

引用格式:王世奎,张利洲,焦龙.飞机悬挂物 FC 网络标准研究与关键技术分析[J].电光与控制,2017,24(9):50-53. WANG S K, ZHANG L Z, JIAO L. FC network standard of aircraft/store and the key technologies[J]. Electronics Optics & Control, 2017, 24(9):50-53.

飞机悬挂物 FC 网络标准研究与关键技术分析

王世奎, 张利洲, 焦龙

(中国航空工业集团公司西安航空计算技术研究所,西安 710065)

摘要:为提高飞机的武器装备作战能力,FC网络将应用于未来飞机悬挂物系统的高速上下行通信。说明了飞机悬挂物 FC 网络标准(AS5653)与 FC-AE-1553,FC-AV,FC-FS,FC-SW 等标准的关系,研究了飞机悬挂物 FC 网络标准的组成和主要技术要求。分析了飞机悬挂物 FC 网络设计中的拓扑与端口规划、通信模式、网络初始化、高层协议设计等主要关键技术,为飞机悬挂物高速 FC 通信网络的研发奠定基础。

关键词:飞机悬挂物;网络通信标准;FC网络;FC-AE-1553;AS5653;通信模式

中图分类号: V271.4 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-637X.2017.09.011

FC Network Standard of Aircraft/Store and the Key Technologies

WANG Shi-kui, ZHANG Li-zhou, JIAO Long

(Aeronautical Computing Technique Research Institute, AVIC, Xi'an 710065, China)

Abstract: In order to improve the operational capability of aircraft weapon, FC network shall be applied in high speed up/down communication paths of the aircraft/store. The relations of FC network standard of Aircraft/Store (AS5653) with FC-AE-1553, FC-AV, FC-FS, and FC-SW are presented. The composition and main technical requirements of AS5653 are studied. The key technologies in aircraft/store FC network design, including network topology and port layout, communication modes, network initialization and high-level protocol, are also analyzed, which can be taken as a reference for development of FC network in aircraft/store.

Key words: aircraft/store; network communication standard; FC network; FC-AE-1553; AS5653; communication mode

0 引言

传统的 MIL-STD-1760 飞机武器悬挂物系统,通过运用 1553B 总线提高了飞机的作战能力,但随着航空武器性能的快速发展,仅 1553B 总线作为武器悬挂物系统的通信总线已阻碍了战技能力的提高。近年来,美国空军已将飞机、悬挂物管理系统与武器挂点之间的高速信息通信作为研究计划中的一个重点。随着机载网络通信技术尤其是航空电子环境光纤通道网络(FC-AE)的成功应用,2007 年美国军方在 MIL-STD-1760E 中提出了飞机悬挂物上下行高速通信中采用 FC 网络的要求^[1]。美国 SAE 组织针对 MIL-STD-1760E 要求选择基于 FC-

AE-1553 协议,在 2008 年颁布了针对飞机悬挂物的 FC 高速网络通信标准 AS5653^[2]。据报道,美国在 RF-22 等型号飞机武器系统上采用 AS5653 协议组建高带宽的 FC 网络,提高了作战和侦察能力,2011 年以来,美国的 ATT,DDC 等公司也相继公布了满足 AS5653,1760E 标准的相关 FC 网络节点模块和交换机产品。SAE 组织分别于 2012 年和 2014 年修订 AS5653 并升级为 AS5653A 和 AS5653B,由此可见,国外正开展对飞机悬挂物新型高速 FC 网络的协议研究工作。

本文综合 FC-AE-1553,FC-FS 等基础标准和 1760E 顶层标准,分析了 AS5653B 标准与其他标准的关系,研究了飞机悬挂物高速 FC 网络标准的组成和技术要素。为开展飞机悬挂物高速 FC 网络的设计,本文分析了飞机悬挂物系统 FC 网络在拓扑与端口规划、物理层特性分析、网络设备注册与初始化、高层通信模式与协议设计等关键技术,为研制满足 AS5653B 标准要求的新型飞

收稿日期:2016-09-05 修回日期:2017-05-28

基金项目:航空科学基金(2014ZC31002)

