

3 机载高速数据总线

随着分布式孔径系统、红外跟踪系统等新一代航电设备的使用,只有 1 Mbps 的传输速度 1553B 总线已经无法满足各种数据、音频、视频传感器产生的数据传输需求。一些新的数据总线技术相继被使用,下面分别对这些总线进行概述。

3.1 航空电子全双工交换式数据总线

航空电子全双工交换式数据总线(avionics full duplex switched Ethernet, AFDX)是基于 ARINC429 和 MIL-STD-1553B 的基础上的一种总线通信协议规范,并在实时性和可靠性方面进行了改进。AFDX 网络为星型拓扑,主要由终端系统、AFDX 交换机和传输链路组成,每台 AFDX 交换机大约能接 20 个终端,不同 AFDX 交换机通过背板总线连接,形成一个骨干交换网络。AFDX 网络采用双余度链路和余度管理技术,每个端系统传输路径都相互独立且以互为余度的方式工作,同时采用抖动机制和带宽分配间隔机制,从而保证了数据的可靠性、安全性和实时性。目前主要应用于 A380 和 A400M^[4]中。

3.2 线性令牌传递数据总线

线性令牌传递数据总线(linear token passing bus, LTPB)是美国自动化协会(SAE)制定的军用数据总线,采用令牌多优先级传输协议、支持 4 级消息优先级,数据传输速率为 50 Mbps,同时支持令牌消息、数据消息和站管理消息 3 种消息类型;LTPB 通常采用双冗余结构和同步冗余机制,其星形冗余结构的光纤网络拓扑结构如图 2 所示。

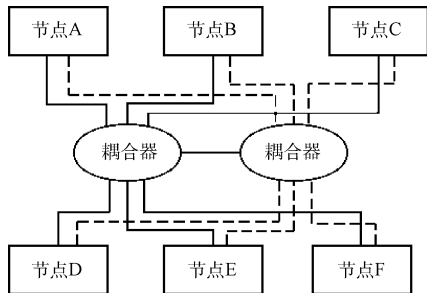


图 2 LTPB 星形冗余拓扑

LTPB 线性令牌传输总线已经被使用在美国军用航空电子局域网中,其中 SAE AS4074.1 标准的线性令牌高速光纤传输总线已经被用在 RAH-66、F-22“猛禽”战斗机上。

3.3 分布式光纤数据接口总线

分布式光纤数据接口(fiber distributed data interface, FDDI^[5])是由美国国家标准化组织(ANSI)于 1982 年制定的以光纤为传输媒介的局域网标准。后经不断完善,形成标准号 ANSI-X3.229 技术标准。FDDI 总线是一种按令牌协议传输信息、实现分布式控制、分布式处理的光纤介质总线网络系统。FDDI 总线使用定时令牌传输协议,总线上的终端会被分配一个固定的令牌时间片,在该时间片内,终

端才可以进行主控工作,才能对总线上的其他终端发送消息,支持同步和异步两种传输方式,数据传输速率为 100 Mbps,采用双环拓扑结构,总线拓扑结构如图 3 所示。

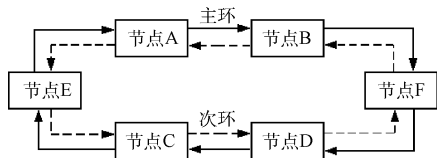


图 3 FDDI 网络拓扑

终端与终端之间使用环形结构构成封闭的环,主环用于正常的数据传输,次环作为冗余备份环,因此具有较强的容错能力和系统重构能力。FFDI 总线已经大量应用于商业、军事和工业领域,波音 777、“华盛顿”核动力航空母舰、美国海军新一代资源(NGCR)计划和宙斯盾(SEGIS)导弹驱逐舰上都使用该总线技术。

3.4 1394B 总线

1394 总线是由国际电气和电子工程师协会 IEEE 于 1995 年根据 FireWire 制定的一种高性能数据总线,技术规范号为 IEEE1394-1995,后经不断完善,先后形成 IEEE-1394A^[6-7]和 IEEE-1394B^[8-10]技术规范。同期,SAE 对 IEEE-1394B 规范进行了一些裁剪和限定,形成了航空应用领域的 1394B 接口需求,即 SAE AS5643,简称 1394B 总线。1394B 总线网络拓扑结构为无环菊花链状或树状网络结构,其单一总线最多可以连接 63 个设备,但是可以通过桥接设备构建 1 023 条 1394B 总线互连网络,这样可接入的设备数就增至 64 k,从而可以实现一个复杂的 1394 网络结构。1394B 总线拓扑结构如图 4 所示。

