

基于 QT 的多型号弹载记录仪回读系统设计

杨伟林¹, 李 杰^{1,2}, 马喜宏^{1,2}, 孙 宁³, 孙鹏翔¹, 刘玉玉¹

(1. 中北大学 电子测试技术国防科技重点实验室, 山西 太原 030051;

2. 中北大学 仪器科学与动态测试教育部重点实验室, 山西 太原 030051;

3. 北京遥感设备研究所, 北京 100080)

摘要:弹载记录仪在军事和航天领域发挥着重要作用。然而,不同的弹载记录仪在数据上传方式、编帧结构和回读指令等方面可能存在差异,这导致传统的回读系统无法满足其多样化的需求。为解决这一问题,设计了一种基于 QT 的多型号多功能数据回读系统。该系统支持多种接口传输方式,用于读取不同型号的弹载记录仪数据。同时,它可以根据不同型号的记录仪设置相应的读取指令,并实时绘制回读过程中的数据曲线。回读完成后,系统能够分离处理不同编帧方式的数据。试验验证表明,该系统能够有效实现针对不同型号记录仪的数据回读、数据绘制和数据分离等功能。该系统的设计显著提高了回读过程的效率和灵活性,具有较强的工程实用价值。

关键词:弹载记录仪;QT 上位机;数据显示;数据解析;国产 FPGA

中图分类号:TP319

文章编号:1000-0682(2024)02-0003-07

文献标识码:A

DOI:10.19950/j.cnki.CN61-1121/TH.2024.02.001

Design of a multi-model projectile recorder playback system based on QT

YANG Weilin¹, LI Jie^{1,2}, MA Xihong^{1,2}, SUN Ning³, SUN Pengxiang¹, LIU Yuyu¹

(1. Key Laboratory of Electronic Testing Technology for National Defense Science and Technology, North University of China, Shanxi Taiyuan 030051, China; 2. Key Laboratory of Instrumentation Science and Dynamic Measurement, Ministry of Education, North University of China, Shanxi Taiyuan 030051, China; 3. Beijing Institute of Remote Sensing Equipment, Beijing 100080, China)

Abstract: The telemetry recorder plays a crucial role in both military and aerospace fields. However, different telemetry recorders may vary in data uploading methods, frame structures, and readback commands, leading to the inadequacy of conventional readback systems to meet their diverse requirements. To address this issue, a QT-based multi-model, multi-function data readback system has been designed. This system supports various interface transmission methods to retrieve data from different models of telemetry recorders. Simultaneously, it can generate specific readback commands based on the settings of different recorder models and real-time plot the data curves during the readback process. After the readback is complete, the system can effectively separate and process data with different frame formats. Experimental verification indicates that this system can efficiently achieve data readback, plotting, and separation functions for different recorder models. The design significantly enhances the efficiency and flexibility of the readback process, making it highly valuable for practical engineering applications.

Keywords: projectile recorder; QT-based host computer; data display; data processing; domestic FPGA

收稿日期:2024-01-16

基金项目:国家自然科学基金(61973280)

第一作者:杨伟林(1997—),男,安徽宿州人,硕士研究生,研究方向为微惯性测量、组合导航与复杂恶劣环境下的动态测试集成。

E-mail:15536986084@163.com

0 引言

常规弹药在改造过程中,需要进行多次靶场实弹实验以确保其正确性^[1]。在靶场实验后,需要将弹体内置采集系统中存储芯片的数据及时回读。然

而,不同型号的弹载记录仪的数据回读方式、数据回读指令、数据编帧结构等存在差异,传统的数据回读装置无法适应其多样性的需求,郝晓明^[2]等人使用 FT245BL 芯片设计了一款针对某型号的弹载采存设备的数据读取装置;赵阳刚^[3]等人设计了一种基于 FPGA 和 LVDS 的弹载数据回读系统;薛栋^[4]等人设计一种基于 FPGA、LVDS 和 USB3.0 的高速回读系统;现有技术基本上是针对某固定读数接口的记录仪而设计,而且上位机这一方面缺乏通用性。所以,为了更大程度上适应不同型号的弹载记录仪,基于 QT 设计了一种多功能的软硬件结合的数据回读系统。

弹载记录仪的设计必须考虑恶劣复杂的极端环境,不仅要能够有效记录,保证准确测量,体积也要尽可能的小,这就导致弹载记录仪内部传输接口数量有限,通常为 LVDS 或者串口,并且在部分通用设计中会增加直接读取存储芯片的接口作为备用读数方案。所以该系统中设计了 LVDS, RS485/422, FLASH, eMMC 等读数接口,使用国产 FPGA 作为主控芯片,通过 FT600 USB3.0 接口芯片将数据上传至上位机。

上位机基于 QT 编写,可以针对不同型号的记

录仪,在界面设置对应的读数指令,并且可以将读取的数据进行实时绘制显示,数据读取完成后,可以根据不同记录仪的不同编帧结构,使用自定义的数据分离规则对整体数据包进行分离,大大提高了后续数据分析的效率及灵活性。

1 总体方案设计

系统硬件部分主要由电源模块、国产 FPGA 主控模块、多接口读数模块、FT600 上传模块、配置模块等组成。主要完成对不同型号弹载记录仪的数据回读与擦除。

软件部分由直接数据读取、发送自定义回读指令后立即读取、数据波形实时绘制、数据编帧结构设置、数据分离、数据擦除等功能组成,工作时主要通过 FT600 将对应的记录仪回读指令发送至硬件 FPGA 主控模块,然后主控模块通过对应的读数接口发送至记录仪,数据回读过程中,上位机实时绘制读取到的数据波形,并将读取的数据文件存至 PC 端指定位置,数据回读完成后,可以根据需求设置不同的数据分离规则,使用上位机对数据文件完成分离。之后根据需求完成数据擦除及数据分析处理等工作。系统总体设计框图如图 1 所示。