作者简介:王世奎(1965—),男,山西运城人,硕士,研究员,研究方向为机载网络与总线通信技术。

机悬挂物高速 FC 通信网络奠定了基础。

1 飞机悬挂物 FC 网络的优势

虽然在 MIL-STD-1760A/B/C/D 等飞机武器悬挂物系统中,大量运用了 1553B 总线,提高了飞机的作战性能,但随着武器性能指标的提高、挂点数量的扩展、即插即用应用模式的出现、网络化作战需求等发展,1553B 总线作为武器系统通信网络,已出现了性能不足,无法满足新型飞机与高性能武器系统之间的通信要求。应运而生的 MIL-STD-1760E 选择了 FC 技术,在 AS5653B 标准中提出了可行的解决方案。

飞机悬挂物系统通过采用 AS5653B 高带宽 FC 网络,能够解决传统的 1553B 总线存在的以下不足。

1) 适应任务的业务模式受限。1553B 总线只能满足 MIL-STD-1760A/B/C/D 和 MIL-STD-1760E 的 II 类的飞机挂点接口(ASI)、运载悬挂物接口(CSI)、运载悬挂物挂点接口(CSSI)、任务悬挂物接口(MSI)的要求,支持指令、状态等信息的业务服务,无法全面覆盖 MIL-STD-1760E 的 I 类的 ASI,CSI,CSSI 和 MSI 对传输文件、图像及语音等高带宽通信任务的要求;采用 FC 网络,能够全面覆盖 1760E 的 I 类的所有通信需求。

2) 与航电系统网络适配性不好。1553B 武器总线与综合模块化航电系统的 FC 主干网络协议差距远、速率差距大、匹配难度大;悬挂物系统采用 FC 网络,提高了协议、速率等方面的匹配性,简化了网关的设计,有利于航电系统、武器系统的集成、维护。

3) 传输带宽不足且有效吞吐率不高。1553B 总线的速率仅 1 Mbit/s,有效吞吐率最高只有 75%,明显不能满足大容量数据文件、图像传输几百 Mbit/s 到 1 Gbit/s 传输速率的需求;而采用 FC 网络,速率达到 1 Gbit/s,提高 1000 倍,而且 FC 帧所带的有效负荷远大于 FC 帧头、1553 帧头、CRC 等长度,对长帧传输,效率可以提高到 95% 以上,可以满足该类高带宽通信需求。

4) 传输延迟大且误码率不够高,由于 1553B 速率的限制,消息传输延迟在几十微秒到近 1 ms,对实时性要求高的紧急事件传输存在风险,而 FC 网络的帧传输延迟在几微秒到几十微秒,完全满足强实时需求。1553B 总线的误码率为 10^{-7} ,而 FC 网络的误码率为 10^{-12} ,准确性提高万倍,为保证数据交换的完整性、可靠性奠定了基础。

5) 拓扑连接方式单一。1553B 总线只支持总线拓扑,无法支持分布式的控制与并行的通信;而在武器系统中 AS5653 规定 FC 网络可选择点对点、交换结构,对各级设备的布局,ASI,CSI,CSSI 和 MSI 之间电缆的布线适应性更好,通过采用交换结构,支持武器系统

的分布式的控制与并行的通信。

由以上分析可见,1553B 总线的传输速率、拓扑结构、通信指标、支持的业务模式很难满足未来飞机悬挂物的通信要求,因此,研究基于 FC 网络的飞机外挂物通信协议是解决此瓶颈的必经之路。

2 飞机悬挂物 FC 网络标准的研究

2.1 其他标准的关系

MIL-STD-1760E 标准在物理特性、电气特性和逻辑特性 3 方面规定了飞机悬挂物系统与悬挂物之间的通用接口,它提出了高带宽上行光纤通道(UFC)和下行光纤通道(DFC)的要求,是 AS5653B 标准的顶层通用要求。

美国 INCITS 组织制定了适应于航空电子环境的 FC 高层协议标准(FC-AE),其包含了 5 种协议,但目前受到关注的只有 FC-AE-ASM 和 FC-AE-1553 协议,F-35 航电系统采用 FC-AE-ASM 协议,继而在 AH-64D,MMH 等直升机型上推广应用;而 FC-AE-1553 协议的研究热点则是与 1760E 相结合,形成了飞机武器系统的 FC 通信标准 AS5653B,即 MIL-STD-1760 的高速网络。

AS5653B 除了主要基于 FC-AE-1553 外,又与 FC 协议簇的 FC-FS,FC-LS,FC-AV,FC-SW 等紧密相关,其相互关系如图 1 所示。