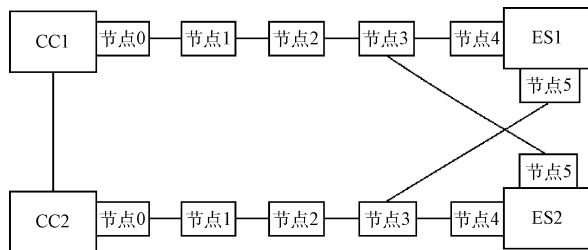


图 4 1394B 网络拓扑

1394B 总线目前的数据传输速率为 100 Mbps、200 Mbps 和 400 Mbps,即将支持 800 Mbps、1 600 Mbps 和 3 200 Mbps,当前支持最大传输速率为 3.2 Gbps。并且 1394B 总线支持点对点的光纤数据传输,到时采用一个 1394B 光纤网络便可以实现所有数据、图形、图像、语音、视频、遥感和控制等信息的传输。1394B 总线还有以下特点:

- 1) 支持内存映射架构。IEEE 1394 支持将总线上的资源映射到内存中,从而直接通过内存来存取数据,加速数据的存取速度。
- 2) 支持热插拔。1394 网络可以自动探测终端设备的

增加和减少,并且根据终端变化情况自动配置网络路由,无需手动设置。

3)点对点通讯架构。1394 总线支持点对点传送数据,无需主机参与,从而减轻主机负载,提高主机 CPU 的使用率。

4)高可靠性。1394 总线可以通过构建二余度或三余度网络结构来实现总线的一级和二级容错,从而保证总线通信的可靠性和确定性。

5)低延迟、高实时性。1394 总线支持同步和异步两种数据传输模式,在同一总线下可以实现两种数据传输模式的同时传输,且时间延迟低于 125 μ s,确保数据传输的实时性。

3.5 光纤通道数据总线(FC)

FC 是由美国标准化委员会(ANSI)的 X3T11 小组于 1988 年开始制定的一种开放式高速通信标准,该技术主要应用于计算机以及 I/O 设备之间的通信^[11]。光纤通道主要分为 5 层:接口控制层、传输协议层、帧协议层、综合服务层、协议映射层,分层结构如图 5 所示。



图 5 FC 协议层

FC 网络拓扑结构主要有 3 种:点对点网络、仲裁环网络和交换式网络。其中点对点网络可实现两个设备的直接通信,仲裁环网络通过构建仲裁环来实现设备的数据通信,

可同时支持 126 个设备进行互联。而交换式网络可同时建立多条直接连接通道来实现终端点对点的双向连接与终端到交换机之间的互联。光纤通道支持 1+Gbps 连接速率,且具有抗干扰、支持异步传输、动态扩展等特性。目前光纤通道在综合航电上的应用主要集中在 FC-AE 和 FC-AV 两方面,其中 FC-AE 协议集包含 FC-AE-ASM、FC-AE-1553^[12-13]、FC-AE-FCLP、FC-AE-RDMA 及 FC-AE-VI 这 5 种协议,主要用于显示器和传感器设备之间的低延迟、安全、确定的通信。FC-AV 协议集主要用于音视频数据流的传输,目前已在 F18 和 C-130AMP 上应用。

3.6 其他高速数据总线

3.6.1 SpaceWire

SpaceWire 总线^[14-15]是欧洲航天局使用的一种高速数据传输的总线。SpaceWire 在同一网络中可以同时使用多条总线来实现全双工、点到点连接的拓扑网络,其传输速率可以达到 400 Mbps,目前主要用于 JWST、LRO 等航天探测器上。

3.6.2 时间触发以太网

时间触发以太网(TTE)是一种新型的总线技术^[16],其主要基于以太网技术,同时吸收了时间触发协议的优势,使得不同实时和安全等级的应用能够在同一网络中进行传输,并且具备很高安全性和可靠性。TTE 网络能够支持普通网络数据流、AFDX 数据流和 TTE 网络数据流 3 种不同类型的数流,其分别对应 BE 消息、RC 消息和 TT 消息。

4 综合航电高速数据总线分析比较

4.1 性能比较

通过对上述高速数据总线的介绍,知道不同高速数据总线的性能也各不相同,下面列出上述几种主要数据总线各项指标的综合对比表,如表 1 所示。

表 1 总线综合性能对比表

总线	1553B	AFDX	LTPB	FDDI	1394B	FC	SpaceWire	TTE
传输速率	1 Mbps	10~100 Mbps	50 Mbps	100 Mbps	400 Mbps~3.2 Gbps	1+Gbps	400 Mbps	1+Gbps
传输介质	双绞线、屏蔽电缆	双绞线	同轴电缆、光纤	光纤	非屏蔽双绞线、光纤	双绞线、光纤	双绞线	双绞线、光纤
传输距离	10 m	100 m	1 000 m	100 m	72 m	1 000 m	10 m	10 km
编码方式	曼彻斯特 II 型码	4b/5b	曼彻斯特 II 型码	4b/5b	8b/10b	8b/10b	Data-Strobe	/
终端数量	32	20+	128	500	63~64 k	126+	/	/
拓扑机构	总线型	星型	星型、总线型	环型	树形、无环菊花链型	点到点、仲裁环、交换式	交换式	交换式
传输协议	指令响应	/	令牌传递	令牌传递	/	FC-AE-1553、FC-AE-ASM	RMAP、RDDP、STUP	/