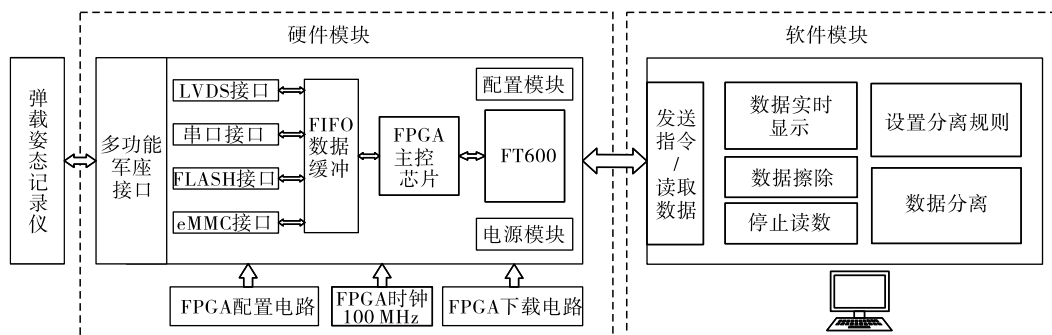


图1 系统总体设计框图

2 硬件设计

2.1 LVDS 接口模块

LVDS 接口模块采用 DS90LV049 芯片, DS90LV049 是双通道 CMOS 直通差分线路驱动器-接收器对。该芯片支持超过 400 Mbps 的数据速率。由于系统对 LVDS 传输线缆要求不超过 0.5 M,而且传输速度需求不高,因此对于传输过程中产生的噪声,选用由特性阻抗为 100 Ω 双绞线电缆组成数据传输线,为提高传输的抗干扰性,导线与两端电路共地,最后套上总屏蔽层,不仅可以有效抑制信号线之间产生的串扰,也对整个 LVDS 线路实现阻抗匹

配^[5-6]。该模块电路如图 2 所示。

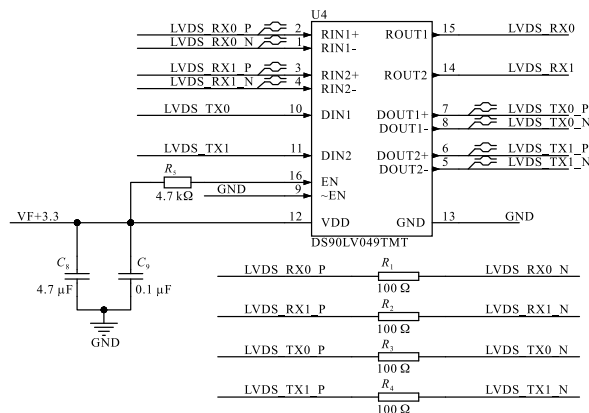


图2 LVDS 接口模块电路

2.2 串口模块

MAX3485 是用于 RS-485 与 RS-422 通信的 3.3 V 低功耗收发器,每个器件中都具有一个驱动器和一个接收器。可以实现最高 10 Mbps 的传输速率。由于 MAX3485 是半双工通信,所以在每次发送完回读指令后需要 FPGA 控制其模式转换,即由发送模式转换为接收模式。该模块电路如图 3 所示。

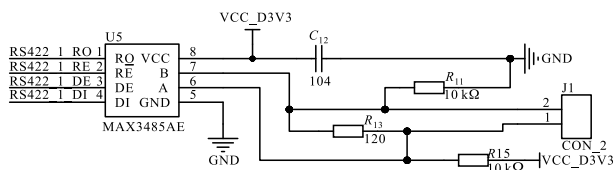


图 3 串口接口模块电路

2.3 备用读数接口模块

炮弹的发射过程是一种短时、高能、强冲击的复杂过程,其间弹体内各种零部件的弹性形变和刚体的运动结合在一起,存在着复杂的接触碰撞关系^[7]。所以某些型号记录仪经过靶场实验后,会由

于冲击过大而出现部分损坏,这个损坏是指正常的读数接口受到一定程度破坏,但是存储芯片的数据没有损坏,所以部分记录仪会使用 FPC/FFC 连接器作为直接读取 FLASH 或者 eMMC 芯片数据的备用读数接口。FPC 连接器(Flexible Printed Circuit Connector)是一种柔性印制电路板连接器,通常由导电的金属箔、绝缘基材和接插件组成,并且具有极高的弯曲性,以适应弯曲印制电路板的形状。用于连接两个或多个柔性印制电路板或将柔性印制电路板连接到硬质电路板上。FPC 连接器如图 4 所示。该模块电路如图 5 所示。

