

FC-AE-1553 在飞机/悬挂物通用接口中的应用

史岩华, 曹素芝, 房亮, 吴少俊, 曹丽剑
(中国科学院空间应用工程与技术中心, 北京 100094)

摘要: 介绍了 FC-AE-1553 光纤总线在飞机/悬挂物通用接口中的具体应用, 将通用数据接口速率从 1 Mb/s 提升至 2 Gb/s, 以适应未来武器系统不断发展的海量数据传输需求。通过开发光纤通道(FC)接口卡并搭建交换式 FC-AE-1553 验证系统, 实现了 SAE AS5653 标准(高速 1760 接口)规定的命令控制和文件传输功能。验证系统的网络延迟小、响应速度快, 有助于推进 FC-AE-1553 技术在飞机/悬挂物通用接口及其他航空航天领域的应用。

关键词: 飞机/悬挂物接口; 光纤通信; FC-AE-1553; SAE AS5653

中图分类号: V271.4; TP336 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2014)12-0090-04

Application of FC-AE-1553 in Aircraft/Store Interface

SHI Yan-hua, CAO Su-zhi, FANG Liang, WU Shao-jun, CAO Li-jian

(Technology and Engineering Center for Space Utilization, Chinese Academy of Science, Beijing 100094, China)

Abstract: The specific application of FC-AE-1553 in aircraft/store interface is introduced. It can improve the communication rate of data interface from 1 Mb/s to 2 Gb/s to satisfy the need of mass data transmission in future weapon system. A Fiber Channel (FC) interface card was designed and an FC-AE-1553 verification system based on switched fabric topology was built up. The command control and file transfer functions specified in SAE AS5653 (high-speed 1760 interface) were realized with small network latency and fast response rate. The verification system will promote the application of FC-AE-1553 in aircraft/store interface and other aviation and aerospace fields.

Key words: aircraft/store interface; fiber channel; FC-AE-1553; SAE AS5653

0 引言

随着航空技术的迅速发展,飞机/悬挂物之间的数据传输也变得越来越复杂。现行的飞机/悬挂物通用接口标准 MIL-STD-1760 体系中,采用 MIL-STD-1553B 总线作为数据传输基础,通信容量和速率受到很大限制,不能满足未来悬挂物的要求,因此有必要研究新的高速数据总线。

光纤通道(Fiber Channel, FC)具备高带宽、低延迟、拓扑灵活、支持多种上层协议等优点,已成为新一代先进综合式航空电子系统网络互联的首选方案^[1]。FC-AE-1553 协议兼具光纤通道的优良网络性能和传统 1553 总线的通信优势,能实现协议的平滑过渡。2008 年 SAE AS-1A2 工作组发布的 SAE AS5653 标准中,将 FC-AE-1553 协议应用于飞机/悬挂物之间的文件传输和命令控制,大大提升了传输速率,代表了飞机悬挂系统网

络技术发展的最新趋势。

本文在研究 SAE AS5653 标准的基础上,对 FC-AE-1553 技术应用于飞机/悬挂物接口系统的具体形式和结构进行分析设计,利用自研 FC 接口卡和商用交换机搭建了 FC-AE-1553 验证系统,对 SAE AS5653 标准规定的数据传输功能进行了测试与验证。

1 飞机/悬挂物通用接口发展简介

为了提高飞机/悬挂物之间的互用性,从 1980 年开始,美国海、空军联合拟定了 MIL-STD-1760《飞机/悬挂物电气连接系统》军用标准,在物理特性、电气特性和逻辑特性三方面规定了通用飞机悬挂物系统与悬挂物之间的接口^[2]。目前,美军的各种作战平台都采用了符合 MIL-STD-1760 标准的接口。我国对应标准是 GJB 1188A《飞机/悬挂物电器连接系统接口要求》,规定了飞机/悬挂物电气(和光纤)连接系统(AEIS)在飞机和悬挂物中的实施要求,为悬挂物在飞机上的工作提供了通用的接口能力^[3]。

MIL-STD-1760 系列标准极大地促进了飞机/悬挂

物的互用性,但仍存在一些不足。通信接口方面,由于采用的 MIL-STD-1553B 总线传输速率仅为 1 Mb/s,不能适应未来武器系统的海量数据传输需求^[4],需要对标准体系进行进一步补充和完善。SAE AS5653 标准引入了 FC-AE-1553 协议,为高速通信接口提供了解决方案,而国内尚没有对应的标准和产品。据报道,美国 DDC 公司推出了 FC-752XX 系列板卡,可用于地面测试,但不支持嵌入式应用,且接口兼容性较差。

