

基于模块化架构的机载辅助总线实验系统设计

江志东, 张 弟, 刘晓阳, 周琪栋

(海军航空大学青岛校区, 山东 青岛 266041)

摘要: 针对机载辅助总线通信原理及电气特性的教学需求, 设计并实现了基于模块化架构的机载辅助总线实验系统; 该系统采用核心处理板与总线接口底板的分层硬件架构, 支持 ARINC429、RS-422、RS-485、RS-232 和 CAN 等多种总线协议; 核心板以 STM32 微控制器为核心, 实现多总线通信控制、触摸屏人机交互、传感器时序驱动及数据解算等功能模块; 总线接口底板配置总线协议芯片、电平转换电路、通用 I/O 扩展接口及测试接口端子, 便于进行总线信号电气特性测试及接口扩展开发; 软件采用分层设计, 分别实现协议解析、功能管理和硬件资源管理, 支持基础验证型、综合设计型和开放创新型等多层次实验项目, 满足不同专业背景和基础水平的学生需求; 应用表明: 该实验系统具有可测试性好、成本低且直观等优点, 可为学生提供开放的硬件平台和标准化软件接口, 有效提升实践教学效果, 增强学生的工程实践能力。

关键词: 机载总线; 模块化架构; 实验系统; STM32 微控制器; 软件分层

Design of Experimental System for Airborne Auxiliary Bus Based on Modular Architecture

JIANG Zhidong, ZHANG Di, LIU Xiaoyang, ZHOU Qidong

(Qingdao Branch, Navy Aviation University, Qingdao 266041, China)

Abstract: Aiming at the teaching requirements of bus communication principles and electrical characteristics of airborne auxiliary devices, an airborne auxiliary bus experimental system based on a modular architecture is designed and implemented. The system adopts a hierarchical hardware architecture that combines a core processing board with a bus interface backplane, which supports multiple bus protocols such as ARINC429, RS-422, RS-485, RS-232 and CAN. The core processing board, with an STM32 microcontroller as the core, integrates functional modules such as multi-bus communication control, touch screen human-machine interaction, sensor timing drive, and data computation. The bus interface baseboard is configured with bus protocol chips, level conversion circuits, general-purpose I/O expansion interfaces, and test interface terminals, which is convenient to test the electrical characteristics of bus signals and develop the expansion of interfaces. The software adopts a hierarchical design to achieve protocol analysis, function management, and hardware resource management respectively, and supports multi-level experimental projects such as basic verification type, comprehensive design type, and open innovation type to meet the needs of students with different professional backgrounds and basic levels. Applications show that the experimental system has the advantages of good testability, low cost, and intuitiveness, which can provide an open hardware platform and standardized software interfaces for students, effectively improving practical teaching effects and enhancing the engineering practical ability of students.

Keywords: airborne bus; modular architecture; experimental system; STM32 microcontroller; software layering

0 引言

在现代飞机航空电子系统中, 机载总线网络作为“神经网络”承担着连接各个航电子系统或功能模块, 进而实现其信息融合和功能综合的重要任务^[1-2]。机载

总线标准涉及拓扑结构、功能特性、电气规范、时序特性、数字编码和传输控制等多个方面, 其通信过程抽象、内容枯燥, 其教学需要理论结合实践。此外, 学生的专业背景和知识基础差异较大, 现有实践教学条件不足以支撑总线原理教学的问题日渐突出。在三代机的航

收稿日期: 2025-04-25; 修回日期: 2025-06-04。

基金项目: 海军航空大学青岛校区自主立项基金。

作者简介: 江志东(1985-), 男, 博士, 讲师。

引用格式: 江志东, 张 弟, 刘晓阳, 等. 基于模块化架构的机载辅助总线实验系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2026, 34(4): 42-48.

电系统架构中, 子系统之间通过 GJB289A 总线 (对应 MIL-STD-1553B) 实现全局互连, 子系统内部和部分子系统之间采用 ARINC429 总线、RS 系列总线和 CAN 总线等作为辅助总线, 实现局部互连。GJB289A 总线作为主干网络应用广泛, 配套的实验系统较为成熟^[3-7]。随着装备服役年限的增加, 子系统内部各类辅助总线故障不断增多^[8-12], 但辅助总线配套的实验系统显著不足。