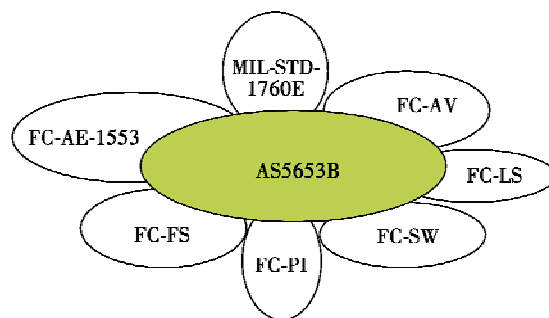


图 1 AS5653B 标准与其他标准的关系图

Fig. 1 The relation of AS5653B with other standards

AS5653B 与 5 个 FC 协议标准^[3-7]的关系如下:1) FC-FS 是 AS5653B 编码、帧与信令协议的基础;2) FC-PI 是 AS5653B 物理层电气特性的基础;3) FC-LS 是 AS5653B 扩展链路服务协议的基础;4) FC-SW 则是 AS5653B 交换机协议的基础;5) FC-AV 是 AS5653B 视频与音频传输协议的基础;6) FC-AE-1553 是 AS5653B 指令、状态、文件等传输协议的基础。

2.2 通信标准的构成

MIL-STD-1760E 标准定义了高速 FC 的上行信号、下行信号的接口,AS5653B 协议面向 1760 要求,则详细规定了飞机悬挂物系统的 FC 网络通信要素^[8-10]:通信数据类型,交换或点到点的拓扑结构,飞机、悬挂

管理节点及武器挂点等的 FC 端口类型,FC 电气特性,FC 基本的帧与信令协议,与高层 FC-AE-1553 协议的映射关系。AS5653B 协议主要规定了以下内容。

1) FC 网络的通用要求。

根据悬挂物系统的特殊要求,禁止采用仲裁环拓扑结构,可选择交换、点到点及混合的拓扑结构,见图 2。

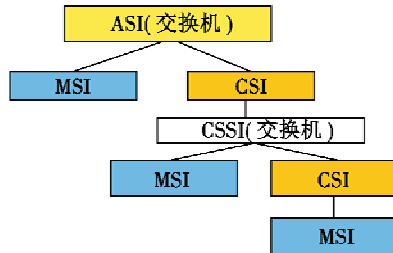


图 2 典型的飞机/悬挂物系统 FC 网络拓扑结构

Fig. 2 FC network topology of typical aircraft/store

支持传输的信息类型包括:命令和控制、文件、视频与音频等应用数据,因此需要基于 FC-AE-1553 和 FC-AV 标准完成数据的封装、组织和解析。

2) FC 传输介质特性要求。

根据悬挂物系统工作环境、机械安装等要求,FC 网络传输介质选择电缆,物理层应遵循 FC-PI 标准在 1 Gbit/s 速率下同轴电缆的 100-SE-EL-S 的电气要求。

3) 链路层协议的规定。

为保证延时的确定性,结合 FC-AE-1553 和 FC-AV 的服务特性,从 FC-FS 的 6 类服务中确定只选择 3 类服务,即缓冲到缓冲的流控机制;在网络端口注册方面,ASI, CSSI, CSI 和 MSI 的 FC 端口之间需要采用显式注册,明确端口的类型、流量信用值、相关的计时器值等;网络控制器(NC)、网络终端(NT)、交换机应支持至少两级优先级。

4) FC 高层映射协议的规定。

选择基于 FC-AE-1553 协议的长消息实现 1760 的文件传输,基于 FC-AE-1553 单帧协议实现命令和控制传输作为 1553B 总线功能的替代通道,而且要求网络上各个节点均要实现 FC-AE-1553 协议并支持这两种通信模式;视频与音频的传输则是从 FC-AV 标准选择了帧头控制协议(FHCP),要求 FC 网络控制器必须实现该协议而其他的网络终端可以根据系统情况选择是否实现。

3 网络关键技术分析

基于原有的 FC 网络设计技术,分析 AS5653B 新的特殊要求,开展相应关键技术的研究,才能研发出符合 AS5653B 的飞机悬挂物系统 FC 网络。下面分析说明飞机悬挂物系统 FC 网络设计的主要关键技术。