2 SAE AS5653 标准特性

FC-AE-1553 协议将光纤通道技术与 MIL-STD-1553B 总线进行结合,提供了更高的带宽,每条消息传输数据量更大,因此有“吉比特的 1553”之称^[5]。文献[6]详细描述了 FC-AE-1553 的网络组成、帧格式、对 MIL-STD-1553B 总线的桥接扩展等,但并未对其应用环境进行约束。SAE AS5653 标准对 FC-AE-1553 协议的部分特性进行了规定,使其更适应飞机/悬挂物通用接口标准的实施。

2.1 网络拓扑

FC-AE-1553 适应的拓扑结构包括仲裁环,交换式及其组合式。仲裁环结构不能满足武器系统数据传输的高确定性和可靠性,因此,SAE AS5653 标准规定飞机/悬挂物通信接口采用交换拓扑形式。

2.2 光纤通道协议约束

根据文献[7],光纤通道协议共划分为 5 层,FC-AE-1553 是 FC-4 层协议的一个分支,具体实现需要 FC-0 到 FC-3 层的支持。为使 FC-AE-1553 更适用于飞机悬挂系统的数据通信,SAE AS5653 对光纤通道各层协议进行了约束^[8]。

1) FC-AE-1553 层,支持 NC-to-NT 的命令传输、突发模式传输,不支持多播、NC 监控以及广播回复。

2) FC-3 扩展链路服务层,规定必须完成显式架构登录 (Fabric Login, FLOGI) 和端口登录 (Port Login, PLOGI) 才能进行数据交换,而对于 FC-AE-1553 要求的进程登录 (Process Login, PRLI) 使用隐式方式。SAE AS5653 对登录参数进行了详细规定,并要求显式登录过程必须在上电 150 ms 内完成。

3) FC-2 交换和帧管理层,仅支持第 3 类服务,不支持优先级管理,由交换机进行节点 ID 分配。

4) FC-1 编码层不做特殊约束。

5) FC-0 物理层使用 75 Ω 的同轴电缆作为传输介质,接口速率为 1.0625 Gb/s。

2.3 数据传输

2.3.1 命令控制功能

SAE AS5653 的命令控制功能直接参照 MIL-STD-

1553B 消息格式,包括 NC-to-NT, NT-to-NC, NT-to-NT 的命令传输、方式命令以及广播支持。标准规定将子地址“0x00000001”到“0x0000001E”专用于命令控制类交换,传输的最大数据量为 64 B(32 个数据字),实现与 MIL-STD-1553B 总线字格式的一一对应。

2.3.2 文件传输功能

FC-AE-1553 的命令帧将字计数空间从 MIL-STD-1553B 的 5 bit 扩展到了 32 bit,因此,理论上每个交换最多能够传输 4.3 GB 的数据,对大文件传输提供了更好的支持。

SAE AS5653 规定在进行 NC-to-NT 或 NT-to-NT 的文件传输时,使用突发模式,将命令帧的 NT Burst Size Request 置“1”。大文件被划分为若干数据序列进行传送,每个数据序列均需要一个状态序列进行确认,防止接收端溢出。

3 FC-AE-1553 验证系统设计

本文在分析研究 FC-AE-1553 协议的基础上,开发了 FC 接口卡,实现了 NC 与 NT 节点功能,通过与 Brocade 交换机 BR-320-0008 进行互联,实现并验证了 SAE AS5653 的数据传输功能,相对于 DDC 的产品板卡具有更好的兼容性与灵活性。