目前, 面向总线技术相关的教学实验系统相对匮乏, 不满足仿真测试的需求^[13-16]。传统实验教学系统多基于商用总线接口卡 (如 PCI、PXI 或 USB 等接口) 构建, 典型架构如图 1 所示, 依托配套的演示软件配置接口卡进行通信实验或测试^[17-18]。然而, 此类系统存在如下诸多不足: 首先, 功能方面存在显著局限性。商用总线接口卡配套软件功能单一, 仅支持基本的通信演示 (如单节点单向传输), 缺乏多场景实验支持 (如多主竞争、故障注入及协议容错测试), 其人机交互界面通常未能直观呈现总线协议的关键特性 (如 ARINC429 数据字格式、CAN 总线仲裁机制), 无法支撑科目化教学设计; 其次, 可测试方面存在显著不足。接口板封装在 PC 机箱中, 不利于学生掌握总线信号全流程传输特性 (如电平转换)。拓扑结构固化, 难以动态构建典型拓扑结构下的总线通信系统, 制约学生对总线拓扑的全局理解; 此外, 缺乏真实数据激励源。测试数据往往由上位机软件随机设置, 缺乏物理意义, 无法模拟典型传感器的数据结构和传输特性。除上述技术缺陷外, 商用总线接口板购置成本高昂 (单卡价格在几千到数万元), 对场地和经费要求较高, 限制了系统的普及和规模化应用。

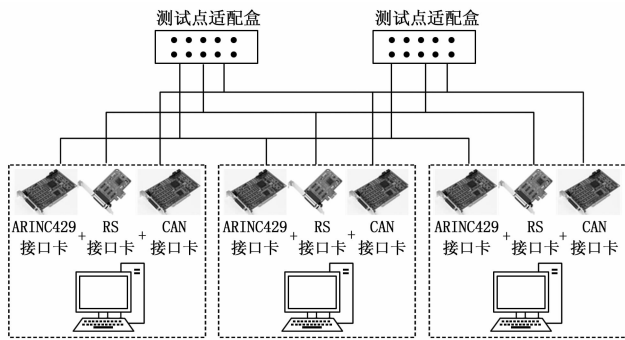


图 1 基于 PC 架构的总线实验系统

针对上述问题, 实验系统应满足以下需求。首先是功能方面, 系统应覆盖典型机载总线协议, 并提供包含基础型、综合型和开放型等多层次实验项目。系统应配备基于典型传感器的真实数据激励源, 确保实验数据具有物理意义。同时, 通过实物接口板展示电平转换、阻抗匹配等信号传输特性, 具备良好的测试性, 强化学生对电气原理的直观认识。其次是性能方面, 应达到“三化”目标, 即集成化、可测化和经济化。采用核心板+扩展板架构实现多协议集成, 设置总线信号全链路测量

接口, 选用商用级元器件降低硬件成本, 同时设计紧凑型结构减少场地占用。此外, 在扩展性方面, 硬件层面采用标准化接口设计, 支持协议芯片、处理器模块和传感器等功能模块即插即用和更换; 软件层面, 构建分层式架构, 支持二次开发, 满足高阶学习需求。

为满足机载辅助总线通信原理及电气特性的深度教研需求, 针对现有总线实验教学系统的不足, 本文开展了机载辅助总线实验系统需求分析和总体设计, 设计并实现了满足不同专业、不同基础学生开展多层次实践的总线实验系统。相较于传统实验系统, 本实验系统在“场景化实践—具象化认知—差异化培养”方面有显著优势。

1 系统设计及功能实现

1.1 系统设计

结合系统需求, 本节分别介绍硬件架构和软件架构设计。

1.1.1 硬件架构设计

鉴于现有总线实验系统存在集成度低、可测试性差、成本高且不直观等问题, 本系统采用核心主控板搭配总线接口底板的硬件架构形式。同时, 引入触摸显示屏强化人机交互体验, 并通过串行通信接口接入传感器, 将其作为外部数据激励源。系统总体设计如图 2 所示。其中, 主控板和触摸显示屏共同构成总线实验系统的控制和显示核心, 核心板完成总线协议解析及数据处理, 使得实验系统能够脱离 PC 机独立工作。主控板与传感器激励源之间可通过 I²C、SPI 等串行数据总线进行通信, 实时采集、处理相应数据, 并将其传输至多总线接口板。多总线接口板可根据实验需求, 灵活选择相应的总线接口进行数据收发操作。总线接口底板集成多总线协议芯片、电平转换电路, 且设计有多个测试点及测试接口, 便于学生掌握总线信号全流程传输的电气特性。

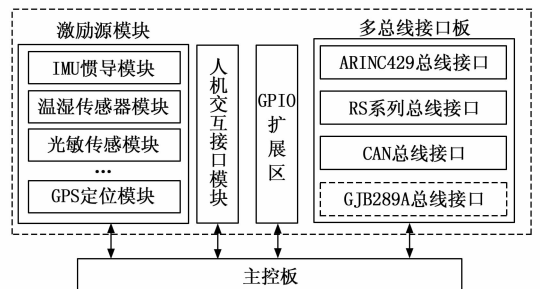


图 2 系统总体设计

为提升实验系统的扩展性, 满足不同拓扑结构下的数据传输需求, 设计了总线连接适配板。该适配板采用模块化接口设计, 通过可插拔式连接器与核心处理板、总线接口板实现物理连接, 并在 PCB 板上集成标准化信号转接模块, 可通过跳帽、DIP 灵活配置总线拓扑。