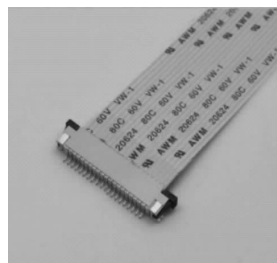


图 4 FPC 扁平软排线插座连接器

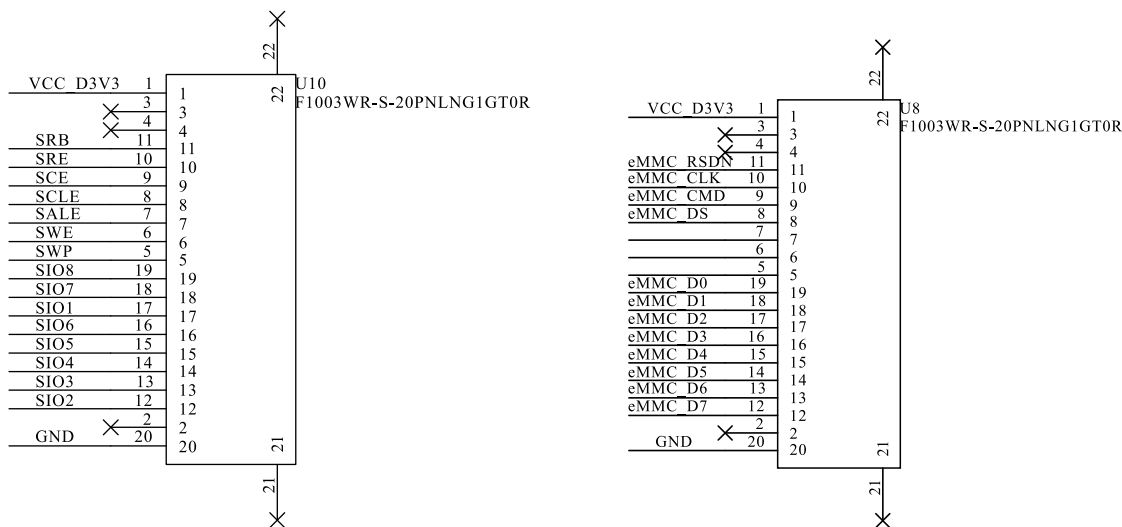


图 5 备用读数接口模块电路图

2.4 FT600 模块

为了实现与上位机的通信,选择了 FTDI 公司的 FT600Q 芯片。FT600Q 芯片作为 USB3.0 与 FIFO 的桥接芯片,其兼容 USB2.0 接口,并且内置 16 KB 的 FIFO 数据缓存 RAM,同时支持多通道 FIFO 总线协议和 245 同步 FIFO 总线协议两种并行 FIFO 总线协议。FT600Q 芯片具有 16 位并行 FIFO 总线接口,总

线时钟频率可以配置为 66 MHz 或 100 MHz 两种 FIFO 总线模式,其中 CLK 是输出到 FIFO 总线的时钟^[8]。同时,它还支持控制传输、块传输和中断传输等多种传输模式。使用 FT600Q 芯片不仅可以满足当前系统在数据回读时的速度需求,还能够满足未来进一步提高传输速度的需求。该部分电路图如图 6 所示。

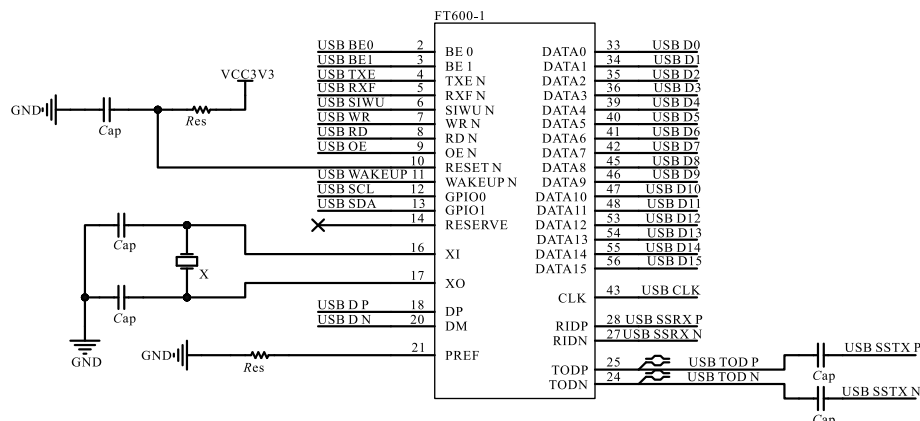


图 6 FT600Q 模块电路图

3 软件设计

对于读数盒的主控芯片,该系统选用国产安路科技的 EG4 系列 FPGA。EG4 系列 FPGA 具有低功耗、低成本、高性能等特点,不仅有丰富的 LUT、DSP、BRAM、高速差分 IO 等资源,还有强大的引脚兼容替换性^[9]。在设计过程中,使用 Verilog 语言进行开发,并采用安路科技自主开发的 FPGA 集成开发环境 TangDynasty (TD)。

对于上位机部分,基于 QT 开发框架,QT 具有丰富的 API 接口、稳定性好、速度快、易移植。此外,QT 还可以进行跨平台的开发,特有的信号槽机制在对象进行通信时还可以降低内存泄漏的风险^[10]。更重要的是,QT 提供了一组高级的多线程类和函数,使多线程编程更加简单和方便。考虑到程序会同时执行多个任务,所以将读数、数据绘制、数据解析分离等功能分别放在不同的子线程中执行,保证主界面的响应性^[11-12]。特别是针对大文件的数据解析分离,将采用多个线程并行处理,显著提升了数据分离的效率。因此,QT 开发环境完全满足本系统的开发需求,整个系统的软件部分工作流程如图 7 所示。

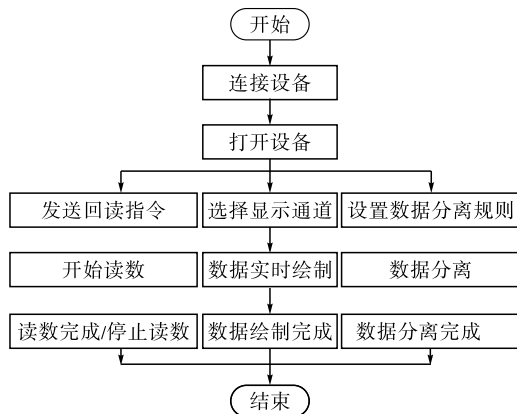


图 7 软件部分工作流程图

3.1 数据读取

不同型号的记录仪使用不同的通信协议,因此根据不同的回读命令,需要在上位机的命令编辑输入框中输入相应的回读命令字。例如,某型号记录仪的通信协议中使用 16 进制命令字:

回读指令:

7E&03&00&00&01&00&1B&73&73&F0&00&00

擦除指令:

7E&03&00&00&01&00&17&75&75&FF&00&00

复位指令:

7E&03&00&00&01&00&13&76&76&F0&55&00

在读取数据前,首先需要勾选读数前发送指令选项。然后,上位机通过 USB 将指令发送至 FT600 同步 FIFO。接着,读数盒的 FPGA 会读取指令,并通过相应的读取方式将指令发送至弹载记录仪。一旦记录仪确认指令正确无误,它将上传数据至读数盒的 FPGA。最后,数据通过 FT600 传输回上位机。在上位机端,使用 FTDI 官方提供的 D3XX 库进行连接并配置设备等一系列初始化操作后,可以读取芯片缓冲区的数据,并将其存储为 .dat 格式的二进制文件^[13]。读数界面的示意图如图 8 所示,数据读取的流程框图如图 9 所示。



图 8 读数界面

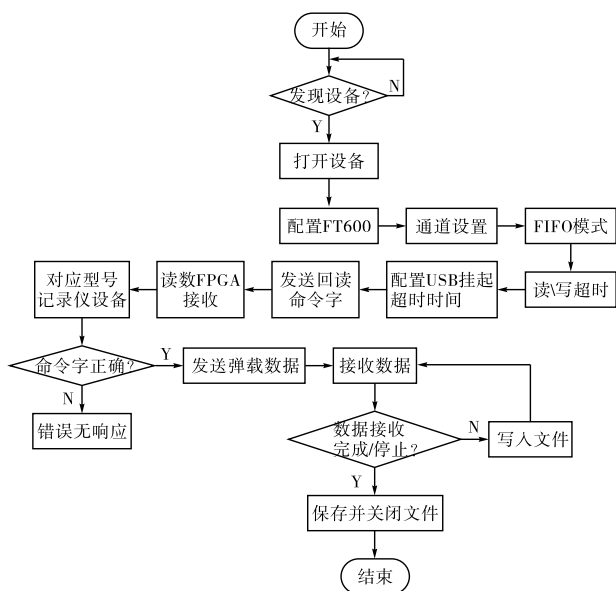


图9 数据读取流程框图

3.2 数据显示

弹载记录仪通常使用多个通道同时采集不同传感器的数据。而且在靶场实验中,弹载离线式采集系统通常会记录发射前和落地后静止一段时间的数据,导致存储的数据量较大。因此,需要开发一种高性能的图形绘制解决方案,能够处理大数据量并保持流畅和准确。QCustomPlot 是一个基于 Qt C++ 的小部件,专门用于绘图和数据可视化。它不依赖其他库,并且被广泛使用。该绘图库注重创建美观且出版质量高的 2D 图形和图表,并提供高性能的实时可视化功能。此外,它还支持导出为各种格式图像,如矢量化的 PDF 文件和光栅化图像(如 PNG、JPG 和 BMP)。相比于 Qt 官方自带的绘图控件 QChart, QCustomPlot 在绘制波形或图表方面具有更高的性能,尤其在处理大数据量和高实时性要求的场景下,非常适合该系统对数据绘制的需求。

在绘图界面中,首先需要设置数据源,因为弹载记录仪存储的数据都是经过编帧处理的,包含多种数据,因此需要明确指示上位机应该筛选哪些数据并进行绘制。在进行数据绘制时,可以通过改变曲线、背景和坐标轴的颜色来更好地适应不同的环境。此外,还支持自适应量程显示,可以根据数据的范围自动调整坐标轴的刻度。可以选择显示全部波形,或者启用子网格显示以提供更详细的细节。此外,还具备截图功能,可以随时暂停波形并保存成所需的图像格式。更重要的是,历史数据文件仍然可以重新查看波形,这极大地提高了后续数据分析处理的效率。上位机绘图界面如图 10 所示。

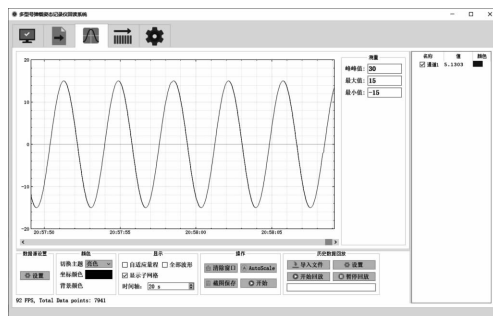


图10 绘图界面

3.3 数据分离

编帧是数据采集系统中一项关键技术,通过将采集到的数据组织成固定大小的数据包或帧,为数据传输和处理提供一系列优势。首先,编帧有助于数据的分割和同步。通过将连续的数据流划分为离散的帧,并使用特定的起始和结束标识符,接收端能够准确地识别每个数据包的起止位置,实现数据的正确解析和同步。其次,编帧提供了数据完整性和校验的机制。通过在帧中添加校验位或校验码,可以验证数据的完整性和准确性。接收端可以利用这些校验信息来检测和纠正可能发生的错误或数据损坏,保证数据的可靠性。此外,编帧还支持多路复用和多种数据类型处理。通过将不同类型的数据组织在同一个数据流中,并通过标识符进行区分,实现了多个信号通过同一通信通道进行传输和处理的能力,提高了数据传输的效率和灵活性。最后,编帧确保了协议的兼容性和一致性。根据特定的通信协议进行编帧设计,确保数据的传输和解析符合规定的标准,促进了不同系统之间的互操作性,简化了数据交换的过程。

