

# 基于 DSP 和 HI-6121 的 1553B 远程终端通讯技术研究

张 鹏, 苗晋玲

(凯迈(洛阳)测控有限公司, 河南 洛阳 471009)

**摘要:** 随着 1553B 总线成为航电总线的主要标准, 载荷空间与电源功率有限的无人机, 对 1553B 总线机载设备的小型化、低功耗和低成本提出了更高的要求, 以往的技术方案已无法满足; 通过对 1553B 总线远程终端技术的研究, 结合某型挂飞训练弹的具体要求, 对比国内外多款 1553B 协议芯片的功能、封装尺寸、功耗和价格后, 提出了一种以 DSP (TMS320F2812) 为控制核心, HI-6121 为协议芯片的 1553B 远程终端技术方案, 详细介绍了 HI-6121 的技术特点, 技术方案硬件设计原理和软件设计流程; 该方案已应用于某型挂飞训练弹与导弹模拟器中, 通过了工程阶段和定型阶段的各种性能试验与环境适应性试验, 试验结果表明基于 DSP 和 HI-6121 的远程终端与 1553B 总线控制端的通信稳定、可靠, 满足了无人机机载设备小型化、低功耗和低成本的需求, 可靠性高, 通用性好。

**关键词:** DSP; HI-6121; 1553B; 远程终端

## Study of 1553B bus RT Communication Technology Based on DSP and HI-6121

Zhang Peng, Miao Jinling

(CAMA (Luoyang) Measurement & control Equipments Co., Ltd., Luoyang 471009, China)

**Abstract:** With 1553B bus becoming the main standard of avionics bus, UAVs with limited load space and power supply put higher requirements for the miniaturization, low power consumption and low cost of 1553B bus airborne equipment, which cannot be met by previous technical schemes. Based on the research of 1553B bus remote terminal technology and the specific requirements of a certain type of hanging missile, and comparing the functions, package size, power consumption and price of several 1553B protocol chips at home and abroad, a 1553B remote terminal technology scheme with DSP (TMS320F2812) as the control core and HI-6121 as the protocol chip is proposed. The technical characteristics of HI-6121, system hard technical scheme and flow chart of system software design are introduced in detail. The scheme has been applied to a certain type of hanging missile and missile simulator, and has passed various performance tests and environmental adaptability tests in engineering and modeling stages. The test results show that the communication between remote terminal based on DSP and HI-6121 and 1553B bus control terminal is stable and reliable, which meets the requirements of miniaturization, low power consumption and low cost of UAV-borne equipment, and has high reliability and versatility.

**Keywords:** DSP; HI-6121; 1553B; RT

## 0 引言

随着 GJB1188A-1999《飞机/悬挂物电气连接系统接口要求》在机载航空电子系统中的贯标, MIL-STD-1553B 标准逐渐成为目前航空电子综合系统中信息交换的主要标准。1553B 总线远程终端 (Remote Terminal, RT) 通讯技术也成为航空电子子系统的接口关键技术之一, 其作用是在航空电子子系统和作为 1553B 总线控制器 (Bus Controller, BC) 的航空电子管理系统之间搭建一座桥梁, 使得二者的信息流能够实时、准确和可靠地进行交互。

1553B 总线协议的实现主要有两种方式, 一种是基于单功能或多功能的 1553B 协议芯片实现, 另一种是基于 IP 的 FPGA 实现。地面测控仿真模块从设计的灵活性考虑, 多

使用 FPGA 来实现 1553B 协议; 机载航电设备从可靠性角度考虑, 一般使用协议芯片连接到控制器来完成 1553B 总线协议。国内外多家公司推出了各种不同功能、封装的协议芯片, 能与 DSP、FPGA、ARM 等各种嵌入式器件相连接, 实现 1553B 总线 RT、BC 和 BM 功能。DDC 公司的 BU-61580 是使用最广泛的协议芯片之一, 它功能强大, 但应用复杂, 价格昂贵, 封装也较大, 并不适用于某些对成本和封装体积有较高要求的航空电子设备。而 HOLT 公司单一 RT 功能协议芯片 HI-6121 具有封装小, 价格低, 功能丰富, 接口简单, 使用简便等优点, 能够满足多数航空电子设备的要求, 特别是那些小型化低成本无人机航空电子设备。本文给出了一种基于 DSP 和 HI-6121 的 1553B 远程终端通讯技术方案, 探讨了软硬件设计要点。目前, 该方案已在某型挂飞训练弹与导弹模拟器中应用, 具备一定的应用推广价值。

