

基于 MIL-STD-1553B 的通信原理 教学软件设计与开发

周琪栋¹, 江志东¹, 张 弟¹, 周 浩¹, 班海丽²

(1. 中国人民解放军海军航空大学青岛校区 航空电子工程与指挥系, 青岛 266041;

2. 中国人民解放军 91188 部队, 海口 571122)

摘要: 1553B 总线广泛应用于战机航电系统, 为有效理解并掌握 1553B 总线通信原理, 在深入分析 1553B 教学需求的基础上, 结合其通信原理, 设计并开发完成了基于 C# 的 1553B 总线通信原理教学软件; 以系统工程思想为指导, 完成了该软件需求分析和总体设计; 以分层设计思想为指导, 完成了该软件基础实验、原理实验及综合实验的设计与实践验证; 开发完成后, 根据教学情况与使用反馈, 进行了功能调整及界面优化; 该软件对 1553B 总线通信原理的学习与教学提供了强有力支撑, 具有显著创新性和广泛实用性。

关键词: 1553B 总线; 实验系统; 综合实验; 教学软件

Design and Development of Communication Principle Teaching Software Based on MIL-STD-1553B

ZHOU Qidong¹, JIANG Zhidong¹, ZHANG Di¹, ZHOU Hao¹, BAN Haili²

(1. Qingdao Branch, Navy Aviation University, Qingdao 266041, China;

2. PCA of 91188, Haikou 571122, China)

Abstract: 1553B bus is widely used in aircraft avionics system, in order to effectively understand and master the 1553B bus communication principle, on the basis of in-depth analysis of 1553B teaching needs, combined with its communication principle, a 1553B bus communication principle teaching software based on C# is designed and developed. Under the guidance of system engineering, the software requirement analysis and overall design are completed; The design and practical verification of basic experiment, principle experiment and comprehensive experiment of the software are completed by the idea of hierarchical design. After the development is completed, the function adjustment and interface optimization are carried out by the teaching feedback. The software provides a strong support for learning and teaching on the 1553B bus communication principle, and it has remarkable innovation and wide practicability.

Keywords: 1553B bus; experimental system; comprehensive experiment; teaching software

0 引言

MIL-STD-1553B 总线是第三代战机航空电子系统的“骨架”和“神经”, 具有实时性好、可靠性高等诸多优点, 在第四代战机中也有局部应用^[1]。1553B 总线标准自发布以来, 逐渐被广泛应用于飞机综合航电系统、外挂物管理与集成系统、飞行控制系统, 并逐步扩展到军用车辆、舰船、航天等领域^[2]。学习和掌握 1553B 总线的相关知识, 如通信原理、协议组成、传输控制等, 是深入学习联合式航电系统的基础。

然而, 目前现有 1553B 总线实验教学系统对理论教学的支撑不足, 不能满足学员综合能力和应用创新能力的高阶性培养需求。另外, 一线部队维护保障人员对航电总线

的理解和维护停留在较浅层次, 现有实验系统无法支撑对部队开展有关三代战机主总线的深层原理培训。

针对以上不足, 设计开发一款初学者易上手、实验科目难度适宜、实验内容层层深入、人机交互界面友善的 1553B 总线通信原理演示系统软件尤为重要。基于该软件, 可以帮助使用者建立三代机联合式航电系统整体概念, 从而满足院校理论与实验辅助教学, 同时可为部队开展培训提供支撑。

1 需求分析

目前市面上鲜有用于辅助 1553B 总线原理教学的实验系统, 几乎没有专门针对教学需求开发的 1553B 总线通信原理实验软件。而 1553B 总线模块自带的软件系统主要用

收稿日期: 2022-09-27; 修回日期: 2022-11-04。

作者简介: 周琪栋(1989-), 男, 山东青岛人, 硕士, 助教, 主要从事航空电子综合技术方向的研究。

通讯作者: 江志东(1985-), 男, 山东青岛人, 博士, 讲师, 主要从事航空电子综合技术方向的研究。

引用格式: 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.

于其基本功能的演示验证, 存在的主要问题如下:

1) 部分软件功能单一, 不满足 1553B 总线原理展示及多层次高层次学习的需求, 仅能进行简单的通信演示, 可视化界面不够友善, 其他功能则需要进行二次开发。

2) 部分软件功能冗余, 操作复杂, 且人机交互体验差, 缺乏相应提示信息, 配置调试过程异常繁琐, 不能突出把握学习重点, 不能正常投入教学使用。

3) 无科目化实验内容设计, 不满足分层次学习实践的需求, 而且无法开展综合性实验项目, 不便于学习者建立联合式航电系统的整体概念。

国内外航空类院校面临无合适 1553B 总线系统教学辅助软件用的尴尬境地, 供求失衡日益突出。无法满足院校学生综合能力与应用创新能力的培养, 这是一个需要不断进行学习—思考—实践—再学习—再思考—再实践的过程^[3]。基于此, 本文设计并开发了基于 MIL-STD-1553B 的 1553B 通信原理教学软件。

