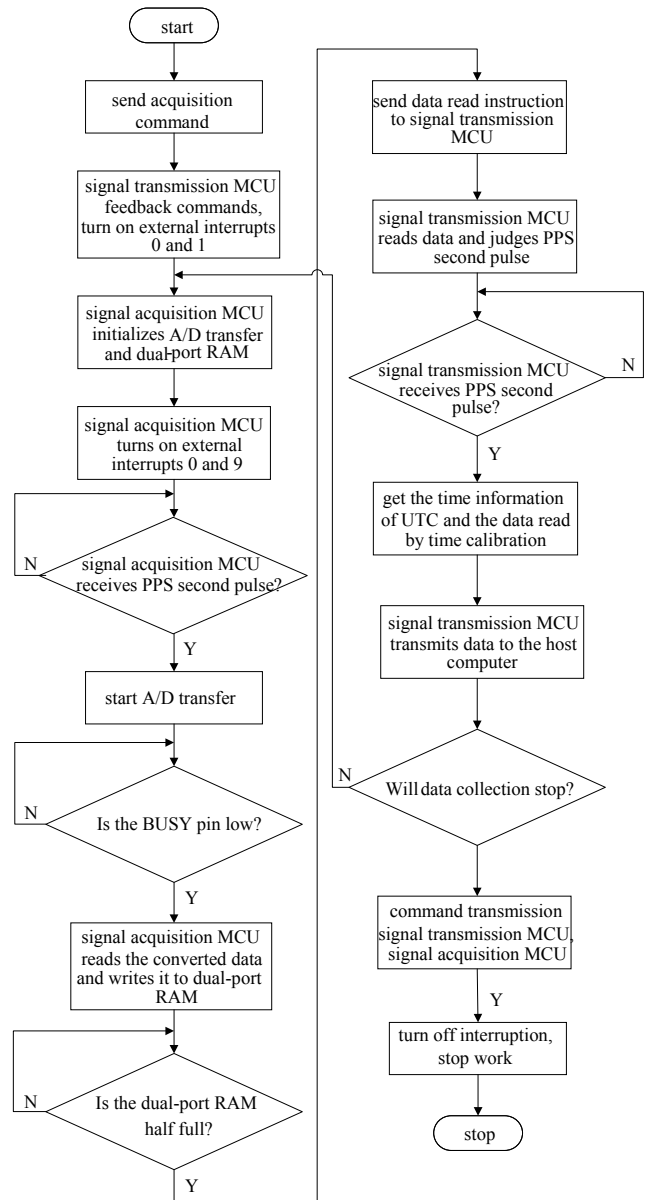


Fig.5 Work flow of synchronous acquisition system  
图 5 同步采集系统工作流程图



Fig.6 Physical diagram of circuit of weak signal conditioning  
图 6 微弱信号调理电路实物图

本文设计的基于 PPS 秒脉冲的多余物信号同步采集系统,通过微弱信号调理电路对碰撞产生的微弱多余物信号进行放大滤波处理,得到初步有效的多余物信号;同步信号采集电路实现对多余物信号的快速采样和读写控制,避免了高频干扰和读写冲突等现实问题,引入北斗 PPS 与 UTC 时间,同步各通道的采样时间与时间标定;最终通过 WiFi 模块将标签化数据传输至上位机。测试表明,对碰撞产生的微弱信号能够实现多通道调理、同步采样与及时传输,采集的信号在上位机能够有效地进行显示与存储,同步误差在微秒级别,达到本文的设计要求。

#### 4 结论

本文设计的基于 PPS 秒脉冲的多余物信号同步采集系统经过反复实验验证,已在哈尔滨工业大学电器与电子可靠性研究所进行初步应用。在研究所现有的通过有线方式进行信号同步采集的基础上,本系统调整了声发射传感器布局与信号放大过程设计,进一步精确了多余物信号的滤波范围,引入了 PPS 同步触发中断代替传统情况下的指令控制,更好实现了信号同步采集的目的,并采用 WiFi 代替有线传输方式,解决了采集系统与上位机物理空间的关联性带来的不便,提高了整体的信息化程度。对比测试表明,本文经过优化的信号同步采集系统,对 4 通道多余物信号的同步精确度提升 20%以上,应用信号无线传输的方式拓宽了系统应用的领域并简化了操作。同时,本文设计的系统为相关领域的微弱信号处理及同步采集提供了一种可参考的思路,接入自主化北斗导航系统与采用 WiFi 传输方式,对我国相关技术和产业发展具有一定的促进作用。