以 RS422 和 ARINC429 总线实验为例，在 1 发多收场景下，学生可通过适配板的星型拓扑接口，将 1 个数据发送端与 2~4 个接收端快速连接，直观观察主从模式下的数据分发特性；在多发多收场景中，利用适配板的总线型拓扑接口，可串联多个实验节点，模拟航电子系统间的分布式通信，通过调整终端电阻配置验证阻抗匹配对信号完整性的影响。基于总线连接适配板的 1 发 2 收的结构如图 3 所示。在预置通路上，可以模拟短路、开路、错接等典型电气故障。

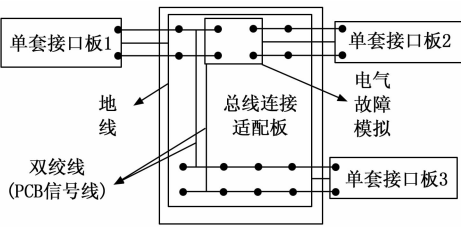


图 3 一发两收连接结构

1.1.2 软件架构设计

软件架构采用了分层设计模式，如图 4 所示，自上而下依次划分为应用协议层、功能控制层和硬件驱动层，各层功能如下：

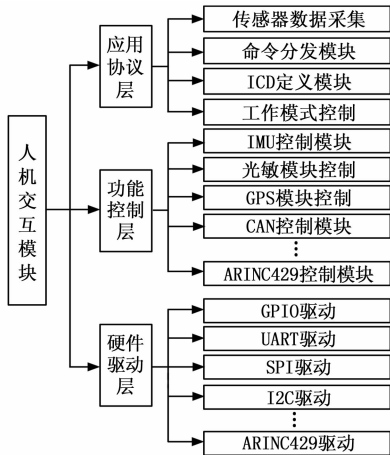


图 4 软件结构示意图

1) 应用协议层负责与上层应用程序进行交互，包括工作模式控制、传感器数据收发、控制命令分发、ICD定义结构体和显控交互接口等。该层提供了基础框架和接口，满足基础实验需求，可进一步拓展开发。

2) 功能控制层位于应用协议层之下，承担着协调和管理底层硬件操作的职责，包括设备的初始化、状态监控以及与其他子系统的通信管理等工作。该层涵盖了各种总线协议的实现细节，以 ARINC429 总线为例，该层实现字格式处理、时序控制和错误检测等功能。对于 CAN 总线，该层重点实现仲裁机制仿真、消息滤波配置及多主竞争处理，支持用户模拟总线负载变化场景；而在 RS 系列总线应用中，功能控制层则专注于波特率自适应调节、数据帧封装解封装及半双工通信逻辑管理。

3) 硬件驱动层是最贴近硬件的部分，它负责与具体的硬件设备进行交互。这一层的驱动程序必须能够处理硬件的物理特性和行为，如工作寄存器配置、中断处理、数据缓冲区管理、数据输入输出使能等。

4) 通过分层设计，分别实现功能管理、协议解析和硬件资源管理，有效减少应用和硬件之间的冗余交互，在保证基础实验功能的基础上，为开放性实验中修改代码验证相关功能提供便利。