2 1553B 总线通信架构简介

1553B 总线拓扑架构和协议结构是实现本文所开发教学软件的理论基础, 总线硬件模块是本文教学软件实现的底层硬件基础, 上位机开发环境是本文教学软件的开发工具。

2.1 1553B 总线拓扑架构

1553B 总线系统主要由四大部分组成^[4]:

1) 总线控制器 BC (BusController): 负责全局指令发送。用于总线消息传输的控制、扫描和监视^[5]。

2) 总线监视器 BM (BusMonitor): 由具备监控功能和信息传输功能的设备担任, 监视总线上传输的信息。

3) 远程终端 RT (Remote Terminal): 各子系统与总线网络间的通信桥梁, 在 BC 的指令控制下传输数据。

4) 传输介质 (双绞屏蔽电缆): 负责总线连接组件之间、总线连接组件和终端之间的信号传输。为提高可靠性, 一般为双余度 (总线电缆 A、B), 故障时可余度切换。

总线系统整体拓扑架构如图 1 所示。

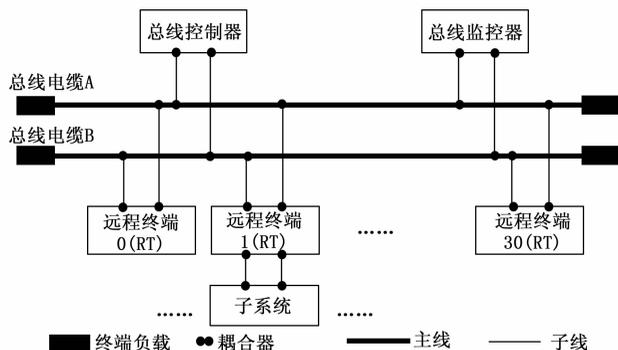


图 1 1553B 总线拓扑架构

2.2 1553B 总线协议结构

1553B 总线通信系统分为 5 层, 自顶向下分别是应用层、驱动层、传输层、数据链路层和物理层^[6]。在 5 层协议模型中, 其中应用层和驱动层位于各航电子系统计算机中,

传输层和链路层位于总线接口模块 (MBI)。

1) 应用层。应用层是通信系统的最高层, 它实现通信系统的管理和解释功能, 包括系统的启动、维护、重构、终止总线通信等功能。

2) 驱动层。驱动层是实现主机应用软件与 MBI 间的接口控制, 它实现控制 MBI 卡的初始化、启动、运行、停止、连接、脱离连接、启动自检、状态监视和数据传输等功能。

3) 传输层。传输层用于控制多路数据传输总线上的数据传输, 在担任总线控制器的 MBI 板中实现。传输层规定了在物理层上每条消息的发出顺序。除此之外, 传输层还负责故障处理、双余度总线的管理切换及实时时钟 RTC 同步等。

4) 数据链路层。数据链路层规定了命令/响应型介质访问控制协议, 定义了 3 种字格式和十种消息格式, 控制每条消息中各类字的传输顺序。

5) 物理层。物理层包括物理介质 (电缆系统) 和处理物理介质上位流的传输, 规定了编码格式、数据率、电气特性等, 确保只有满足规定物理传输特性的信号才能被传输到数据链路层。

1553B 总线通信结构核心内容由编码方式、字格式、消息格式及消息传输四部分构成。在 1553B 总线上进行数据传输时, 字是消息组成的最基本单元, 协议字分为三类: 命令字、数据字、状态字^[7], 每个字 20 位, 每一位采用双相曼彻斯特 II 型编码。每种字的前 3 个比特位为同步头, 接着是 16 个比特位的有效信息数据, 最后 1 位是奇偶校验位^[8-9]。

1553B 总线定义了数据传输、广播消息 (Broadcast) 和方式控制 (Modecode) 三类消息传输格式。数据传输消息格式有 3 种, 包含 BC→RT、RT→BC 及 RT→RT, 所有传输均是在 BC 的控制下完成的^[10]。总线传输的消息之间的最小间隔时间为 $4.0\mu\text{s}$, 远程终端响应总线控制器有效命令字的间隔时间为 $4.0\mu\text{s} \sim 12.0\mu\text{s}$, 如果响应时间超出界定值 $14\mu\text{s}$, 则应该做超时处理^[11]。在总线上传输的按一定更新频率发送的消息称为周期消息, 其余为事件消息。

2.3 1553B 总线硬件模块

CAV-1553B-USB 为一款便携式 USB2.0 接口的双通道双冗余的 1553B 总线适配器, 根据不同的配置实现多种 1553B 功能, 如 1553B 总线设备和系统的仿真、测试、监控。

在应用时, 可以同时实现一个 BC、多个 RT (最多 31 个) 的通信^[12]。其支持 1553B 总线信号波形采集, 可通过测试端口测取总线上传输的实时波形, 通过对波形解析, 加深对总线通信的理解。本文所使用的 CAV-1553B-USB 模块如图 2 所示。