## 1 1553 总线结构及原理

MIL-STD-1553B 总线 (简称 1553B 总线) 是美国国

收稿日期: 2018-12-23; 修回日期: 2019-02-11。

作者简介: 张 鹏 (1979-), 男, 河南洛阳人, 工程师, 硕士, 主要从事嵌入式技术、测控技术方向的研究。

防部定义的一种军用数据总线标准, 全称为飞机内部时分制命令/响应型多路传输数据总线, 对应我国军标为 GJB289A-1997。它规定了数据总线及其接口电子设备的技术要求<sup>[1]</sup>。

1553B 总线为冗余余度总线型拓扑结构, 具备两个互为冗余的数据通道, 保障了良好的故障隔离和容错性, 具有双向传输特性, 屏蔽双绞线的传输介质; 1 个控制和管理总线消息传输的 BC; 1 个接收总线消息用于监测和记录的总线监控器 (Bus Monitor, BM); 1~30 个作为用户子系统接口的 RT, 结构如图 1 所示<sup>[1-2]</sup>。该总线有 10 种消息格式, 实现了 BC→RT、RT→BC、RT→RT 和各种广播与控制方式指令。每个消息最少有两个消息字, 每个消息字包括 3 个 bit 的同步头、16 个消息 bit 和 1 个奇偶校验 bit, 所有的消息字都采用曼彻斯特 II 码构成<sup>[2-3]</sup>。

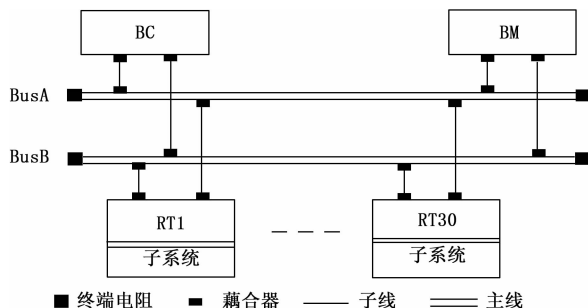


图 1 1553B 多冗余度总线型拓扑结构

## 2 系统硬件设计

## 2.1 HI-6121 的功能与特点

HI-6121 是符合 1553B 协议所有要求的全集成 3.3 V 远程终端器件; 采用 SPI 总线作为主机接口, 方便 MCU、DSP 和 FPGA 等多种处理器连接, 简化了接口电路与时序匹配; 片内  $32\text{K} \times 16\text{bit}$  RAM, 可配置为四种数据缓存模式, 每个子地址收发命令的数据缓存模式都可以独立设置; 内置可编程设置时间精度的 16 位时标计数器, 为 1553B 消息提供实时时标; 优化中断缓存和管理, 最高可缓存 16 个中断申请, 减轻了主机的中断资源开销; 可选上电自 EEPROM 自动初始化配置, 缩小系统软件代码尺寸; PQFP-52 的小型封装, 便于在嵌入式系统中使用<sup>[4]</sup>。

## 2.2 硬件系统实现

硬件电路主要包含控制器与 HI-6121 之间接口电路, 总线耦合电路, 时钟、复位与电源电路和功能扩展电路等 4 个部分, 硬件系统原理如图 2 所示。

### 2.2.1 控制器接口电路设计

选用 TI 公司基于增强型哈佛结构的 32 位 DSP 器件 TMS320F2812 作为核心控制器, 其主频最高可以达到 150 MHz, 具有片内 128K 字 FLASH, 2 个 CPU 定时器, SPI、外部总线接口、UART、ADC 和外部事件管理器等多种外设资源<sup>[5]</sup>。如图 2 所示, 控制器与 HI-6121 之间接口电路