1.2 系统功能设计

1.2.1 硬件功能及实现

秉持模块化与开放性为核心理念，本系统硬件功能划分为 3 个功能模块：主控模块、多总线接口模块以及数据激励源模块。硬件功能组成如图 5 所示。

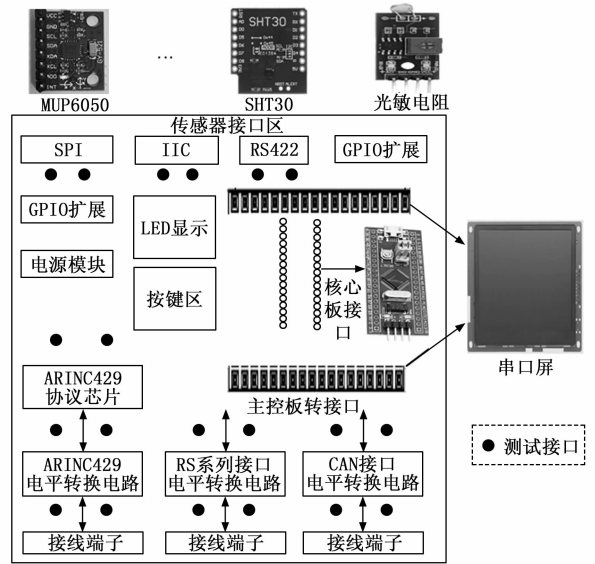


图 5 硬件功能组成框图

主控模块和总线接口底模块之间通过排针连接，主控模块具备整体可更换性。数据激励源模块通过预留接口和总线接口底模块连接，能够适配不同实验场景的硬件需求。在功能设计上，将主控板丰富的 I/O 接口引至底板。例如，通过 SPI 接口外扩 HKS1553BCRT 芯片，可拓展 GJB289A 总线接口；通过 I²C、SPI、RS422 等专用数字接口，可接入多种传感器，丰富数据激励源的种类和数量。拓展核心板的 GPIO 口，为接入多样化离散开关量提供硬件基础。同时，在底板上集成电源模块（可接入市电或者锂电池）、按键区及 LED 显示模块，构建基础操作与状态反馈单元，满足系统独立运行的控制需求。板载主要元器件选用 DIP 封装，便于芯片级更换，提升系统维护的便捷性。此外，总线接口底板在协议芯片和驱动电路之间预留有多处测试点和测试接口，便于学生掌握总线信号全流程传输的电气特性。

1) 主控模块：

主控模块选用商用的核心板，以 STM32F103ZET6

作为主控制器^[19-20]。该选型综合考量性能、成本、兼容性 & 教学适配性等多维度因素: 从性能指标来看, 其搭载 72 MHz 主频的 Cortex-M3 内核, 支持单周期乘法和硬件除法, 能够高效处理总线协议解析、数据编解码等计算任务; 512 中 kB Flash 和 64 kB SRAM 的存储配置, 可满足复杂协议栈部署及实验数据缓存需求。在成本控制方面, STM32 系列作为意法半导体成熟产品线, 单片成本仅为同类高性能控制器的 1/3~1/2, 显著降低硬件开发成本。在兼容性与扩展性上, 该芯片集成 3 个 12 位 ADC (21 通道)、2 个 12 位 DAC、5 个 USART、3 个 SPI 等丰富外设, 可无缝衔接 ARINC429、CAN、RS 系列等多种机载辅助总线协议芯片; USB 2.0 全速接口和 CAN2.0B 控制器便于与外部设备及总线网络互联, 5 V 工作电压与 70 mA 低功耗特性契合实验系统便携化设计需求。同时, 这些丰富的外设资源有利于教学实验系统的后续扩展。尤为突出的是 STM32 强大的生态支持, 意法半导体官方提供完整的 HAL 库与 LL 库开发框架, 配套丰富的用户手册、技术文档及视频教程; 同时, 开源社区中存在海量经实践验证的例程资源, 涵盖基础外设驱动、复杂协议栈移植等多场景应用。这些资源不仅大幅降低学生的开发入门门槛, 也为教师开展项目式教学、设计进阶实验案例提供了便利。

在人机交互设计方面, 选用基于串口的集成触摸显示屏模块, 该模型可与 STM32 核心板实现数据交互。触摸显示屏作为人机交互核心界面, 能够呈现实验参数设置、总线通信状态监测、数据可视化等功能界面。用户通过触摸操作完成实验项目选择、总线通信速率设置、传感器采样频率调整等参数配置, 同时显示屏实时反馈总线数据收发状态、传感器采集数据等信息, 形成直观便捷的交互体验。

2) 多总线接口模块:

多总线接口模块主要实现总线接口电路及对应的电平转换电路, 此外还涵盖传感器接口、与主控模块的接口以及对应的测试口。一方面, 集成 ARINC429 协议芯片、RS 系列接口及 CAN 接口, 并搭配对应的电平转换电路, 实现 TTL 电平与总线标准差分电平的转换, 确保信号传输的兼容性与稳定性; 另一方面, 在协议芯片与驱动电路间设置多处测试点及测试接口, 便于学生追踪总线信号全流程传输特性, 包括电平转换、信号驱动等关键电气特性分析。此外, 底板通过标准化接口与主控核心板互联, 支撑多总线协议数据的收发与处理。其中 ARINC429 总线协议芯片选用国产芯片 SMHK1016, 与 DEI1016、HS-3282 兼容, 该芯片可支持 ARINC429 航空总线协议的串行接收、发送, 支持 571、575、706 等航空通信规范, 具有两路接收和一路发送通道, 8 个字的发送缓冲, 支持循环自测试方式, 支持校验位以及接收

与发送字的生成, 采用单一正 5 V 供电。数据收发送时需要配合电平转换芯片 HKA32133, HKA32133 是 BD429 的国产替代芯片, 可以直连 ARINC429 总线接口, 具有数字可配置的上升和下降时间的特点。RS-422、RS-485、RS-232 和 CAN 等总线采用 STM32 自带接口, 外围配合 MAX488、SP3485、SP3232 等电平转换电路即可使用。

3) 数据激励模块:

数据激励模块以多样化传感器接入为核心, 实现开放式数据输入体系。通过传感器接口区集成的 SPI、I²C、RS422 及 GPIO 扩展接口, 实现对 MPU6050、SHT30、光敏电阻等不同类型传感器的兼容接入, 其中, SPI、IIC 接口适配高精度传感器数据传输, RS422 接口满足远距离信号输入需求, GPIO 扩展接口则为新型传感器接入预留硬件通道。例如 MPU6050 六轴陀螺仪传感器内部具有 3 轴陀螺仪和 3 轴加速度传感器, 与主控板之间通过 I²C 接口进行通信。MPU6050 自带数字处理器 (DMP) 可以自动将收集到的数据进行处理, 并存入 FIFO, 方便用户读取数据。主控 MCU 解算原始数据信息, 即可得到相应的姿态信息。

上述多种模块化的传感器可为实验系统提供具备物理意义的真实数据激励源。

1.2.2 软件功能及实现

软件设计方面, 为满足多层次、不同基础学生的教学需求, 遵循分层次和开放性架构的理念, 以保障系统的灵活性和扩展性。

1) 显控程序设计:

为提高人机功效, 采用 4.3 寸电阻式可触摸显示屏作为显控终端, 无需 PC 端应用软件操作, 提高系统的集成度。触摸显示屏采用串口与 STM32 进行通信, 通过自行开发主控界面, 满足实验过程的控制及数据显示需求。显控系统通过串口协议与主控器 STM32 进行通信, 给 STM32 发送相应控制指令和实时显示 STM32 传来的数据。显控软件总体设计如图 6 所示。

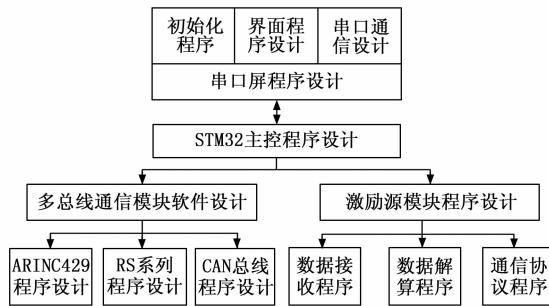


图 6 显控软件总体设计

触摸显示屏程序设计采用 USART HMI 软件进行开发, 其主要功能模块包括:

(1) 人机交互模块：该模块负责接收来自触摸显示屏的用户输入，并将命令分发至相应的子系统。通过 USART HMI 软件的事件处理机制，能够及时响应用户的触摸操作。例如，当用户点击实验科目选择按钮时，人机交互模块会将选择的实验科目信息封装成相应的命令，并通过串口发送给 STM32。触摸显示屏与 STM32 之间通过串口通信，首先需要完成串口参数的初始化设置，包括字符格式、波特率等，使得显示屏和 STM32 能够有效通信。其次需要定义显示屏与 STM32 的显控器数据收发程序的串口协议。此处给出部分控制协议如表 1 所示。

表 1 串口协议定义

目标	协议数据
打开传感器	0xAA
关闭传感器	0xAB
发送指定数据	0x10
停止数据发送	0x11
ARINC429 发送	0x01
RS-422 发送	0x02
...	...

(2) 传感器数据收集模块：负责从传感器获取数据，并将其转换为易于处理的格式。该模块通过串口接收 STM32 传来的传感器数据，然后依据数据格式进行解析。例如，对于温度传感器传来的数据，需要将原始的二进制数据转换为实际的温度值。

(3) 命令分发模块：将用户选择的命令发送至主控核心板，执行相应的操作。该模块根据人机交互模块传来的命令，按照串口通信协议的要求进行封装，再通过串口发送给 STM32。例如，当用户选择打开传感器时，命令分发模块会发送“0xAA”的指令到 STM32。

(4) 数据显示模块：实时显示从主控核心板接收到的数据。该模块依据接收到的数据类型和格式，在界面上选择合适的控件进行显示。例如，对于传感器的实时数据，可以使用图表控件进行动态显示；对于实验状态信息，可以使用文本框进行显示。

2) 多总线通信程序设计：

按照“基础型—综合型—开放型”分层次的思路设计多总线实验科目，满足不同层次学生的总线特性学习、总线应用及工程实践需求。

(1) 在基础型实验科目里，实验开始前，主控核心板已预先配置好相关实验科目和固定数据。学生操作时，只需按照提示，在触摸屏上启动相关总线的发送功能，这一操作简单直观，避免复杂的配置流程，降低了初学者的学习门槛。随后，学生依据实验指导利用示波器测量不同测试点处的波形，测量波形的时域特性，并参照提示信息对波形进行解析。

以 ARINC429 总线实验为例，学生在获取实测的 ARINC429 波形后，需按照特定的编码规则对其进行解析。ARINC429 总线采用双极性归零码进行编码，每个数据字由 32 位二进制数构成。学生通过对波形的仔细观察和分析，将其转换为对应的 32 位二进制序列。接着，依据 ARINC429 总线字格式，对这 32 位二进制序列进行分割。ARINC429 总线字格式包含了不同的字段，如标志位、数据位、奇偶校验位等，每个字段都有其特定的含义和用途。学生需要准确识别并提取这些字段，然后进行翻译和解算，将二进制数据转换为实际的物理量，如温度、压力、速度等。最后，将解算得到的物理量与预设数据进行比对，以此检验解析结果的准确性。