2.4 开发语言及开发环境

基于通信原理教学软件设计与开发的现实需求, 选择以 C 作为上位机软件开发语言。采用 C 语言可以方便快捷地实现软件高效率开发, 并且质量更高, 后期维护更为简单^[13]。软件集成开发环境为支持 C 语言的 IDE。IDE 开发



图 2 CAV-1553B-USB 模块

工具相比较而言更为实用并且功能全面且强大,提供的统一开发平台大大降低软件开发难度,可以实现可视化桌面应用程序开发。

3 1553B 通信教学软件总体设计

结合 1553B 总线通信原理教学需求,以软件工程思想和分层设计思想为指导,立足于上位机软件可视化界面友善、实验项目层次清晰、实验内容合理且具有针对性等特点,设计该教学软件的功能框架和总体开发方案。该软件以期能够满足教学需求并实现高效率教学,贴近日常学习,聚焦实践教学,具有显著创新型和广泛实用性^[14]。

3.1 功能框架设计

以系统工程思想和分层设计思想为指导,为满足实验内容先易后难,学习过程层层深入的要求^[15],将该软件设计分为三层功能模块:

第一层设置基础实验项目,可一键启动实验并配合使用示波器测取波形,结合配备的理想参考波形进行学习及分析验证;

第二层设置原理实验项目,可自行配置消息参数实现消息传输以调动实验,实现典型消息格式等数据传输内容的深层次高质量学习,进一步加深对 1553B 通信原理的学习;

第三层设置综合实验项目,学员可通过多消息通信掌握大小周期、事件消息等消息调度内容,并可进行冗余备份切换、消息延迟重发等通信机制及故障处理机制的学习。

软件的运行流程如图 3 所示。

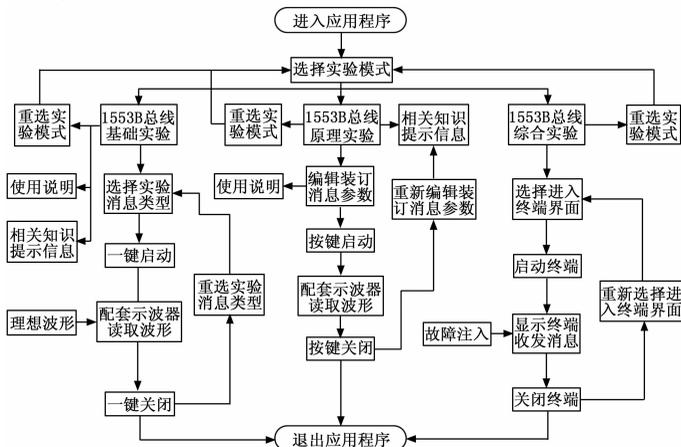


图 3 软件运行流程图

3.2 开发方案设计

1553B 总线通信教学软件本质为上位机软件,通过板卡提供的基本 API 与底层的 1553B 总线模块(即本软件开发所基于的 CAV-1553B-USB 模块)进行交互。在 Visual Studio 2017 平台搭建 Windows 窗体应用程序,调用相应动态链接库以驱动底层 1553B 硬件^[16-17],完成软件各项功能。

4 1553B 通信教学软件实现与验证

本章首先对软件主界面实现进行描述,然后依次对基础实验、原理实验及综合实验的实现与验证进行论述。

4.1 软件主界面

主界面具有实验引导功能,可以根据学员的需求,实现其到基础实验页面、原理实验页面及综合实验页面的跳转,以及可以实现从 3 个实验页面返回主界面功能。主界面主题鲜明,控件元素设置合理且具有提示信息,人机交互程度高,便于学员高效操作使用。

4.2 基础实验实现与验证

1553B 总线通信原理涉及到编码方式、字格式、消息格式、消息调度、通信机制、故障及异常处理机制等多元内容,基础实验项目预期实验效果即为促进学员对编码方式的理解,强化对字格式的认识,加深对典型消息格式的了解,为学员后续深入学习 1553B 总线通信原理打下坚实基础。设计并开发出便捷操作,即学员可在不配置相关参数的前提下,通过一键启动的形式调用演示系统软件固定写好的参数来成功启动实验,直接得到相关实验结果。

实验项目涵盖 BC→RT、RT→BC、RT→RT、Broadcast 及 Modecode 消息通信实例。

4.2.1 BC→RT 消息格式实验实现与验证

BC→RT 消息格式类型实验所实现的总线通信实质为总线控制器 BC 向远程终端 RT 发送数据消息。根据 1553B 消息格式,BC→RT 的消息是以 BC 向 RT 下达接收命令字开启,然后 BC 发出一系列数据字,接收方 RT 收到 BC 的数据字,校验后向 BC 发出接收状态字表明数据已成功接收。