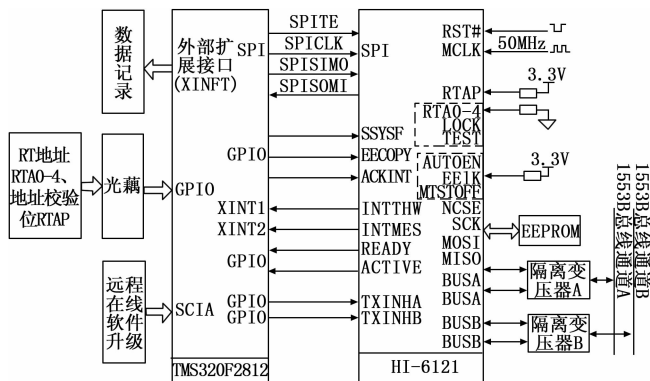


图 2 硬件系统原理图

原理主要如下：

1) HI-6121 作为 SPI 从机, 具备两种 SPI 时序模式: Mode0 (CPHA = 0, CPOL = 0) 和 Mode 3 (CPHA = 1, CPOL = 1), SPI 同步时钟 SCK 最高速率可以达到 40 MHz。本文中 TMS320F2812 作为 SPI 主机采用 SPI 模式 Mode0 与 HI-6121 连接, 从数据传输可靠性角度考虑选择 4 MHz 作为 SCK 频率;

2) HI-6121 的 READY 管脚用于指示内部自检完成或是自初始化完成, DSP 通过 GPIO 检测到 READY 管脚电平变高后, 才能对 HI-6121 进行操作;

3) HI-6121 的 AUTOIEN 和 EE1K 上拉接高电平, 使用芯片的 EEPROM 自初始化配置模式, 上电时芯片自动搬移 EEPROM 地址 0x0~0x3FF 中的数据到芯片内部对应地址中, 主要包括寄存器、非法命令表和描述数据, 可以节约 DSP 的内部 RAM 资源开销; DSP 通过 GPIO 输出宽度不小于 1 ms 的高电平脉冲给 EECOPY 管脚, 使 HI-6121 自动搬移芯片内部 0x0~0x3FF 中的数据到 EEPROM 地址对应地址中;

4) HI-6121 有两个中断输出管脚 INTHW 和 INTMES, 分别连接到 DSP 的两个外部中断, INTHW 用于指示芯片内部 SPI 通讯、时标计数器溢出、RT 地址校验错误、EEPROM 校验错误和 RAM 初始化错误等硬件自身事件, INTMES 用于指示 1553B 消息收发事件, 二者的输出电平状态均可设置。DSP 的 GPIO 连接 HI-6121 管脚 ACKINT, 对接收到的中断作出确认, 以便 HI-6121 释放中断;

5) HI-6121 的 RT 地址既可以由外部信号注入, 也可通过软件配置 RT 地址寄存器来完成。在 RST# 的上升沿将外部 RT 地址信号、RT 地址校验信号和 LOCK 信号锁存, 当 LOCK 信号为高电平时, DSP 就不能再通过软件重新配置 RT 地址。考虑到测试和排故等原因, 更宜采用灵活的软件配置 RT 地址模式。因此, 下拉 LOCK 信号为低电平, 使能 RT 地址寄存器可重配置。RT 地址信号 RTA0~4 和 RT 地址校验信号 RTAP 先通过光耦隔离进入 DSP 进行校验, 作为系统自检工作之一, 再由 DSP 写入 HI-6121 的 RT 地址寄存器, 完成 RT 地址配置;

6) DSP 通过复用 SPI 总线操作板载实时时钟芯片

DS3234, 获得实时时间信息作为接收和发送的 1553B 数据包的绝对时标, 相对时标通过 HI-6121 的时标计数器获得, 精度有  $2\ \mu\text{s}$ 、 $4\ \mu\text{s}$ 、 $8\ \mu\text{s}$ 、 $16\ \mu\text{s}$ 、 $32\ \mu\text{s}$  和  $64\ \mu\text{s}$  等六种, 通过软件配置, 可任选其一;

7) 通过控制 TXINHA 和 TXINHB 管脚, 可以禁止芯片的 BusA 和 BusB 总线传输。通过控制 SSYSF 管脚, 可以置 1553B 状态字中的“SUBSYS”标志位, 向 BC 表明子系统出现了故障。