弹载记录仪通常使用多个通道同时采集不同传感器的数据,为了更好地识别每路数据,在传输数据前对其编帧处理,编帧完成后通过数据发送模块发出^[14]。然而,不同型号的弹载记录仪采用了各自独特的编帧方式,这给数据解析和分离带来了挑战。在同一个上位机系统中,为了对不同编帧方式的记录仪数据进行解析,需要为每种不同的编帧方式编写相应的底层代码。

这种情况下,系统的复用性和灵活性受到了明显的影响。由于每个记录仪都要求独立的编码和解码逻辑,系统的代码复杂度增加,维护和扩展变得更加困难。此外,针对不同记录仪编写底层代码也增加了开发时间和成本。

为解决这一问题,可以考虑采用通用的数据编帧标准,使不同型号的记录仪都采用相同的编帧方

2:每帧中,子帧头+帧计数+有效数据(32字节)依次连续循环5次。

| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | a | b | c | d | e | f | |
|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----------------|
| 0 | 1A | CF | FC | 1D | 00 | 03 | 10 | 00 | 01 | 01 | 02 | 00 | 80 | 00 | 00 | 0C | 01 C8 00 |
| 1 | 1A | CF | FC | 1D | 00 | 02 | 00 | 10 | 00 | 01 | 01 | 02 | 00 | 80 | 00 | 00 | 24 01 C0 00 |
| 2 | 1A | CF | FC | 1D | 00 | 03 | 00 | 10 | 00 | 81 | 01 | 02 | 00 | C2 | 00 | 80 | 24 01 C8 00 |
| 3 | 1A | CF | FC | 1D | 00 | 04 | 00 | 10 | 00 | 41 | 01 | 48 | 00 | 90 | 00 | 00 | 05 01 C8 00 |
| 4 | 1A | CF | FC | 1D | 00 | 05 | 00 | 10 | 00 | 03 | 01 | 4A | 00 | 50 | 01 | 40 | 04 01 C8 00 |
| 5 | 1A | CF | FC | 1D | 00 | 06 | 00 | 10 | 00 | 02 | 01 | 0A | 00 | C0 | 00 | 80 | 2C 01 C8 00 |
| 6 | 1A | CF | FC | 1D | 00 | 07 | 00 | 10 | 01 | 42 | 01 | 0A | 00 | D4 | 01 | 40 | 24 01 C0 00 |
| 7 | 1A | CF | FC | 1D | 00 | 08 | 00 | 10 | 01 | 02 | 01 | 0C | 00 | C4 | 01 | 40 | 01 01 C8 00 |
| 8 | 1A | CF | FC | 1D | 00 | 09 | 00 | 10 | 01 | 00 | 01 | 40 | 00 | C1 | 00 | 40 | 24 01 C8 00 |
| 9 | 1A | CF | FC | 1D | 00 | 0A | 00 | 10 | 00 | C2 | 01 | 42 | 00 | 90 | 01 | C0 | 00 2C 01 C8 00 |
| 10 | 1A | CF | FC | 1D | 00 | 0B | 00 | 10 | 01 | 00 | 01 | 42 | 00 | 90 | 01 | C0 | 00 21 01 C8 00 |
| 11 | 1A | CF | FC | 1D | 00 | 0C | 00 | 10 | 01 | 00 | 01 | 40 | 00 | 90 | 00 | 80 | 20 01 C8 00 |
| 12 | 1A | CF | FC | 1D | 00 | 0D | 00 | 10 | 00 | 80 | 01 | 88 | 00 | 50 | 01 | 42 | 20 01 C8 00 |
| 13 | 1A | CF | FC | 1D | 00 | 0E | 00 | 10 | 01 | 02 | 01 | 42 | 00 | 80 | 00 | C1 | 00 01 C8 00 |
| 14 | 1A | CF | FC | 1D | 00 | 0F | 00 | 10 | 00 | 00 | 01 | 41 | 00 | 80 | 00 | 00 | 0D 01 C8 00 |