整个过程，学生无需进行复杂的操作与配置工作，便能轻松学习各类总线的编码规则、字符格式以及电气特性，进而逐步建立起对各型总线的感性认识。

(2) 综合型实验科目以工程化场景为导向，通过递进式任务提升学生的实践与协作能力。实验开展时，学生以 3~4 人为一小组，根据实验任务单选择 RS422、ARINC429、CAN 等总线接口或者接口组合，利用总线连接适配板搭建星型、总线型等典型拓扑结构，并接入大气数据传感器、姿态传感器等外围模块。在基础任务阶段，学生通过触摸屏设置总线通信参数，模拟一发多收的数据广播场景，观测不同接收节点的数据完整性与传输延迟；进阶任务则要求构建多发多收的分布式通信网络，学生需要协调多个发送端和接收端之间的通信，确保数据的准确传输和正确接收，如通过调整 CAN 总线的标识符配置实现仲裁机制验证，以此模拟典型航电系统间的通信场景。

(3) 开放型实验科目采用阶梯式学习路径鼓励学生深入了解程序框架，兼顾不同编程基础学生的能力提升需求。系统通过分层代码开放策略和多元化辅助资源，构建从基础实践到创新开发的渐进式学习体系：对于编程基础薄弱的学生，系统提供基于 STM32CubeMX 的图形化代码生成工具，支持通过可视化配置自动生成总线驱动、外设初始化等底层代码框架，并配备标准化注释模板和函数调用示例，降低代码编写难度。针对具备一定编程能力的学生，系统开放完整的软件分层架构源码，包含应用协议层接口函数、功能控制层协议栈和硬件驱动层底层代码。学生可在现有代码框架基础上，利用系统提供的 API 文档和实验指导手册，调用已封装的总线操作函数（如 ARINC429 数据打包函数、CAN 消息发送接口），专注于业务逻辑开发。

在开放性实践环节中，学生需综合运用理论知识，自主完成系统需求分析、代码架构设计与功能调试优化。以 SPI 总线传感器数据采集实验为例，学生需独立编写 SPI 总线初始化程序，实现数据收发控制、传感器

协议解析及数据封装传输功能,并通过逻辑分析仪验证总线时序正确性。通过此类综合性开发实践,学生不仅能够深化对总线协议的理解与应用能力,更可系统掌握航空电子系统从需求定义到工程实现的全生命周期开发流程,为高阶创新实践奠定坚实基础。

3) 激励模块程序设计:

为实现多模态传感器数据的高效采集与处理,激励模块程序设计采用分层架构与标准化接口设计。软件分为硬件抽象层(HAL)和应用接口层(API),其中HAL层封装底层通信协议,实现I²C/SPI/ADC等硬件操作的统一接口。采用寄存器映射方式访问传感器,支持跨平台移植。通过结构体定义标准化接口规范,支持MPU6050六轴陀螺仪、SHT30温湿度传感器、光敏电阻等多类型传感器扩展。提供统一的传感器操作接口,包括初始化、数据读取、校准等功能。

数据激励源模块包括两个部分:一是传感器和核心板之间通过相关接口进行通信;二是数据的处理功能。以MPU6050六轴陀螺仪为例,其通过I²C和STM32核心板进行通信,驱动实现包含I²C初始化、寄存器配置(电源管理、量程设置、FIFO使能)、数据读取(原始ADC值转换为四元数Q30格式)及DMP姿态解算(欧拉角输出)。STM32初始化相应GPIO管脚及MPU6050后,通过I²C协议读写MPU6050中的各个寄存器,并读取返回数值。完成配置。由于MPU6050传感器输出的原始数据是3轴加速度和3轴陀螺仪数据,在STM32主控器中还需要加入航姿解算的程序。MPU6050输出的四元数是q30格式的,在解算成欧拉角之前,需要将其改为浮点数类型,再利用反正切函数将航姿的弧度换算为角度。

上述多传感器程序设计架构,通过分层和标准化接口,不仅实现了对不同类型传感器的有效整合与管理,还确保了在增加新传感器时,学生仅需遵循既定接口规范实现驱动函数并注册到传感器管理模块,即可便捷地扩展系统功能。这为多模态传感器数据的高效采集与处理提供了灵活的程序基础,可支持实验系统对多样化真实数据激励源的需求,能够灵活应对不同实验场景下对传感器数据的获取与运用要求。