### 2.2.2 总线耦合电路

1553B 总线的连接方式有两种: 变压器耦合与直接耦合。直接耦合方式适用于不超过 0.3 m 的短距连接。变压器耦合方式适用于不超过 6 m 的长距离<sup>[6]</sup>。无论哪一种, 子系统都需要通过一级隔离变压器进行故障隔离。根据应用要求, HI-6121 与 1553B 总线的连接方式采用变压器耦合方式, 隔离变压器选用 HOLT 公司的 PM-DB2791S, 变压比值为 1: 2.5<sup>[7]</sup>。

### 2.2.3 时钟、复位与电源电路

选用 TI 公司的电源芯片 TPS767D318PWP, 输出 3.3 V 和 1.8 V 两路电源, 其中 3.3 V 作为 DSP 的 IO 供电与其它电路供电, 1.8 V 作为 DSP 的核心供电。TPS767D318PWP 能够在上电时输出延迟时间为 200 ms 的低电平复位信号, 使 DSP 和 HI-6121 能够可靠地上电复位。DSP 时钟选用 30 MHz 的晶体谐振器, 内部倍频为 150 MHz 作为系统时钟; HI-6121 时钟内部无倍频电路, 直接选用 50 MHz 有源晶体振荡器输出的时钟作为系统时钟。

### 2.2.4 功能扩展电路

TMS320F2812 有两个 UART, 其中一个用于远程在线软件升级和实时时钟芯片的校时, 另一个用于与其它功能系统进行数据交互。通过 XINTF 接口, DSP 将收发到的 1553B 消息字写入数据记录模块的 RAM 缓存区, 扩展 1553B 数据记录功能。

## 3 系统软件设计

### 3.1 软件组成

软件系统完成协议芯片及其它功能电路的控制和 1553B 数据的接收、发送和校验处理, 主要包括: HI-6121 底层驱动和初始化, 中断处理与系统工作流程等三个部分。

### 3.2 HI-6121 底层驱动和初始化

#### 3.2.1 地址映射

HI-6121 的功能与状态寄存器和共享 RAM 统一以字为单位映射在 32 K 地址空间,  $0x0000-0x001F$  为功能与状态寄存器映射地址; 其余为共享 RAM 映射地址。包括了数据接收暂存、中断日志、非法命令表、描述表和子地址数据收发缓存。寄存器读写模式为直接地址映射, 共享 RAM 读写模式为指针地址映射。DSP 通过对 HI-6121 的各种寄存器及共享 RAM 进行数据读写操作来完成 1553B 消息字的接收与发送。

#### 3.2.2 主要功能寄存器说明

1) 配置寄存器 1# 和 2#: 用来设置 HI-6121 的总线

收发器的开/关, 中断输出模式, 时标精度、复位和重载, 软复位, 芯片工作开始/停止, 广播消息有效性, 未定义方式字有效性, RT→RT 超时等;

2) 操作状态寄存器: 主要用于 RT 地址和校验位读写及锁定;

3) 最新命令字寄存器: 存放消息中断的最新消息命令字;

4) 最新控制字地址寄存器: 存放消息中断的消息控制字在内存中所在地址, 使主机可以通过该地址读取芯片缓存中 1553B 消息数据字和状态字;

5) 内存地址指针寄存器: HI-6121 的内存  $0x0-0xF$  地址可以直接访问, 其余地址通过内存地址指针间接访问;

6) 描述表基地址寄存器: 设置描述表的起始地址;

7) 1553 状态字位设置寄存器: 设置/读取 RT 状态;

8) 中断使能寄存器: 对各种中断源进行使能或是禁止;

9) 时标寄存器: 读取该时刻的绝对时标值。

#### 3.2.3 HI-6121 初始化步骤<sup>[8]</sup>

系统上电复位后, 通过设置相应的功能寄存器来初始化 HI-6121 的基本工作模式, 配置子地址描述表来设置合法消息处理机制, 配置非法命令描述表来设置非法消息处理机制。初始化步骤如下, 在实际应用中可根据具体情况删减和更改。