3.1 FC 接口卡设计

FC 接口卡的功能如图 1 所示,总体设计划分为 3 个层次:底层收发、协议栈和应用层,硬件采用 FPGA + CPU 架构实现。

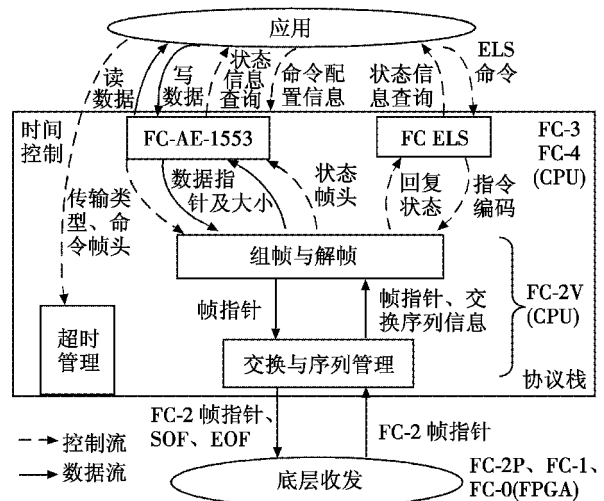


图 1 FC 接口卡功能框图

Fig. 1 Functional diagram of FC interface card

FPGA 选取 Xilinx 的 Virtex 5 系列 XC5VFX100T 完成底层收发部分,包括物理层模块、8 B/10 B 编解码、FC 端口状态机、有序集检测以及缓冲到缓冲流控等功能。CPU 选取 Freescale 的 MPC8536AVTAQG,移植 VxWorks

6.6 操作系统,实现协议栈和应用层部分,包括 FC-2 层交换管理、FC-3 层 ELS 命令以及 FC-AE-1553 层数传等功能。FPGA 和 CPU 通过 PCIe 总线进行通信。物理层使用光纤代替同轴电缆,将数据速率从 SAE AS5653 规定的 1 Gb/s 进一步提升至 2 Gb/s。

3.2 FC-AE-1553 通信过程设计

FC-AE-1553 验证系统通信过程包含 3 步:链路同步、接口卡登录和 FC-AE-1553 数据传输。设备上电后,接口卡与交换机首先互相发送原语信号实现链路同步,即 FC 端口状态机处于激活状态^[9];其次,接口卡与交换机、接口卡与接口卡之间进行登录,互相交换通信参数,建立通信环境;最后,接口卡与接口卡之间进行数据传输。登录与数据传输过程见下文详细分析。

3.2.1 登录注册流程

图 2 所示为 NC 接口卡的显式登录过程。光纤设备通过登录来获得与其通信的设备的相关参数,登录流程划分为交换机登录、端口登录和进程登录 3 个部分^[10],其中,交换机登录和端口登录是正常进行光纤通信的前提,进程登录是建立 FC-AE-1553 通信环境的必要条件。FC 接口卡支持显式和隐式登录,用户可自主进行配置。

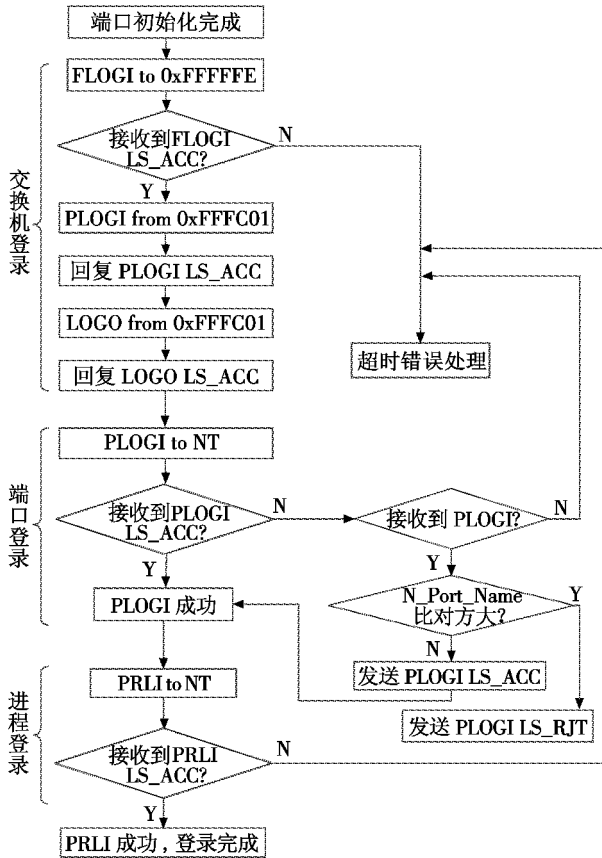


图 2 NC 接口卡显式登录流程图

Fig. 2 Explicit login procedure of NC interface card

3.2.2 数据传输

1) 命令控制功能。

SAE AS5653 命令控制功能包括 NC-to-NT 指令、模式命令、广播等传输模式。以 NC-to-NT 指令进行说明,NC 处理流程如图 3 所示。NC 向 NT 的子地址 30 发送单帧命令序列,包含 60 B 递增数据,NT 回复状态序列完成交换。