图 12 记录仪 A 回读数据部分图

| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | a | b | c | d | e | f | |
|----------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| 00000000 | 1A | CF | FC | 1D | 00 | 01 | 00 | 10 | 00 | 01 | 04 | 00 | 80 | 00 | 00 | 00 | 00 |
| 00000010 | 00 | 0C | 01 | C8 | 00 | 42 | 00 | 40 | 00 | 00 | 00 | 0C | 01 | 00 | 00 | 01 | 00 |
| 00000020 | 01 | C0 | 01 | D0 | 01 | CC | 01 | D1 | 00 | 40 | 01 | 01 | 00 | 80 | 00 | 01 | 00 |
| 00000030 | 00 | 08 | 01 | C8 | 00 | 40 | 00 | 40 | 01 | 00 | 00 | 00 | 01 | 00 | 10 | 10 | 00 |
| 00000040 | 01 | D0 | 01 | D0 | 01 | CC | 01 | D2 | 00 | 01 | 08 | 00 | C0 | 00 | 00 | 00 | 00 |
| 00000050 | 00 | 08 | 01 | C8 | 00 | 40 | 00 | 40 | 01 | 00 | 00 | 00 | 01 | 10 | 00 | 00 | 00 |
| 00000060 | 01 | D0 | 01 | D0 | 01 | CC | 01 | D0 | 01 | 10 | 01 | 02 | 00 | C0 | 00 | 00 | 00 |
| 00000070 | 01 | D0 | 01 | D0 | 01 | CC | 01 | D0 | 01 | 10 | 01 | 02 | 00 | C0 | 00 | 00 | 00 |
| 00000080 | 01 | D0 | 01 | D0 | 01 | CC | 01 | D0 | 01 | 10 | 01 | 02 | 00 | C0 | 00 | 00 | 00 |
| 00000090 | 00 | 08 | 01 | C1 | 00 | 42 | 00 | 40 | 01 | 00 | 00 | 01 | 10 | 00 | 84 | 00 | 00 |
| 00000100 | 01 | D0 | 01 | D0 | 01 | CC | 01 | D0 | 00 | 00 | 01 | 08 | 00 | 40 | 00 | 02 | 00 |
| 00000110 | 00 | 08 | 01 | C8 | 00 | 40 | 00 | 40 | 00 | 00 | 00 | 01 | 02 | 00 | 00 | 00 | 00 |
| 00000120 | 01 | C0 | 01 | D0 | 01 | CC | 01 | D0 | 00 | 00 | 01 | 08 | 00 | 40 | 00 | 00 | 00 |
| 00000130 | 00 | 08 | 01 | C8 | 00 | 40 | 00 | 40 | 00 | 00 | 00 | 01 | 08 | 00 | 40 | 00 | 00 |
| 00000140 | 01 | D0 | 01 | D0 | 01 | CC | 01 | D0 | 00 | 00 | 00 | 01 | 08 | 00 | 40 | 00 | 00 |
| 00000150 | 00 | 08 | 01 | C8 | 00 | 40 | 00 | 40 | 00 | 00 | 00 | 01 | 08 | 00 | 40 | 00 | 00 |
| 00000160 | 01 | D0 | 01 | D0 | 01 | CC | 01 | D0 | 00 | 00 | 00 | 01 | 08 | 00 | 40 | 00 | 00 |
| 00000170 | 00 | 08 | 01 | C8 | 00 | 40 | 00 | 44 | 01 | 02 | 00 | 00 | 01 | 80 | 00 | 00 | 00 |
| 00000180 | 01 | D0 | 01 | D0 | 01 | CC | 01 | D0 | 00 | 00 | 00 | 01 | 08 | 00 | 40 | 00 | 00 |
| 00000190 | 00 | 08 | 01 | C8 | 00 | 40 | 00 | 40 | 00 | 00 | 00 | 01 | 08 | 00 | 40 | 00 | 00 |
| 00000200 | 01 | C0 | 01 | D3 | 01 | CC | 01 | D0 | 00 | 00 | 01 | 48 | 00 | 14 | 00 | 00 | 00 |
| 00000210 | 00 | 08 | 01 | C8 | 00 | 40 | 00 | 40 | 01 | 00 | 00 | 01 | 80 | 00 | 00 | 00 | 00 |
| 00000220 | 01 | C0 | 01 | D3 | 01 | CC | 01 | D0 | 00 | 00 | 01 | 48 | 00 | 14 | 00 | 00 | 00 |
| 00000230 | 00 | 08 | 01 | C8 | 00 | 40 | 00 | 40 | 00 | 00 | 00 | 01 | 80 | 00 | 00 | 00 | 00 |
| 00000240 | 01 | D0 | 01 | D0 | 01 | CC | 01 | D0 | 00 | 00 | 01 | 4A | 00 | 81 | 00 | 00 | 00 |
| 00000250 | 00 | 08 | 01 | C8 | 00 | 40 | 00 | 40 | 00 | 00 | 00 | 01 | 80 | 00 | 00 | 00 | 00 |
| 00000260 | 01 | D0 | 01 | D0 | 01 | CC | 01 | D0 | 00 | 00 | 01 | 48 | 00 | 80 | 00 | 00 | 00 |
| 00000270 | 00 | 08 | 01 | C8 | 00 | 40 | 00 | 40 | 00 | 00 | 00 | 01 | 80 | 00 | 00 | 00 | 00 |
| 00000280 | 01 | C0 | 01 | D3 | 01 | CC | 01 | D0 | 00 | 00 | 01 | 48 | 00 | 14 | 00 | 00 | 00 |
| 00000290 | 00 | 08 | 01 | C8 | 00 | 40 | 00 | 40 | 00 | 00 | 00 | 01 | 80 | 00 | 00 | 00 | 00 |
| 000002a0 | 01 | D0 | 01 | D0 | 01 | CC | 01 | D0 | 00 | 00 | 01 | 42 | 00 | 80 | 00 | 00 | 00 |