1) 读取 READY 信号, 到 READY 变高后, DSP 才能对 HI-6121 进行读写操作。

2) 建立描述表: 描述表定义了 RT 终端对有效命令的响应, 由 4 部分组成, 分别是子地址接收消息描述块、子地址发送消息描述块、接收方式命令消息描述块、发送方式代码消息描述块。每个消息描述块都有 128 字, 分为 32 个 4 字组 (1 个控制字和 3 个描述字)。子地址接收消息描述块的控制字设置该子地址接收消息数据的缓冲模式、是否产生中断、是否为合法命令等。芯片共有 4 种数据缓存模式: 单消息模式、乒乓模式、循环 1 模式、循环 2 模式。3 个描述字根据缓存模式不同而放置相应的地址指针, 本文选择发送数据缓存模式为单消息模式, 描述字 2 为消息指针, 描述字 3 为 0, 描述字 4 为广播消息指针。接收数据缓存模式为乒乓模式, 描述字 2 为数据区 A 指针, 描述字 3 为数据区 B 指针, 描述字 4 为广播消息指针。中断模式设置为消息中断。未用于子地址的控制字和 3 个描述字都置 0, 设置为非法命令。

3) 建立非法命令表: HI-6121 通过 256 个字的非法命令表来实现非法消息命令的设置和检查, 分为广播接收命令设置块、广播发送命令设置块、子地址接收命令设置块、子地址发送命令设置块。每条收发命令和方式命令都有两个控制字, 共 32bit, 代表了 32 个数据字的合法性, ‘0’ 为合法, ‘1’ 为非法。非法命令检测是一个可选过程。当不使用非法的命令检测时, 终端对所有有效的命令字都进行响应, 回复传输状态字并处理命令字中定义的数据字数。

当不使用非法命令检测时,BC无法根据RT终端的传输响应判断命令是合法的还是非法的。

4) DSP通过GPIO读取RT地址和RT地址校验位,校验后写入操作状态寄存器并锁定。

5) 设置配置寄存器1#,禁止芯片工作,设置时标计数器精度,选择兼容1553B NOTICE2协议,选择方式命令处理流程简化模式。

6) 设置配置寄存器2#,选择RT-RT超时时间,装载时标计数器,选择方式命令消息处理模式;

7) 根据实际需要设置中断使能寄存器;

8) 根据配置寄存器2#中的“MCOPT4”位逻辑值来配置BusA/B选择寄存器,用于执行方式命令中的“selected transmitter” shutdown和override两项命令;

9) 设置自检模式和测试控制模式;

10) 将描述表和非法表写入HI-6121的共享内存;

11) 配置寄存器1#的“STEX”置位,芯片开始工作。

如前文所述,HI-6121初始化模式有主机配置和EEPROM配置两种模式,初始化步骤基本一致。不同在于,主机配置时初始化步骤放在系统软件中,由DSP完成功能寄存器和共享RAM的数据写入;而本文选择的EEPROM配置,初始化步骤是独立的软件,步骤11)改为给EEPCOPY管脚一个大于1ms的脉冲信号,触发HI-6121将数据写入EEPROM。在系统软件中完成RT地址重新配置,并使能芯片开始工作。

### 3.2.4 SPI总线传输过程中的中断处理

HI-6121采取指针方式对0xF以上的地址进行寻址。如果在SPI数据传输过程中,有事件触发DSP中断,系统软件转入中断服务子程序对HI-6121进行读写操作,将更改指针数据,从而影响了中断前正在进行的SPI数据传输。因此,进入中断服务子程序后必须先将HI-6121指针寄存器的数值暂存,中断服务子程序结束前将指针寄存器的数值还原,避免指针跑飞造成器件功能异常。

### 3.3 系统工作流程

系统工作流程采用模块化设计,如图3所示,主要包括初始化模块、中断处理模块、数据接收模块和数据发送模块。

初始化模块: DSP自身初始化,然后等待HI-6121自初始化完成后,完成RT地址重新配置,并使能芯片开始工作。开启外部中断等待1553B消息中断;

中断处理模块: 读取当前中断消息的命令字(地址0x03)和信息字映射地址(地址0x0A)放入1553B消息命令堆栈,并使堆栈指针递增,堆栈深度可根据具体情况设置。

数据接收模块: 主程序根据堆栈指针判断堆栈中是否有未处理的1553B消息,根据1553B消息命令字解析子地址、T/R、数据个数。如果是“接收”命令字则根据信息字映射地址和数据个数来读取HI-6121共享内存中缓存的数据;如果是“发送”命令字,则表明BC取走的HI-6121共享内存中该子地址的数据。