基于实验开发平台,BC→RT 消息格式实验实现步骤如下:BC 初始化→分配 MsgBuffers→定义并写入 BC Block 与 MsgBuffers→启动 BC→初始化并使能 RT→分配 SA Buffers→启动 RT。在完成这些步骤后 BC→RT 消息开始传输,消息传输完毕后关闭 BC 与 RT。对其中重要的步骤论述如下。

BC Block 配置写入:要实现 1553B 总线通信,任何消息的传输都需要进行 BC Block 的配置写入。配置其结构并写入板卡时,需设置不同的标识符才可调用模块实现不同消息格式传输。如设置 BC→RT 消息格式时,需设置标识符为 BC_BLOCK_TYPE_MSG_BCRT,字符值为“0x00000001”。

BC Message Buffer 配置写入:配置发送数据的各个参数,本实验项目开发中主要配置了中断使能字(m_intEnable)为“0x00010000”,表示记录相应的中断,32 个 16 bit 数据 data_wds [32],其中 data_wds [0] 固定设置为

“0x0505”, 其余 31 个数据暂不设置, 使用默认 “0x0000”。

线程定时器设置: 为了让消息持续不断发送, 方便使用示波器测取波形^[18], 一键启动实验后, 需要周期性循环进行消息发送。本实验开发中设置了一定时间间隔的线程定时器, 以循环调用发送消息的函数。

BC→RT 消息格式实验的界面如图 4 所示。

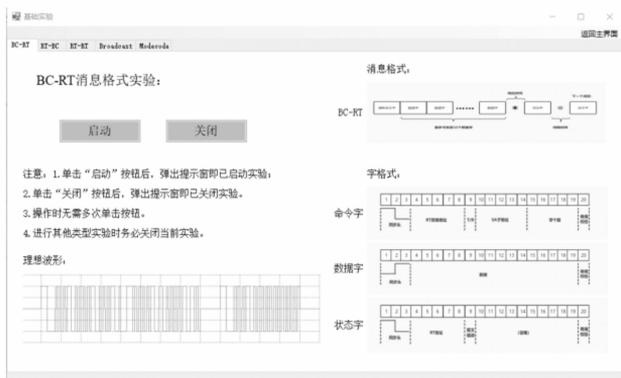


图 4 BC→RT 消息格式实验界面

此界面为主界面选取的“基础实验”项目的跳转, 可单击“启动”按钮进行 BC→RT 消息的一键配置及传输。传输过程中, 使用示波器通过测试点测取到实时传输波形如图 5 所示, 总线监视器监控到实时传输的消息如图 6 所示。

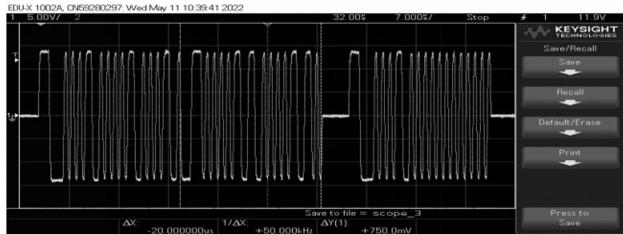


图 5 BC→RT 消息格式实时传输波形

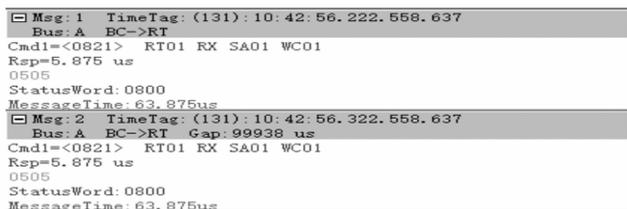


图 6 总线监视器监控消息

可将测取到的传输波形图与界面中的消息格式参考图、字格式参考图、理想波形参考图进行对比验证。实时波形图中的波形可大致分为三段, 分别对应命令字波形、数据字波形、状态字波形。可解析出此消息为 BC 发送接收命令字至 RT01, 然后发送数据字, 经一定消息间隔后, RT01 发送状态字至 BC, 符合 BC→RT 消息格式。我们以中间段的数据字波形为例进行分析, 前三位为同步头, 最后一位

为奇偶校验位, 其余 16 位可读出数据字为 “0x0505”, 与预先写入 BC Message Buffer 的数据一致。

总线监视器监控到总线上实时传输的消息, 命令字为 “0x0821”, 表示终端设备 RT01 子地址 SA01 接收 1 个数据字, 紧接着是数据字 “0x0505”, 终端地址 RT01 发出的状态字为 “0x0800”。完全符合示波器测取的实时波形, 与软件实验界面设置的消息格式一致。

4.2.2 基础实验其余消息格式实验实现与验证

RT→BC、RT→RT、Broadcast 及 Modecode 消息格式实验开发流程与 BC→RT 开发流程类似。根据选取的消息格式, 将 BC Block 和 BC Message Buffer 写入不同参数实现通信。