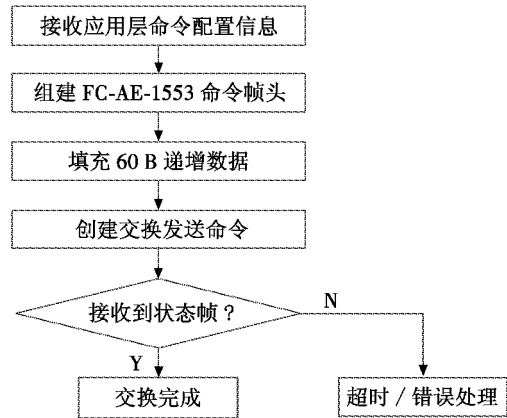


图 3 NC-to-NT 命令控制 (NC) 流程图

Fig. 3 Command control procedure of NC in NC-to-NT

2) 文件传输功能。

图 4 所示为 NC-to-NT 文件传输中 NC 处理流程。NC 的命令序列通知 NT 需要传输的文件大小为 1 MB, NT 在其回复的状态序列中提示其能接收的序列最大数据量为 16 kB。NC 据此将待发送文件进行划分,第一个数据序列传输 16 kB,共 8 个数据帧(每个帧 2 kB)。之后的每个数据序列都需要一个状态序列的确认,告知下一个序列允许传输的字节数,调节接收速度。NT 接收 1 MB 数据后回复最后一个状态序列,指示交换完成。

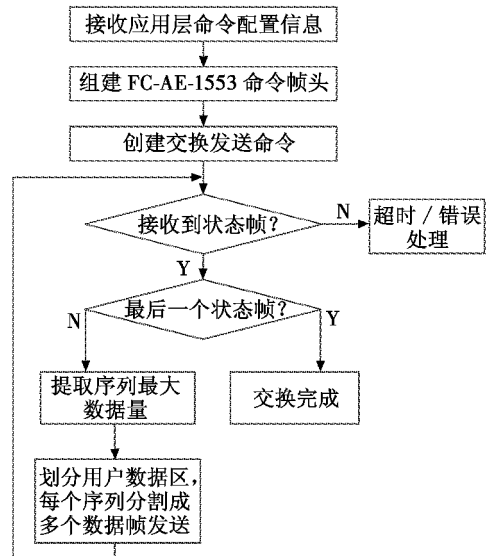


图 4 NC-to-NT 文件传输 (NC) 流程图

Fig. 4 File transfer procedure of NC in NC-to-NT

3.3 验证分析

使用 Lecroy 的 FC 协议分析仪对光纤链路的通信过程和数据帧进行分析,图 5 为与交换机的登录过程,向 F_PORT 0xFFFFFE 端口发起登录请求以及向管理 N 端口 0xFFFC01 注册完成后,FC 接口卡可通过交换机与其他接口卡进行通信。

Relative Time	S_Lb	D_Lb	Frame	Frame	Command
0 (ns)	000000	F_PORT	ELS_REQUEST		0x04_FLOGI
496.105 (us)				R_RDY	
520.127 (us)	F_PORT	010000		ELS_REPLY	0x04_FLOGI
977 (ns)			R_RDY		
1.012.280.250 (s)	FFFC01	010000		ELS_REQUEST	0x03_FLOGI
961 (ns)			R_RDY		
233.108 (us)	010000	FFFC01		ELS_REPLY	0x03_FLOGI
1.694.108 (ms)	FFFC01	010000		ELS_REQUEST	0x20_PRLI
968 (ns)			R_RDY		
7.113.017 (ms)				R_RDY	
930 (ns)	010000	FFFC01		ELS_REPLY	0x20_PRLI
1.331.670 (ms)	FFFC01	010000		ELS_REQUEST	0x05_LOG0
961 (ns)			R_RDY		
8.757.608 (ms)				R_RDY	
934 (ns)	010000	FFFC01		ELS_REPLY	0x05_LOG0
9.938.652 (ms)				R_RDY	

图 5 交换机登录过程

Fig.5 Procedure of switch login

图 6 显示了文件传输功能中第一个数据序列与状态序列的交换过程。从图中可以看出,状态响应延迟 T_1 在 $4 \mu s$ 内,数据帧之间的延迟 T_2 约为 $20 \mu s$,具备良好的网络实时性能。