2 实验结果与分析

基于图3的连接结构,利用总线适配板分别使用ARINC429和RS422接口搭建一发两收的实验场景,在接收端接口板测试口实测波形分别如图6所示。实验过程中,通过主控板配置ARINC429总线以100kbps速率发送包含模拟飞行参数(高度、空速)的32位数据字,利用示波器在接收端接口板测试口采集到的波形如图7(a)所示。波形呈现典型的双极性归零码特征,

通过对波形的时域分析,可清晰观测到信号跳变沿与编码规则的对应关系。在RS422接口实验中,设定通信波特率为119200bps,发送自定义数据包。如图7(b)所示,RS422总线采用平衡差分传输方式,两条信号线(A、B)上的电压信号呈现镜像对称特性,有效抑制了共模干扰。通过测量信号幅值与电平转换时间,可验证RS422总线在长距离传输下的抗干扰性能。两组实验波形数据直观展现了不同总线协议在物理层传输的特性差异,为学生理解总线电气特性与协议原理提供了直观的实验依据,同时也验证了本实验系统在支持多总线拓扑构建与信号测试方面的有效性。

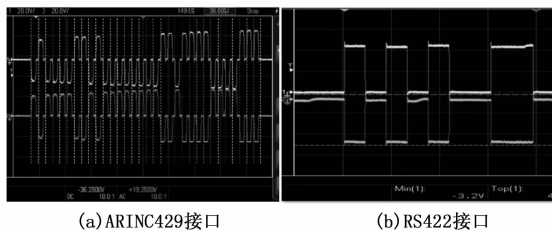


图7 实测波形图

教学实践数据表明,采用本实验系统的实验组在总线协议理解、拓扑结构设计、故障诊断能力等核心指标考核中,平均得分较使用传统实验系统的对照组高出10分以上,70%的学生能够独立完成多总线融合通信开发;在竞赛与成果转化方面,依托该系统的学生作品荣获航空航天类毕设成果交流二等奖、全国高校电子信息类专业实验案例设计东部赛区一等奖及全国三等奖等多个国家级奖项,近三年更助力多名学生完成毕业设计,其中1项获评海军级优秀,充分证明其对高阶工程实践的支撑能力。

3 结束语

为满足机载辅助总线通信原理及电气特性的深度教研需求,在研究ARINC429、RS-422、RS-485、RS-232和CAN等5种总线协议的基础上,采用核心板加总线接口底板的架构,克服现有总线实验系统的集成度低、可测试性差、成本高且实验系统不直观等问题,通过串行通信接口接入传感器作为外部数据激励源,结合触摸显示屏设计并实现一体化、高集成度的多总线实验系统。在总线接口底板上设计有多处测试接口,便于学生掌握总线信号全流程传输的电气特性。应用表明:该实验系统功能完备,具有集成度高、可测试性好、成本低且直观等优点,可为学生提供开放性实验的硬件支持和软件接口,能较好地支撑机载辅助总线实践教学,从而提高学生的工程实践能力。

参考文献:

[1] 何 锋. 机载网络技术基础 [M]. 北京: 国防工业出版社

社, 2018.

[2] 陈长胜, 范祥辉, 邱 征. 民用飞机机载总线与网络 [M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2019.

[3] 江志东, 霍立平, 张 弟, 等. 基于 SoC 芯片的 1553B 总线仿真平台设计与实现 [J]. 电子设计工程, 2020, 28 (24): 152-157.

[4] 张 弟, 江志东, 高伟伟, 等. 一体化 1553B 总线通信仿真平台设计与实现 [J]. 电子设计工程, 2022, 30 (10): 139-143.

[5] 王越涛, 赵冬青, 武慧军. 基于 FPGA 和 B61580S3 的 1553B 总线 RT/MT 功能的设计与验证 [J]. 电子设计工程, 2023, 31 (2): 179-183.

[6] 周琪栋, 江志东, 张 弟, 等. 基于 MIL-STD-1553B 的通信原理教学软件设计与开发 [J]. 计算机测量与控制, 2023, 31 (5): 200-206.

[7] 谢天乐, 冯尚聪, 董 旭, 等. 基于 1553B 总线架构的测试设备设计与实现 [J]. 计算机测量与控制, 2022, 30 (6): 11-16

[8] 陈海牛. 某型发动机参数显示系统的测试与故障诊断系统设计 [J]. 航空维修与工程, 2021 (12): 56-61.

[9] 刘成伟, 鲍奂伟. ARINC429 时钟总线干扰故障分析 [J]. 航空维修与工程, 2021 (11): 115-116.

[10] 邢达波, 李铁林, 艾 波. 机载 RS422 总线数据异常分析研究 [J]. 中国科技信息, 2017 (2): 28-29.

[11] 樊智勇, 李 季, 刘 涛. 航电中继系统多通道 ARINC429 总线故障注入方法 [J]. 计算机测量与控制, 2023, 31 (12): 200-206.

(上接第 9 页)

[10] 苏宝华, 张吟龙, 张 男, 等. 基于深度神经网络的航空叶片表面缺陷检测算法 [J]. 光电子·激光, 2025, 36 (2): 130-135.