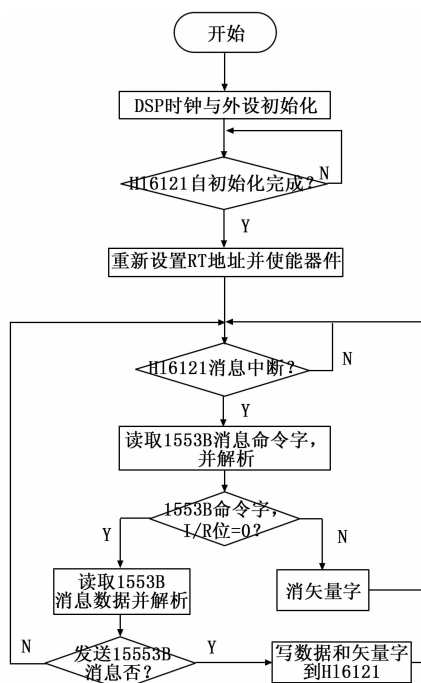


图3 系统软件设计流程

数据发送模块: 将准备好的数据写入子地址对应的HI-6121共享内存区间,根据GJB1188A的规定,置位子地址对应的矢量字位,并将矢量字写入对应的HI-6121共享RAM相应地址。BC收到矢量字后,按照矢量字位下发RT发送命令,HI-6121接收到命令后自动将数据上传给BC<sup>[9]</sup>。

## 4 测试与验证

### 4.1 测试环境

根据上文所述的技术方案设计了1553B总线远程终端通讯板卡。根据图1的总线架构,选用GE公司CPCI总线1553B板卡作为1553B总线BC,本文设计的通讯板卡作为1553B总线RT,使用1553专用线、2个盒式耦合器和78欧姆终端匹配电阻构建双通道测试环境,进行消息收发测试。主要包括BC与RT之间的消息收发测试、方式代码测试和双冗余通道测试三种<sup>[10]</sup>。

### 4.2 BC与RT之间的消息收发测试

1) BC向RT发出命令字(接收)+4个数据字,RT回复1个状态字,DSP得到的数据与GE板卡发出的数据一致,RT端波形如图4所示。

2) BC向RT发出命令字(发送),RT回复4个数据字+1个状态字,GE板卡得到的数据与DSP设置的数据一致,RT端波形如图5所示。

### 4.3 方式代码测试

BC向RT发出方式代码(查询矢量字),RT回复1个矢量字+1个状态字,GE板卡得到的数据与DSP设置的数据一致,RT端波形如图6所示。

### 4.4 双冗余通道测试

双冗余通道是1553B总线可靠性保障之一,BusA作为主通道,BusB为冗余备份通道。测试时,从盒式耦合器端



图 4 RT 接收消息波形

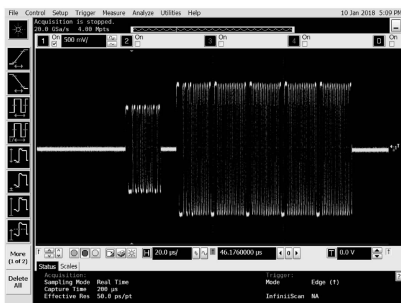


图 5 RT 发送消息波形

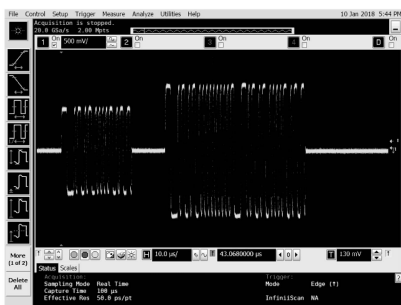


图 6 查询矢量字波形

将 BusA 通道断开或将 BusB 通道断开, 重复进行上述的 BC 与 RT 之间的消息收发测试、方式指令测试, 通讯板均能正常接收 (上接第 158 页)