在 RT→BC、RT→RT 实验开发步骤中, 除了与 BC→RT 开发流程类似的过程, 还需要进行 RT SA Buffer 的内存分配和配置写入。本实验开发中主要配置的参数如下: 配置输入检测 m_legalWc 为 “0xFFFFFFFF” 表示输入数据合法; 中断使能字 m_intEnable 为 “0x00010000” 表示记录相应的中断; 32 个 16bit 数据 data_wds [32] 中 data_wds [0] 设置为 “0x1111”, 其余 31 个数据暂不设置, 使用默认 “0x0000”。

RT→BC、RT→RT、Broadcast 及 Modecode 消息格式界面及实验功能验证与 BC→RT 界面及验证类似, 不再赘述。

4.3 原理实验实现与验证

人机交互技术作为人与计算机之间信息交流的接口和以人为中心指导系统开发的方法论, 能够使系统更好满足用户功效性和情感性的需求, 提高用户与计算机之间的交互质量和用户体验^[19]。

按照人机交互的指导要求, 区别于基础实验的一键操作, 原理实验在界面上设置鼠标和键盘的输入端口, 使学员可以自行配置相关消息通信参数, 以便调动学员积极性, 实现更高效的学习, 并且教员可使用该项目设置问题以检验学员掌握程度, 从而及时对教学做出调整。

4.3.1 原理实验实现

原理实验项目承上启下, 可进一步有效强化学员对 1553B 总线通信原理的学习, 并为后续综合实验项目的学习做准备。原理实验项目包含 BC→RT、RT→BC、RT→RT、Broadcast 消息通信实例。在原理实验项目中, 学员可以自行选择不同的消息通信类型, 选择相应参数以配置命令字, 启用数据编辑板块进行相应传输数据的编辑, 最终完成消息通信参数配置以完成实验。实验开发依次包含两大工作: 通信参数准备工作和消息通信实现工作。

通信参数准备工作详细步骤如下。

1) 通信消息类型写入: 实现通信消息类型配置, 主要是 Label 控件与 commoBox 控件配置使用。使用 commoBox 控件选择 BC→RT、RT→BC、RT→RT 及 Broadcast 消息传输类型之一。

2) 命令字参数写入: 命令字的 16 bit 有效信息数据中,

5 bit 为远程终端地址 RT, 1 bit 为收发参数 RT, 5 bit 为子地址 SA, 5 bit 为数据字个数 WC。通过 commoBox 控件依次设置以上 4 个参数的字符串, 将字符串转换为 16 位无符号整数, 写入硬件板卡 CAV-1553B-USB 中。

3) 通信总线及帧周期选择与写入: 1553B 总线有 BusA 总线和 BusB 总线两条总线, 当其中一条总线出现故障时可自动切换到另一条总线上进行通信^[20]。通过 radioButton 控件选择 BusA 或 BusB 总线任一进行通信。选择板卡 CAV-1553B-USB 的子帧模式进行通信, 设置其帧周期即可实现周期通讯。

4) 编辑传输数据: 单独设置数据编辑页面, 具有输入限制、数据转换、一键清除等功能方便学员快速输入。编辑框限制只能输入合法的四位二进制数据, 需要实现 text-Box 无法输入字母以及无法输入超过 4 位数字。数据编辑部分设置二进制数据输入端口, 需要实现 4 个 4 位二进制数据转化为 1 个 4 位十六进制数据, 从而写入消息传输程序中。为了满足学员输入数据后便捷清零的需求, 实现学员高效率使用本辅助教学软件, 故在数据编辑功能中设置“清零”按钮。“清零”功能的实现主要借助 button 控件及 group-Box 控件。

原理实验消息通信的实现工作与基础实验中所述步骤基本一致, 不再赘述。

4.3.2 原理实验验证

结合原理实验项目界面, 并选择 BC→RT 消息通信实例进行参数配置, 并将验证过程进行展示。其余消息通信实例配置及验证过程与之相似, 不再论述。

BC→RT 消息通信实例参数配置界面如图 7 所示。选择 BC→RT 消息时由于 BC 仅需要下达接收 RT 命令字, 因此“命令字 2”将变灰不可用。学员可根据场景配置“命令字 1”以定义接收 RT 的地址、子地址 SA 和传输的数据量 WC。假设配置接收 RT 地址为 10, SA 为 24, WC 为 4。选择“BusA”通道, 配置帧周期为 100ms, 点击“启动”。点击“数据编辑”, 进入数据编辑界面, 依次进行 4 个数据字内容的编辑, 将前 4 个数据字设为“0x1111”、“0x2222”、“0x3333”和“0x4444”, 如图 8 所示。