图 14 记录仪 A 数据对比图

| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | a | b | c | d | e | f | |
|----------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| 00000000 | F1 | AA | E1 | EB | EB | 00 | 00 | 00 | 7F | 00 | 70 | 00 | 70 | 00 | 72 | 00 | 00 |
| 00000010 | 82 | 08 | 85 | 08 | 7C | 00 | 7C | FF | FF | FF | FF | FF | FF | FF | FF | FF | FF |
| 00000020 | FF | FF | FF | FF | FF | FF | FF | FF | FF | FF | FF | FF | FF | FF | FF | FF | FF |
| 00000030 | 20 | 04 | 1F | 04 | 32 | 04 | 35 | 04 | 28 | 04 | 2A | FF | FF | FF | FF | FF | FF |
| 00000040 | FF | FF | FF | FF | FF | FF | FF | FF | FF | FF | FF | FF | FF | FF | FF | FF | FF |
| 00000050 | 58 | 00 | 57 | 00 | 00 | 00 | 8A | 00 | 79 | 00 | 79 | 00 | 00 | 00 | 5A | FF | FF |
| 00000060 | FF | FF | FF | FF | FF | FF | FF | FF | FF | FF | FF | FF | FF | FF | FF | FF | FF |
| 00000070 | EB | 00 | 83 | 00 | 53 | 00 | 53 | 00 | 0A | 00 | 89 | 00 | 76 | 00 | 75 | FF | FF |
| 00000080 | FF | 00 | 52 | FF | FF | FF | FF | FF | FF | FF | FF | FF | FF | FF | FF | FF | FF |
| 00000090 | FF | FF | FF | FF | FF | FF | FF | FF | FF | FF | FF | FF | FF | FF | FF | FF | FF |
| 00000100 | 77 | 00 | 76 | 00 | 00 | 51 | FF | FF | FF | FF | FF | FF | FF | FF | FF | FF | FF |
| 00000110 | FF | FF | FF | FF | FF | FF | FF | FF | FF | FF | FF | FF | FF | FF | FF | FF | FF |
| 00000120 | 00 | 53 | 00 | 00 | 8A | 00 | 78 | 00 | 76 | FF | FF | FF | FF | FF | FF | FF | FF |
| 00000130 | 00 | 53 | 00 | 00 | 8A | 00 | 78 | 00 | 76 | FF | FF | FF | FF | FF | FF | FF | FF |
| 00000140 | FF | FF | FF | FF | FF | FF | FF | FF | FF | FF | FF | FF | FF | FF | FF | FF | FF |
| 00000150 | 00 | 50 | FF | FF | FF | FF | FF | FF | FF | FF | FF | FF | FF | FF | FF | FF | FF |
| 00000160 | FF | FF | FF | FF | FF | FF | FF | FF | FF | FF | FF | FF | FF | FF | FF | FF | FF |
| 00000170 | 00 | 74 | 00 | 00 | 4F | FF | FF | FF | FF | FF | FF | FF | FF | FF | FF | FF | FF |
| 00000180 | 00 | 89 | 00 | 75 | 00 | 75 | 00 | 00 | 50 | FF | FF | FF | FF | FF | FF | FF | FF |
| 00000190 | FF | FF | FF | FF | FF | FF | FF | FF | FF | FF | FF | FF | FF | FF | FF | FF | FF |
| 00000200 | FF | FF | FF | FF | FF | FF | FF | FF | FF | FF | FF | FF | FF | FF | FF | FF | FF |
| 00000210 | 72 | FF | FE | 00 | 4F | FF | FF | FF | FF | FF | FF | FF | FF | FF | FF | FF | FF |
| 00000220 | FF | FF | FF | FF | FF | FF | FF | FF | FF | FF | FF | FF | FF | FF | FF | FF | FF |
| 00000230 | 00 | 00 | 00 | 00 | 00 | 00 | 00 | 00 | 00 | 00 | 00 | 00 | 00 | 00 | 00 | 00 | 00 |
| 00000240 | FF | FF | FF | FF | FF | FF | FF | FF | FF | FF | FF | FF | FF | FF | FF | FF | FF |
| 00000250 | 00 | 00 | 00 | 00 | 00 | 00 | 00 | 00 | 00 | 00 | 00 | 00 | 00 | 00 | 00 | 00 | 00 |
| 00000260 | FF | FF | FF | FF | FF | FF | FF | FF | FF | FF | FF | FF | FF | FF | FF | FF | FF |
| 00000270 | EB | 00 | 11 | 00 | 4F | 00 | 4C | 00 | 00 | 00 | 8A | 00 | 71 | 00 | 72 | FF | FF |
| 00000280 | FF | FF | 00 | 4E | FF | FF | FF | FF | FF | FF | FF | FF | FF | FF | FF | FF | FF |

图 15 记录仪 B 数据对比图

数据分离过程中,针对不同大小的文件自适应增加线程数量进行分离并作对比,如表 4 所示。可

| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | a | b | c | d | e | f | |
|----------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|------|
| 00000000 | 1A | CF | FC | 1D | 00 | 01 | 00 | 10 | 00 | 01 | 04 | 00 | 80 | 00 | 00 | 00 | 00 |
| 00000010 | 00 | 0C | 01 | C8 | 00 | 42 | 00 | 40 | 00 | 00 | 00 | 0C | 01 | 00 | 00 | 01 | 00 |
| 00000020 | 01 | C0 | 01 | D0 | 01 | CC | 01 | D1 | 00 | 40 | 01 | 01 | 00 | 80 | 00 | 01 | 00 |
| 00000030 | 00 | 08 | 01 | C8 | 00 | 40 | 00 | 40 | 01 | 00 | 00 | 00 | 01 | 10 | 00 | 00 | 00 |
| 00000040 | 01 | D0 | 01 | D0 | 01 | CC | 01 | D2 | 00 | 01 | 08 | 00 | C0 | 00 | 00 | 00 | 00 |
| 00000050 | 00 | 08 | 01 | C8 | 00 | 40 | 00 | 40 | 01 | 00 | 00 | 00 | 01 | 10 | 00 | 00 | 00 |
| 00000060 | 01 | D0 | 01 | D0 | 01 | CC | 01 | D0 | 01 | 10 | 01 | 02 | 00 | C0 | 00 | 00 | 00 |
| 00000070 | 00 | 08 | 01 | C8 | 00 | 40 | 00 | 40 | 01 | 01 | 00 | 00 | 01 | 10 | 00 | 01 | 00 |
| 00000080 | 01 | D0 | 01 | D0 | 01 | CC | 01 | D0 | 00 | 00 | 00 | 01 | 08 | 00 | C0 | 00 | 00 |
| 00000090 | 00 | 08 | 01 | C8 | 00 | 40 | 00 | 40 | 01 | 00 | 00 | 00 | 01 | 10 | 00 | 00 | 00 |
| 00000100 | 01 | D0 | 01 | D0 | 01 | CC | 01 | D0 | 00 | 00 | 00 | 01 | 08 | 00 | 40 | 00 | 00 |
| 00000110 | 00 | 08 | 01 | C8 | 00 | 40 | 00 | 40 | 01 | 00 | 00 | 00 | 01 | 10 | 00 | 00 | 00</ |

puter Vision,2013, 105(1):63-86.