总线	1553B	AFDX	LTPB	FDDI	1394B	FC	SpaceWire	TTE
误码率	10^{-8}	/	10^{-10}	10^{-10}	10^{-12}	10^{-12}	/	/
扩展性	弱	一般	一般	一般	强	强	一般	强
异步传输	不支持	支持	不支持	支持	支持	支持	支持	/
延迟	$60 \mu s$	/	$1\ 000 \mu s$	$300 \mu s$	$125 \mu s$	$10 \mu s$	/	/
应用机型	F-15 F/A-18	A380 A400M B777	RAH-66 F-22	Boeing777 DDG-S1 SEGIS	F22、F-35 X-47B	F-35、 B1-B F18E/F、V22 Apache	JWST、 LRO 等 航天探测器	猎户座探索 飞行器

从表 1 中可以看出,AFDX 数据总线目前主要应用于民用航空机载设备,其传输速率还有待进一步提高;SpaceWire 数据总线目前主要应用于航天探测器上,传输距离和传输速率有待改进;TTE 数据总线目前还处于研究应用阶段,仅在少部分航天飞行器上使用;FDDI 和 LTPB 数据总线已经被应用在第三代、第四代战机上,但其传输速率仅可以满足当前部分图形、图像、音频传感器的数据传输要求,无法满足大数据量传感器比如分布式孔径系统(DAS)、红外搜索跟踪系统(IRST)的数据传输需要;FC 光纤通道技术在传输速率、延迟率、实时性和扩展性方面完全满足下一代机载航电设备各种图形、图像、音频传感器数据的传输。1394B 数据总线在实时性、延迟率和扩展性方面已经可以满足下一代机载航电设备的使用要求,但当前传输速率还有待提高,随着 1394B 传输速率的提高,将很可能成为下一代机载航电设备数据总线。

4.2 技术成熟度比较

上述几种总线的技术成熟度也都不相同,而技术的成熟度是决定该总线能否得以推广的关键因素之一,图 6 列出了当前主要使用的几种数据总线技术的成熟度状态,图中从左到右分别表示数据总线技术的成熟度,图中曲线的起始端表示该数据总线技术还处于理论阶段,曲线的终止端表示该数据总线技术已经成熟。

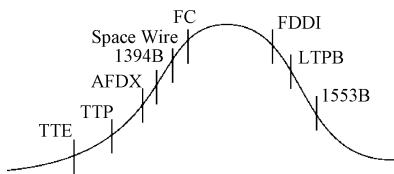


图 6 技术成熟度

从图 6 中可以看出,TTE 数据总线技术目前还处于研究应用阶段,FDDI 和 LTPB 数据总线技术目前相对已经比较成熟,而 AFDX 数据总线技术、SpaceWire 数据总线技术、1394B 数据总线技术和 FC 光纤通道总线技术目前正处于不断发展推广中,具有很大的发展潜力。

5 结 论

数据总线技术是机载航空电子系统的“神经中枢”,是飞机性能的重要体现。随着先进综合式航电系统的发展,总线上传递的数据不仅仅是简单的命令和状态数据,更多的是音频、图形、图像和视频数据,这些数据的传输需要很高的传输带宽和微秒级的数据延迟。因此需要使用高速数据总线来实现数据传输。而高速数据总线的选择应综合考虑其带宽、实时性、可靠性、技术成熟度、可扩展性等因素。通过对上述高速数据总线的简要概述和分析,FC 光纤通道技术和 1394B 总线在传输速率、可靠性、实时性、扩展性和技术成熟度等方面的特点,比较适合下一代先进综合式航电系统的发展要求,在未来先进综合式航电系统领域中将具有很大的应用前景和价值。

参考文献

- [1] 李鹏,上官瑞春,曹磊,等. 基于 1553B 总线和 PXI 总线的某型航天动力控制系统关键技术研究[J]. 国外电子测量技术, 2014, 33(3): 46-50.
- [2] 喜刚. MIL-STD-1553B 总线在 ARM 中的实现[J]. 电子测量技术, 2013, 27(9): 60-64.
- [3] 唐宁,常青. 航空数据总线技术分析研究[J]. 现代电子技术, 2014, 37(4): 65-69.
- [4] 朱闻渊,尹家伟,蒋祺明,等. 新型航空电子系统总线互连技术发展综述[J]. 计算机工程, 2011(S1): 398-402.
- [5] 龚茜茜,龚华军,王新华. 航空电子系统 FDDI 互连的可靠性研究[J]. 光电与控制, 2012, 19(1): 54-56.
- [6] SAWICKI M. Research on the rate of data transfer for USB 2. 0, IEEE 1394A and fast Ethernet interface in the network consisting of two nodes[J]. Studia Informatica, 2011, 32(1A):15-23.
- [7] ZHANG W, WEI Z, HE X, et al. The design of high speed image acquisition system over Gigabit Ethernet [C]. 2010 IEEE International Conference on Wireless Communications, Networking and Information Security (WCNIS), IEEE, 2010: 111-115. (下转第 180 页)