图 7 BC→RT 消息通信实例参数配置界面

完成数据编辑之后, 点击“确定”, 软件跳转到参数配置界面。点击配置界面的“运行”启动通信, 软件按照所

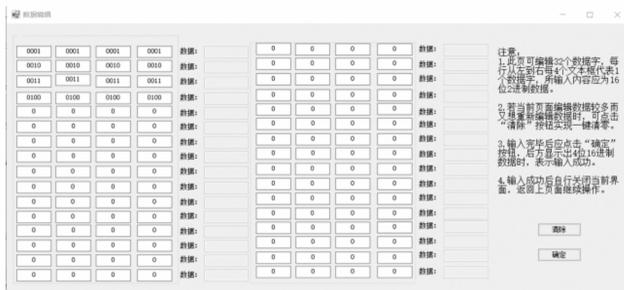


图 8 数据编辑界面

选消息格式和数据字调度板卡开始消息传输。传输过程中, 使用示波器通过测试点测取到实时传输波形如图 9 所示, 总线监视器监控到实时传输的消息与基础实验类似, 不再赘述。

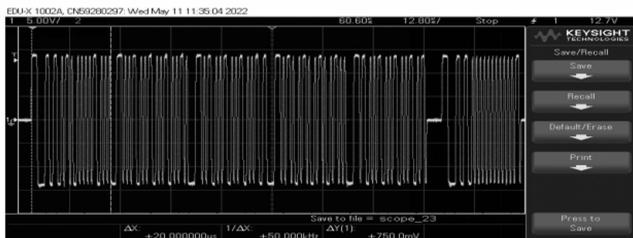


图 9 BC→RT 消息格式实时传输波形

按照曼彻斯特 II 编码解析, 实时波形依次为: 0x5304 (命令字), 0x1111、0x2222、0x3333、0x4444 (4 个数据字), 0x5000 (状态字)。符合 BC 向终端 RT10 的子地址 SA24 传输所设置的 4 个数据字, 并收到 RT10 发出的通信正常状态字反馈, 与软件原理实验界面配置的消息类型和消息数据内容一致。

4.4 综合实验实现与验证

设计开发基础实验和原理实验, 并不能完成 1553B 总线通信原理完全意义上的教学。基础实验和原理实验可以辅助学员理解 1553B 总线命令响应的控制机制, 实现的是任意两个终端之间的通信, 而 1553B 总线实现的是多个终端在同一套总线上的有序通信, 对于如何确保多个终端在同一套总线上通信不冲突毫无涉及。

综合实验项目的目的就是辅助学员理解 1553B 总线的通信机理, 即采用大小周期的时分制调度机制。在实际通信过程中, 有时还会涉及到非周期消息的触发, 而且根据不同情况也会出现冗余备份切换和消息延迟重发等机制。因此设计开发能够实现大小周期、非周期消息等消息调度教学内容, 实现深层次冗余备份切换和消息延迟重发等通信协议和故障排除机制教学功能, 能够帮助学员建立三代机联合式航电系统整体概念的综合实验项目就显得格外重要。

4.4.1 综合实验实现

综合实验项目实现总线消息通信实际内容, 按周期传输固定消息, 并且引入的非周期消息发送, 支持学员自行触发非周期消息, 学员可通过多个终端界面读取每个终端

实时接收到的消息, 通过每个终端实时接收到的消息以分析得出每个消息的消息周期, 并推测出大小周期。通过设置典型故障, 可辅助学员理解故障处理机制, 如某终端子系统一根总线断开, 消息会在另一条备份总线上重发; 如果将某个终端关闭, 模拟终端故障, 消息可在当前通道重发、以及切换通道重发。

综合实验项目是在参考某型战机航电系统拓扑结构的前提下, 通过开发实现一个总线控制器 BC (显示控制管理子系统 DCMS)、5 个终端设备 RT (RT1 为雷达子系统 RD; RT2 为外挂物管理子系统 SMS; RT3 为惯导子系统 INS; RT4 为大气数据子系统 ADC; RT5 为任务计算子系统 MC) 不同子界面, 多终端子系统同时启动、配合实现该型战机完成一次空空火力打击消息传输全过程^[21], 有助于学员对三代机联合式航电系统整体概念进行理解。假设战机执行某次空空火力打击任务过程中, 所需传输的总线消息如表 1 所示。

表 1 一次空空火力打击总线消息表

| 消息编号 | 消息名称 | 消息流向 | 消息周期 |
|-------|--------|------------------|--------|
| Msg1 | 目标原始数据 | RD→MC(RT1→RT5) | 30 ms |
| Msg2 | 飞机状态矢量 | INS→MC(RT3→RT5) | 30 ms |
| Msg3 | 发射允许信息 | MC→DCMS(RT5→BC) | 30 ms |
| Msg4 | 更新大气资料 | ADC→MC(RT4→RT5) | 60 ms |
| Msg5 | 更新飞行参数 | INS→MC(RT3→RT5) | 120 ms |
| Msg6 | 目标跟踪指引 | INS→RD(RT3→RT1) | 60 ms |
| Msg7 | 目标原始数据 | MC→RD(RT5→RT1) | 120 ms |
| Msg8 | 目标显示数据 | RD→DCMS(RT1→BC) | 120 ms |
| Msg9 | 武器管理信息 | SMS→DCMS(RT2→BC) | 240 ms |
| Msg10 | 更新大气数据 | ADC→DCMS(RT4→BC) | 240 ms |
| Msg11 | 发射对准装订 | DCMS→SMS(BC→RT2) | 非周期 |
| Msg12 | 扳机状态信息 | DCMS→SMS(BC→RT2) | 非周期 |