实验结果表明, 基于文中的关键技术设计开发的虚拟维修培训系统基本满足了维修培训的需要。通过对虚拟维修培训系统应用避免了采用实装训练成本高、风险大、周期长等缺点, 显著提高了训练效果, 节省了训练经费。本系统的实现方法具备一定的通用性。同时在分布式协同虚拟维修训练以及维修训练过程智能评估方面应进行更进一步的研究。

#### 参考文献:

- [1] 梅朝, 舒涛, 宋涛, 等. 武器装备虚拟维修训练系统设计 [J]. 火力与指挥控制, 2016, 41 (9): 151-154.
- [2] 张王卫, 苏群星, 刘鹏远, 等. 面向装备维修的虚拟拆卸系统关键技术研究 [J]. 系统仿真学报, 2013, 12 (25): 2879-2884.
- [3] 任毅. 飞机维修机械组件拆装过程训练评估模型研究 [J].

常工作, 数据收发正确。

## 5 结束语

本文主要介绍了一种小型化、低成本的 1553B 总线远程终端设计、实现、测试与验证, 以 TMS320F2812 为控制器, 以 HI-6121 为 1553B 协议芯片, 简化了硬件与软件的设计, 可以使电子设备快速接入 1553B 总线。该通讯板已批量应用在某小型航空制导炸弹挂飞训练弹及导弹模拟器项目中, 通过试验室试验、环境适应性试验和外场挂飞试验, 系统工作正常, 具备良好的可靠性, 在 1553 总线设备的小型化, 低成本等方面具有一定的参考价值。

#### 参考文献:

- [1] 杨伟为, 杨萍. 基于 BU-64843 的 MIL-STD-1553B 总线远程终端的设计 [J]. 计算机测量与控制, 2015, 23 (11): 3837-3838, 3852.
- [2] 中国航空工业总公司. GJB289A-1997 数字式时分制指令/响应型多路传输数据总线 [S]. 北京: 国防科学技术工业委员会, 1997.
- [3] 支超有, 唐长红. 机载数据总线技术及其应用 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2009.
- [4] HOLT integrated circuits inc. HI-6121 DataSheet [EB/OL]. <http://www.holtic.com>. 2017-11-22.
- [5] 王瑞平, 彭云峰. 基 DSP 嵌入式数据采集与处理系统设计与实现 [J]. 计算机测量与控制, 2014, 22 (6): 1932-1934.
- [6] 李昊, 管立琼, 张莹. 基于 HI-6130 的 1553B 总线远程终端设计 [J]. 兵工自动化, 2016, 35 (5): 29-32.
- [7] HOLT integrated circuits inc. MIL-STD-1553 data bus interface transformers Data Sheet [EB/OL]. <http://www.holtic.com>. 2012-12.
- [8] HOLT integrated circuits inc. AN-HI-6120 [EB/OL]. <http://www.holtic.com>. 2011-5-20.
- [9] 贾金艳, 陈海峰, 丁炳源, 等. 弹内高速 1553B 总线 RT 端软件设计与应用 [J]. 计算机测量与控制, 2016, 24 (1): 162-164, 167.
- [4] 张青, 赵洪利, 郭庆, 等. 航空发动机虚拟装配培训实验平台的构建与实现 [J]. 实验室研究与探索, 2016, 35 (5): 97-100.
- [5] 李昂, 宗磊. 基于 Post Engineer 虚拟仿真平台的舰艇导航装备虚拟保障研究 [J]. 舰船电子工程, 2016, 267 (9): 66-69.
- [6] 龚健虎, 军车发动机组装配件规划模型设计仿真 [J]. 计算机仿真, 2016, 33 (4): 44.
- [7] 马立元, 董博, 刘鹏远, 基于同步网的虚拟拆卸过程建模方法研究 [J]. 系统仿真学报, 2012, 24 (3): 541-545.
- [8] 张王卫, 苏群星, 刘鹏远, 虚拟维修拆卸序列规划方法研究 [J]. 计算机仿真, 2013, 30 (6): 115-120.
- [9] 贾晨星, 朱元昌, 装备虚拟操作训练的过程建模方法研究 [J]. 计算机测量与控制, 2011, 19 (12): 3102-3104.
- [10] 尚洁, 容晓峰, 徐兴华, 基于 PERT 图的虚拟拆装过程建模 [J]. 计算机与数字工程, 2011, 39 (3): 151-154.