1) 网络规划。

分析飞机航电系统、火控系统、悬挂物管理、武器

等之间的信息逻辑交联关系和传输信息类型,研究各个机载设备、悬挂设备的物理布局、接口、安装布局等物理因素,建立悬挂物高速 FC 网络的拓扑结构模型,一般采用交换机为核心的 FC 交换拓扑网络。根据系统需求,决定 FC 交换网络的传输速率、吞吐量、交换机的端口数目、端口类型(如交换机的 F 端口、AE 端口或节点机的 N 端口)、物理设备交联关系。分别规划下行信息流、上行信息流中 1760 接口到 FC 功能端口的映射关系及通信通道的收发关系,下行、上行通信收发关系可能的组合如表 1 所示。

表 1 下行、上行通信各个接口的收发组合表

Table 1 The down/up communication T/R combination of each interface

接口作为发送方	发送方 FC 端口类型	接口作为接收方	接收方 FC 端口类型	
下行	ASI	AE 端口、N 端口	CSI	AE 端口、N 端口
	CSSI	AE 端口、N 端口	CSI	AE 端口、N 端口
	CSSI	F 端口、N 端口	MSI	N 端口
上行	ASI	F 端口、N 端口	MSI	N 端口
上行	MSI	N 端口	CSSI	F 端口、N 端口
	CSI	AE 端口、N 端口	CSSI	AE 端口、N 端口
	CSI	AE 端口、N 端口	ASI	AE 端口、N 端口
	MSI	N 端口	ASI	F 端口、N 端口

2) 通信模式与通信业务分析。

悬挂物系统的 FC 网络通信模式为集中控制响应型,只有一个网络控制器 NC,其余为网络终端 NT。NC 和 NT 都必须支持 FC-AE-1553 的命令和文件两类信息传输,关于对 FC-AE-1553 的限定在下面专门说明;对于需要传输视频和音频的系统,NC 需要支持 FC-AV 的 FHCP 协议。对于视频传输,遵循 FC-AV 的简单参数数字视频(SPDV)组帧格式,对于音频传输,依据 FC-AV 规定。

3) FC 电缆传输设计。

悬挂物系统的 FC 物理层应符合 FC-PI 的 100-SE-EL-S 的要求。对于基于 75 Ω 同轴电缆、1.0625 Gbit/s 传输速率的传输介质,为保证悬挂物系统的高可靠性,在电气特性设计中要求增强发送信号的幅度,降低传输损耗。① 要求发送端信号峰值范围为 2~3 V;② 对传输链路的信号分为主体系统(包括平台、机架吊舱)和悬挂物本身两部分估算损耗余量,基本的分配原则为平台占 95%,悬挂物占 5%,在实际应用中应根据实际距离的长短确定不同的分配比例。具体的信号抖动、幅度、上升下降沿时间、眼图等详细要求,这里不再赘述。

4) 网络设备注册与初始化。

悬挂物系统 FC 网络的帧、序列、交换、流控服务等只是在 FC-AE-1553 及 FC-FS 上作了限定,没有增加复杂的要求,本文重点说明悬挂物系统 FC 网络设备注

册与初始化要求。在交换拓扑悬挂物系统 FC 网络中,要求 ASI, MSI, CSI, CSSI 和 NC 等各个端口具备的注册功能如表 2 所示。与 NC 相连接的交换机采用快速交换初始化协议 (FFI), 发起并完成初始化, 期间 ASI、CSSI 的端口 (AE 端口或 F 端口) 特性通过显式注册完成; 在上电 120 ms 内, MSI 应具备接收 PLOGI 请求并发送确认应答或拒绝应答的能力, 交换机在 FLOGI 过程中为连接的 N 端口完成网络地址分配。

表 2 ASI, MSI, CSI, CSSI 和 NC 注册功能的要求

Table 2 The login function requirement of ASI, MSI, CSI, CSSI and NC

不同端口、NC	FLOGI	PLOGI
ASI AE_Port	不适用	在相关的 N 端口间传递参数
ASI F_Port	应答 FLOGI 请求	在相关的 N 端口间传递参数
CSI AE_Port	不适用	在相关的 N 端口间传递参数
CSI N_Port	发起 FLOGI	应答 PLOGI 请求
MSI N_Port	发起 FLOGI	应答 PLOGI 请求
CSSI AE_Port	不适用	在相关的 N 端口间传递参数
CSSI F_Port	应答 FLOGI 请求	在相关的 N 端口间传递参数
CSSI N_Port	发起 FLOGI	应答 PLOGI 请求
NC	发起 FLOGI	发起 PLOGI