参照战机的 1553B 传输层消息调度方式对以上总线消息进行调度排列, 形成的总线消息调度时间轴如图 10 所示。

一次空空火力打击中一个大周期 (240 ms) 传输的消息约 40 条 (Msg1~Msg12 消息流向接收发送的子地址不同而会重复发送多条), 类型可分为 BC→RT、RT→BC、RT→RT, 根据消息周期不同形成消息链表。

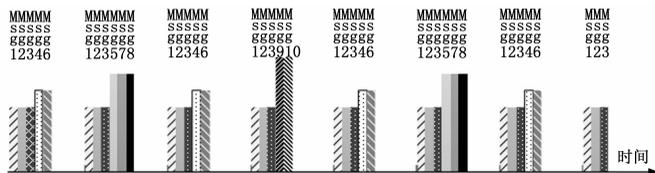


图 10 一次空空火力打击总线消息调度

所有消息传输都在 BC (显示控制管理子系统 DCMS) 的管理下完成, 软件中通过应用层算法模拟传输层的消息调度, 首先计算大小周期分别为 240 ms 和 30 ms, 然后依据优先级 (非周期消息优先级高、周期消息优先级相同)、消息编号、消息周期生成静态总线表, 供 BC 依照表进行调

度^[22]。实现时, 需将生成的总线表配置到 BC BLOCK 并写入板卡中。其中非周期消息需要添加触发条件并定义优先级进行发送, 与实际应用需求一致。

5 个终端系统 RT 也需依次进行发送或接收消息的配置, 需依次分配和配置子地址的 SA BUFFER, 并写入板卡。

4.4.2 综合实验验证

在显示控制管理子系统 BC 界面上, 点击“启动”按钮可启动 DCMS。在各接收 RT 均处于启动状态时, 点击“发射”按钮即可触发非周期消息的发送。通过下拉菜单可依次选择不同消息进行接收并显示到下方消息框中。右侧状态框可对操作过程进行记录, 如图 11 所示。



图 11 综合实验项目 BC 端界面

这里以显示控制管理子系统 (BC) 与雷达子系统 (RT1) 通信为例演示通信结果, 其余子系统过程相似。

雷达子系统 (RT1) 界面如图 12 所示。子系统界面的下拉菜单“选择接收消息”可筛选不同发送端发来的消息。此时选择的是由惯导子系统 (RT3) 发送、雷达子系统 (RT1) 接收的目标跟踪指引消息 Msg6 (消息 RT3_3→RT1_2 中的 3 和 2 代表子地址), 可以发现消息周期约为 60 ms。



图 12 雷达子系统界面接收目标跟踪指引消息

将各子系统之间的所发的第一个大周期 (<240 ms) 进行消息次序统计, 与理论上分析所得的消息次序 (图 10) 一致, 且每条消息的周期与预先设置 (表 1) 一致, 验证了综合实验设置的消息调度算法, 为学员掌握这一难点提供实践手段。同时, 总线监视器上监控到的总线上传输的所有消息, 分析其消息序列和消息中的数据字值, 与总线消息表一致。

综合实验中还模拟了 1553B 总线通讯异常, 仿真了消息延迟重发、总线余度切换和终端下线功能。所实现功能为: 当消息首次传输异常 (状态字响应时间超过 $14 \mu\text{s}$), 则进行一次消息延迟重发; 若重发后恢复正常则认为是偶然故障, 进行弹窗提示; 若首次重发后依然通信异常则将切换到余度线缆重发, 并在控制器端提示。若余度总线切换后发送也出现传输异常, 则调用板卡 API 使终端下线, 并进行弹窗提示。

通过综合实验, 学员将在 1553B 总线单条消息传输的基础上, 学习多条消息的时分制调度策略。通过一个模拟机载应用实例, 彻底掌握抽象的 1553B 总线传输层调度策略, 达到预期的进阶学习效果。

5 结束语

本文结合 1553B 总线通信原理实际教学需求, 通过三类实验项目引导学员层层深入, 有效达到掌握 1553B 总线通信原理的教学目标, 满足深层次、高效率的教学需求。

在软件使用过程中, 将结合新的教学需求不断对其进行优化和迭代。后续可进一步优化界面, 完善各个实验功能, 并可将综合实验中的通信数据设为具有实际意义的物理量, 添加 ICD 转换这一过程。另外, 还将完善各子系统的二级仿真界面, 进一步贴合实战实装, 达到更好的教学效果。