[11] 曾勇杰, 范必双, 杨涯文, 等. 改进 YOLOv8 算法在风机叶片缺陷检测上的应用 [J]. 电子测量与仪器学报, 2024, 38 (8): 26-35.

[12] 黄 振, 薛 宇. 基于气动声学故障诊断技术的风机叶片开裂模型仿真与检测方法研究 [J]. 现代电子技术, 2024, 47 (6): 102-108.

[13] 高志坤, 张 翔, 卜嘉利, 等. 带热障涂层单晶涡轮叶片涡流检测及损伤分析 [J]. 航空制造技术, 2024, 67 (21): 28-34.

[14] 步 斌, 张梦怡, 王 超, 等. 融合多尺度及注意力机制的表面缺陷检测算法 [J]. 空间控制技术与应用, 2023, 49 (6): 94-103.

[15] 汤占军, 史小兵, 肖 遥, 等. 基于深度学习模型的风机叶片结冰故障诊断 [J]. 噪声与振动控制, 2023, 43 (4): 96-103.

[16] 何宇豪, 曹学国, 刘信良, 等. 基于 SW-YOLO 模型的航空发动机叶片损伤实时检测 [J]. 推进技术, 2024, 45 (2): 197-203.

[17] 李新越, 杨 龙, 孙春贵, 等. 基于微焦点工业 CT 的高压涡轮叶片缺陷检测技术 [J]. 铸造, 2023, 72 (7): 2021, 29 (8): 16-20.

[12] 魏茹瑾, 常 喜, 邱 昱, 等. 机载总线传输技术抗干扰能力分析 [J]. 安全与电磁兼容, 2023 (3): 42-45.

[13] 王晓飞, 闫淑群, 罗宇辉, 等. 低速总线分析系统的设计实现 [J]. 计算机测量与控制, 2021, 29 (10): 25-31.

[14] 崔建峰, 靳 鸿, 刘长明. 总线技术开放式教学实验平台 [J]. 电气电子教学学报, 2021, 43 (5): 157-161.

[15] 杨卫军, 许 哲. 1553B 总线通信实验教学研究 [J]. 实验室研究与探索, 2013, 32 (11): 107-109.

[16] 李 智. 一种可配置数据交互流程的嵌入式总线接口测试系统设计与实现 [J]. 计算机测量与控制, 2020, 28 (11): 7-11.

[17] 李 良, 李亭亭, 黄家彬, 等. 一种 1553B 总线原理教学训练系统的设计与实现 [J]. 机电产品开发与创新, 2023, 36 (6): 150-152.

[18] 宫海波, 张振华, 徐 茜. 通用串行航空总线综合测试系统设计 [J]. 计算机测量与控制, 2017, 25 (6): 25-27.

[19] 谢永超. 基于 STM32 的“模块化”电子技术综合创新平台的设计与实现 [J]. 计算机测量与控制, 2020, 28 (11): 256-259.

[20] 李明睿, 韩丙同, 王 奎, 等. 基于 STM32 的模块化雷达接口测试仪设计 [J]. 计算机测量与控制, 2024, 32 (6): 334-339.

904-908.

[18] 陈闻鹤, 程龙生, 常志朋, 等. 改进 BiLSTM-GRU-DMD 的风机叶片结冰故障检测与状态评估模型 [J]. 工业工程与管理, 2023, 28 (5): 108-118.

[19] 张家安, 田家辉, 王铁成, 等. 基于改进 MFCC 算法的风力机叶片故障诊断方法 [J]. 太阳能学报, 2024, 45 (1): 285-290.

[20] 王栋欢, 肖 洪, 吴丁毅. 基于深度学习的航空发动机涡轮叶片自动射线检测技术研究 [J]. 推进技术, 2024, 45 (5): 222-230.

[21] 张军华, 宫 伟, 陈思杨, 等. 基于气动信号的风电机组叶片故障诊断 [J]. 船舶工程, 2024, 46 (s2): 35-42.

[22] 马天池, 沈君贤, 宋 狄, 等. 基于多域特征与信息融合的叶片裂纹故障诊断 [J]. 东南大学学报 (自然科学版), 2024, 54 (6): 1567-1573.

[23] 张家安, 姜皓龄. 基于声学特征与 BAS-SVM 的风机叶片故障状态检测方法 [J]. 中国测试, 2023, 49 (8): 87-92.

[24] 俞梦倩, 吴 伟, 邬冠华, 等. 航空发动机涡轮叶片 DR 检测工艺参数优化 [J]. 航空动力学报, 2023, 38 (8): 1837-1845.

[25] 张麟华, 王 煜. 船舶涡轮机叶片细小裂痕视觉显著性检测研究 [J]. 舰船科学技术, 2024, 46 (18): 167-170.