FLOGI 由 MSI 或悬挂物内部的 N 端口发起, 由所连接的 ASI 或 CSSI 进行响应。ASI 发起 PLOGI, MSI 或悬挂物内部的 N 端口响应 PLOGI, CSI 或 CSSI 传递 PLOGI 但不做处理。作为悬挂物管理计算机负责发起到所有 N 端口的 PLOGI, 但对于需要执行 NT-to-NT 传输的节点需要在两两 NT 之间执行 PLOGI 操作。

5) FC-AE-1553 通信协议功能要点。

为兼容 MIL-STD-1553 工作模式, FC-AE-1553 网络同样为一种命令/应答协议, 但增加了 NC 可禁止应答的可选功能。网络主要设备为 NC, NT, 其中, NC 负责组织网络数据的传输, NT 是在 NC 的管理下完成网络的数据传输。FC-AE-1553 定义了用于 NC 以及 NT 发送数据的信息单元, 称之为 IU, 不同的通信模式下, 所使用的 IU 不同, NC, NT 分别有 7 种 IU。

为适应飞机悬挂物通信要求, 在 FC-AE-1553 协议基础上, 设计实现应符合以下限定:

① 为保证网络的高可靠性, 禁止使用 FC-AE-1553 协议定义的“允许”的 NC 监视 NT-to-NT 传输、多播、NT 对广播的状态应答三项功能特性;

② 为限定方式代码、严格 FC 网络定时器初值等, 对 FC-AE-1553 进程注册中的相关服务参数作了更详尽的规定;

③ 为保证命令和控制类型消息的延时最小化, NC 命令、NT 应答状态应采用单帧序列传输, 且 NC 命令、NT 响应状态帧、NT 状态扩展头之后有效数据载荷长度均应小于或等于 2048 Byte;

④ 为文件传输的高效率, 选择基于 FC-AE-1553 协议的长消息实现文件传输, 因此规定命令字中的“NT Burst Size Request”应被设置为“1”, 同时, 命令字中的“Delayed NT Burst Size Request”应设置为“0”, 所有发送大于一个 FC 帧长度的数据时都应使用 NT Burst Size Request 方式, 以允许接收方平滑数据流量。

4 结束语

通过分析传统的飞机悬挂物 1553B 总线通信存在的能力不足问题, 说明了 1760E 中扩展高速 FC 网络的必要性, 结合 1760E, FC-AE-1553, FC-FS, FC-SW, FC-AV 标准, 分析了 AS5653B 标准与其他标准的关系, 详细说明了飞机悬挂物高速 FC 网络标准的组成要素, 重点剖析了 FC 网络设计关键技术, 为研制新型飞机悬挂物高速 FC 通信网络奠定基础。

参考文献

- [1] Department of Defense. MIL-STD-1760E: Aircraft/store electrical interconnection system [S]. Department of Defense, USA, 2007.
- [2] SAE. AS5653B: high speed network for MIL-STD-1760 [S]. SAE AS-1A Avionic Networks Subcommittee, USA, 2014.
- [3] ANSI. TR-42-2007: INCITS technical report for information technology-fibre channel-avionics environment-upper level protocol (FC-AE-1553) [S]. American National Standards Institute, USA, 2007.
- [4] ANSI. INCITS 356-2002: fibre channel-audio video (FC-AV) [S]. American National Standards Institute, USA, 2007.
- [5] ANSI. INCITS 352-2002: information technology-fibre channel-physical interfaces (FC-PI) [S]. American National Standards Institute, USA, 2007.
- [6] ANSI. INCITS 418-2006: American national standard for information technology-fibre channel-switched fabric (FC-SW) [S]. American National Standards Institute, USA, 2007.
- [7] ANSI. INCITS 424-2007: information technology-fibre channel-framing and signaling (FC-FS) [S]. American National Standards Institute, USA, 2007.
- [8] 任文明, 舒振杰. 飞机悬挂物电气接口标准研究 [J]. 航空标准化与质量, 2013(2): 18-21.
- [9] 王朝阳, 季晓光, 丁全心. 机载悬挂物管理系统技术发展分析 [J]. 电光与控制, 2009, 16(3): 1-5, 12.
- [10] 中国航空工业总公司. GJB1188A-1999 飞机/悬挂物电气连接系统标准 [S]. 北京: 总装备部军标出版发行部, 1999.