[15] 王鹏,朱睿哲,孙长库. 基于改进的 RANSAC 的场景分类点云粗匹配算法[J]. 激光与光电子学进展, 2020,57(04):312-320.

[16] SALTI S,TOMBARI F,STEFANOL D. SHOT: Uniquesignatures of histograms for surface and texture description[J]. Computer Vision & Image Understanding, 2014, 125(8):251-264.

[17] WU L S,WANG G L,HU Y. Iterative closest point registration for fast point feature histogram features of a volumed-ensity optimization algorithm[J]. Measurement and on-trol-London-Institute of Measurement and Control,2020,53(1-2):29-39.

[18] HELLER J, HENRION D, PAJDLA T. Hand-Eye and Robot-World Calibration by Global Polynomial Optimization[J]. 2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation(ICRA), Hong Kong, 2014:3157-3164.

[19] 周晏,韩毅,王旭彬,等. 基于双目视觉的机器人抓取系统[J]. 河南科技,2020,39(35):4-7.

[20] 温维亮,郭新宇,杨涛,等. 玉米果穗点云分割方法研究[J]. 系统仿真学报,2017,29(12):3030-3034+3041.

[21] 熊风光,霍旺,韩燮,等. 三维点云中关键点误匹配剔除方法[J]. 光学学报,2018,38(02):128-138.

(上接第 9 页)

表 4 多线程分离时间

| 文件大小/MB | 单线程 | | 自适应线程 | |
|---------|------|--------------|-------|--------------|
| | 线程数量 | 用时/s | 线程数量 | 用时/s |
| 100 | 1 | 183 | 1 | 183 |
| 500 | 1 | 915 | 3 | 314 |
| 1000 | 1 | 1833 | 4 | 466 |
| 2000 | 1 | 3672(≈1.0 h) | 5 | 749(≈0.2 h) |
| 5000 | 1 | 9166(≈2.5 h) | 5 | 1842(≈0.5 h) |

5 结论

该文针对不同型号弹载姿态记录仪在数据上传方式,编帧结构,回读指令等方面要求不同而设计的一种回读系统,不仅读数接口多样,还可以实现自定义回读指令,数据实时绘制,自定义数据分离规则等功能,最大程度上适应了多种型号弹载记录仪的回读需求,硬件上结合国产 FPGA,通过较低的成本和功耗实现较高的功能性,整体系统具有较强的通用性和实用性,有较高的工程应用价值。

参考文献:

[1] 刘俊,石云波,李杰. 微惯性技术[M]. 北京:电子工业出版社,2005.

[2] 郝晓明,李杰,胡陈君,等. 基于 FPGA 的弹载数据回读系统设计[J]. 传感技术学报,2015,28(07):1023-1027.

[3] 赵阳刚,郭涛,黄玉岗. 基于 FPGA 和 LVDS 的弹载数据回读系统设计[J]. 电子器件,2017,40(01):113-117.

[4] 薛栋,李杰,张德彪,等. 基于 LVDS 的高速数据回读系统设计[J]. 中北大学学报(自然科学版),2021,42(02):135-139.

[5] 张波,李杰,张海鹏,等. 基于 FPGA 的 LVDS 传输链路的可靠性设计[J]. 电子器件,2018,41(05):1237-1241.

[6] 李锦明,郑志旺. 基于 LVDS 和 USB3.0 的高速数据传

输接口的设计[J]. 电子测量技术,2021,44(07):1-6.

[7] 崔文涛,李杰,张德彪,等. 高过载高精度数据记录仪的设计与实现[J]. 中北大学学报(自然科学版),2021,42(06):558-563.

[8] 梁欣宇. 高动态图像传感器数据获取[D]. 大连:大连理工大学,2021.

[9] 周方浩. 基于国产 FPGA 的分布式数据采集传输子系统的设计[D]. 杭州:浙江大学,2022.

[10] 王万富,王琢,刘佳鑫,等. 基于 Qt/Embedded 的农林智能装备导航定位算法研究及软件设计[J]. 国外电子测量技术,2022,41(03):63-68.

[11] 薛登峰. 基于多线程技术的综合指显系统的设计与实现[D]. 西安:西安电子科技大学,2018.

[12] 向明尚,张志华,潘丽艳. 基于 Qt 的多线程嵌入式系统设计与实现[J]. 科技与创新,2017, No. 76(04):11-13.

[13] Future Technology Devices International Ltd. AN_379 D3xx ProgrammersGuide[EB/OL]. (2017-06-07)[2023-07-8].

[14] 张嘉璐,段俊萍,王淑琴. 基于 FIFO 缓存的数据混合编帧技术研究及实现[J]. 电子测量技术,2020,43(18):125-130.

[15] 陈航宇. 正则表达式匹配算法研究[D]. 燕山:燕山大学,2016.