参考文献:

- [1] 周强, 罗志强. 未来一代军用航空电子系统 [J]. 航空电子技术, 2000 (3): 52-58.
- [2] 刘士全, 隗杨, 蔡洁明, 等. 1553B 总线应用发展研究 [J]. 电子与封装, 2013 (12): 12-15.
- [3] 刘国买. 应用型人才培养综合素质和创新能力培养的探讨 [J]. 中国大学教学, 2009 (7): 73-76.
- [4] YAN M, JIANG X X. Research and Implementation of 1553 Bus ManManagement Software Based on BC/BBC Configuration [J]. Microelectronics&Computer, 2003 (1): 56-70.
- [5] 秦生荣. 时分制多路传输数据总线综合技术 [J]. 航空计算技术, 1980 (2): 73-90.
- [12] 杨海清, 芦斌. 基于改进蚁群算法的水下无人机路径规划研究 [J]. 计算机测量与控制, 2020, 28 (10): 5.
- [13] WANG X, SHI H, ZHANG C. Path Planning for Intelligent Parking System Based on Improved Ant Colony Optimization [J]. IEEE Access, 2020 (99): 1.
- [14] 张松灿, 普杰信, 司彦娜, 等. 蚁群算法在移动机器人路径规划中的应用综述 [J]. 计算机工程与应用, 2020, 56 (8): 10-19.
- [15] LI S, YOU X, LIU S. Co-evolutionary Multi-Colony Ant Colony Optimization Based on Adaptive Guidance Mechanism and Its Application [J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2021, 46 (9): 9045-9063.
- [16] 刘中强, 游晓明, 刘升. 启发式强化学习机制的异构双种

- [6] 宾辰忠, 苗克坚. 基于 1553B 总线的实时消息流实现与控制 [J]. 计算机测量与控制, 2005 (9): 967-969.
- [7] 国防科学技术工业委员会. GJB 289A-97. 中华人民共和国国家军用标准—数字式时分制指令/响应型多路传输数据总线 [S]. 北京: 中国标准出版社, 1997.
- [8] 牛茜. 基于 FPGA 的 1553B 总线监测系统的设计 [D]. 太原: 中北大学, 2011.
- [9] 贾绍文, 于潞, 霍立平. 基于 ICD 数据库的 1553B 总线仿真系统设计 [J]. 仪表技术, 2014 (8): 45-47.
- [10] 陈春燕, 杨友超, 张翔, 等. 基于 1553B 总线的飞行器电气综合系统管理设计 [J]. 计算机测量与控制, 2014 (6): 1865-1867.
- [11] 支超有. 机载数据总线技术及其应用 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2009.
- [12] 张浩. 嵌入式 1553B 总线通信卡的设计与研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2008.
- [13] 徐冉, 刘涛. C 编程示例导学 [M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- [14] 卢思岑. 基于系统工程方法的地铁运营维保巡检智能机器人系统的设计与研究 [D]. 深圳: 深圳大学, 2018.
- [15] 叶志玲, 王九龙, 王向晖, 等. 基于分层模型的 1553B 总线通用软件模块的设计及实现 [J]. 计算机测量与控制, 2008 (3): 415-417.
- [16] 张文波. FPGA 的 1553B 总线编码 IP 核设计 [J]. 单片机与嵌入式系统应用, 2018 (1): 23-25.
- [17] 张浩. 嵌入式 1553B 总线通信卡的设计与研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2008.
- [18] 范俊君, 田丰, 杜一, 等. 智能时代人机交互的一些思考 [J]. 中国科学: 信息科学, 2018 (4): 361-375.
- [19] 支超有. 机载数据总线技术及其应用 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2009.
- [20] 王勇. 机载航电总线 [M]. 北京: 中国人民解放军空军装备部, 2019.
- [21] 丛伟, 樊晓光, 南建国. 综合航空电子系统总体技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2015.
- [22] 范祥辉, 赵刚. 一种 1553B 总线表排序优化算法的设计与实现 [J]. 计算机测量与控制, 2015 (6): 2079-2081.
- 群蚁群算法 [J]. 计算机科学与探索, 2020, 14 (3): 460-469.
- [17] 朱宏伟, 游晓明, 刘升. 协同过滤策略的异构双种群蚁群算法 [J]. 计算机科学与探索, 2019, 13 (10): 1754-1767.
- [18] 陈佳, 游晓明, 刘升, 等. 结合信息熵的多种群博奕蚁群算法 [J]. 计算机工程与应用, 2019, 55 (16): 170-178.
- [19] 马飞宇, 瞿中. 基于异构双种群全局视野蚁群算法的移动机器人路径规划研究 [J]. 计算机应用研究, 2022, 39 (6): 1705-1709.
- [20] LEE J. Heterogeneous-ants-based path planner for global path planning of mobile robot applications [J]. International Journal of Control Automation and Systems, 2017, 15 (4): 1754-1769.