#### 参考文献:

- [1] 郑世才. 航天产品活动多余物的检测[J]. 上海航天, 1997(5):56-60. (ZHENG Shicai. Detection of active surplus of aerospace products[J]. Aerospace Shanghai, 1997(5):56-60.)
- [2] 张坤,戚乐,陈金豹,等. 航天电子设备多余物自动检测系统的研制[J]. 电子测量技术, 2012,35(3):82-86,99. (ZHANG Kun,QI Le,CHEN Jinbao,et al. Development of automatic detection system for surplus in aerospace electronic equipment[J]. Electronic Measurement Technology, 2012,35(3):82-86,99.)
- [3] 熊涛. 航天器总装多余物控制方法探讨[J]. 航天器环境工程, 2006(5):277-281. (XIONG Tao. Discussion on the control method of spacecraft assembly surplus[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2006(5):277-281.)
- [4] 许龙飞,麻高占,马利,等. 运载火箭总装气密试验多余物控制方法分析[J]. 质量与可靠性, 2017(4):6-9. (XU Longfei,MA Gaozhan,MA Li,et al. Analysis of surplus control method for general assembly airtightness test of launch vehicle[J]. Quality and Reliability, 2017(4):6-9.)
- [5] 王淑娟,王国涛,翟国富,等. 航天继电器多余物微粒碰撞噪声检测的冲击试验条件[J]. 电工技术学报, 2011,26(1):75-80,85. (WANG Shujuan,WANG Guotao,ZHAI Guofu,et al. Impact test conditions for detection of impact noise of residual particles in aerospace relays[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011,26(1):75-80,85.)
- [6] 陈红远,郭天太,吴俊杰,等. 多通道微弱电压信号同步采集系统开发[J]. 电子技术应用, 2014,40(2):78-80,84. (CHEN Hongyuan,GUO Tiantai,WU Junjie,et al. Development of synchronous acquisition system for multi-channel weak voltage signal[J]. Electronic and Applied Technology, 2014,40(2):78-80,84.)
- [7] 陈蕾,林明星,代成刚,等. 多通道表面肌电信号同步采样与处理研究[J]. 现代电子技术, 2020,43(4):17-20.(CHEN Lei,LIN Mingxing,DAI Chenggang,et al. Study on synchronous sampling and processing of multi-channel surface EMG signals[J]. Modern Electronics Technique, 2020,43(4):17-20.)
- [8] 李宗敏,张法全,王国富,等. 基于 FPGA 高精度微震信号采集系统设计[J]. 仪表技术与传感器, 2016(4):108-110. (LI Zongmin,ZHANG Faquan,WANG Guofu,et al. Design of high precision microseismic signal acquisition system based on FPGA[J]. Instrument Technique and Sensor, 2016(4):108-110.)
- [9] 郜雷阵. 密封电子设备活动多余物定位方法研究[D]. 哈尔滨工业大学, 2019. (GAO Leizhen. Research on location method of active surplus in sealed electronic equipment[D]. Harbin,China:Harbin Institute of Technology,2019.)

(下转第 746 页)

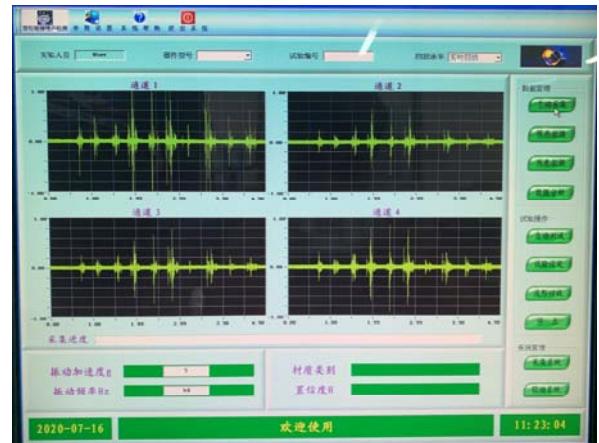


Fig.7 Physical display of the collected 4-channel surplus signal  
图 7 采集的 4 通道多余物信号实物显示图