T_1	704.490(us)	AE1553_CMD	
	2.378(us)		R_RDY
	338(ns)		AE1553_STATUS
	1.722(us)		R_RDY
T_2	5.232(us)	AE1553_DATA	
	19.842(us)	AE1553_DATA	
	6.064(us)		R_RDY
	13.774(us)	AE1553_DATA	
	6.030(us)		R_RDY
	13.808(us)	AE1553_DATA	
	6.030(us)		R_RDY
	13.812(us)	AE1553_DATA	
	6.030(us)		R_RDY
	13.808(us)	AE1553_DATA	
	6.030(us)		R_RDY
	13.808(us)	AE1553_DATA	
	6.030(us)		R_RDY
	13.812(us)	AE1553_DATA	
6.030(us)		R_RDY	
19.838(us)		R_RDY	
377(ns)		AE1553_STATUS	
1.722(us)		R_RDY	

图 6 FC-AE-1553 文件传输过程

Fig.6 Procedure of FC-AE-1553 file transfer

实验表明,FC 接口卡在 2 Gb/s 传输速率下,能够成功与交换机互联,完成 ELS 命令和 FC-AE-1553 数传功能,传输帧格式符合协议规定,响应速度快。

4 结束语

为了适应飞机/悬挂物之间的通信需求,本文对 SAE AS5653 标准进行分析,并通过搭建验证系统实现了登录、命令控制以及文件传输功能。FC-AE-1553 具备优良的通信性能,能够满足未来飞机/悬挂物系统对高速数据总线的需求,我国应加快制定相应的替换标准。同时,将 FC-AE-1553 技术推广到航空航天领域也

有十分广阔的应用前景。

参考文献

- [1] 张志,翟正军,李想. 航空电子光纤通道协议分析与接口卡设计[J]. 测控技术,2010,29(2):99-101. ZHANG Z, ZHAI Z J, LI X. Protocol anyalysis and interface board design of avionics fibre channel[J]. Measurement & Control Technology, 2010, 29(2):99-101.
- [2] 彭志专,冯金富,鲁卿,等. 飞机/悬挂物电气接口标准发展方向探讨[J]. 光电与控制,2008,15(4):59-62. PENG Z Z, FENG J F, LU Q, et al. A survey on the development of aircraft/store electrical interface standard[J]. Electronics Optics & Control, 2008, 15(4):59-62.
- [3] 黄浩. 总线接口发控系统研究[J]. 航空兵器, 2005(4):47-51. HUANG H. Study on launch-control system with bus interface[J]. Aero Weaponry, 2005(4):47-51.
- [4] 王旭峰,丁其伯,舒振杰. 即插即用武器集成及其相关标准体系初探[J]. 航空标准化与质量,2009(4):4-8. WANG X F, DING Q B, SHU Z J. Preliminary research on plug-and-play weapon system and related standards[J]. Aeronautic Standardization and Quality, 2009(4):4-8.
- [5] 曹素芝,张善从. FC-AE-1553 高级特性介绍[J]. 光通信技术,2010(2):49-51. CAO S Z, ZHANG S C. Analysis on advanced features of FC-AE-1553 [J]. Optical Communication Technology, 2010(2):49-51.
- [6] ANSI INCITS. Fibre channel avionics environment-upper layer protocol MIL-STD-1553B notice 2[S/OL]. [2013-12-20]. http://www.neits.org.archive/2003/in_03106_FC_AE_1553_03-308v1.pdf.
- [7] ANSI INCITS. Fibre Channel-Framing and Signaling-3 (FC-FS-3)[S]. New York: American National Standards Institute, 2008.
- [8] SAE Aerospace. High speed network for MIL-STD-1760 [S]. Phliadelphia: Document Automation and Production Service, 2008.
- [9] 黄浩益,黄栋杉,徐晓飞. 光纤通道技术在航电系统中的应用[J]. 航空电子技术,2005,36(3):9-14. HUANG H Y, HUANG D S, XU X F. An application of fibre channel technology to avionics system[J]. Avionics Technology, 2005, 36(3):9-14.
- [10] 乔家庆,冯收,凤雷,等. 光纤交换网络中设备登录服务的研究与实现[J]. 测试技术学报,2012,26(6):483-488. QIAO J Q, FENG S, FENG L, et al. Study and implementation of login services for fibre channel devices in switch fabric network [J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2012, 26(6):483-488.