

FC-AE-1553 数据总线的特点及在航天领域的应用

黄俊木, 王 洋, 徐天慧, 徐向前

(重庆航天火箭电子技术有限公司, 重庆 400039)

摘要: MIL-STD-1553B 总线被广泛运用于许多嵌入式系统, 例如飞机、轮船、导弹、卫星等。但是随着科学技术的发展, 当前的航空航天系统, 武器系统的互连子系统的数量和复杂性不断增加, 系统对高带宽、低延时数据需求愈发迫切, 而光纤天然具有的高带宽、低延时的特点能够很好解决上述需求。除此之外, 用光纤搭建的通信网络还具有灵活的拓扑结构、较远的传输距离、高抗电磁干扰等优点。FC-AE-1553 的通信介质采用光纤, 其各个节点之间的通信协议与 MIL-STD-1553B 高度相似, 因此采用 FC-AE-1553 通信协议的新设备能够较好地兼容 MIL-STD-1553B 协议的传统设备。

关键词: MIL-STD-1553B; FC-AE-1553; 光纤; 航天系统

中图分类号: V243.4

文献标识码: A

文章编号: 2096-4080 (2021) 04-0067-06

The Characteristics of FC-AE-1553 Data Bus and Its Application in Aerospace Field

HUANG Junmu, WANG Yang, XU Tianhui, XU Xiangqian

(Chongqing Aerospace Launch Vehicle Electronic Technology Co., Ltd, Chongqing 400039, China)

Abstract: The MIL-STD-1553B bus is widely used in many embedded systems, such as aircraft, ships, missiles, satellites etc. However, with the development of science and technology, the number of the current aerospace system's interconnection subsystems is increasing, and the needs for high bandwidth and low latency data become more urgent. The features of optical fiber are high bandwidth and low delay, so it can be a good solution to the above demand. In addition, the communication network built by optical fiber also has the advantages of flexible topology, longer transmission distance, high anti-electromagnetic interference and so on. FC-AE-1553 uses optical fiber as its transmission medium, and the communication protocol between each node is highly similar to MIL-STD-1553B. Therefore, using the new equipment of FC-AE-1553 can be more compatible with MIL-STD-1553B communication network.

Key words: MIL-STD-1553B; FC-AE-1553; Optical fiber; Space systems

0 引言

在过去的数十年, 我国的航天事业蓬勃发展, 取得了令人瞩目的成就。为了更为安全、便捷地探索浩瀚星空, 新一代运载火箭的研制工作早已

展开。随着我国太空探索的脚步迈向深空, 新一代运载火箭的系统愈发庞大、复杂, 因此对于各个子系统之间的通信要求愈发严格, 迫切要求具有较高的通信速率和更高的传输带宽。面对复杂的宇宙电磁环境, 还应具有较高的抗电磁干扰特

性。在上一代运载火箭的系统中被广泛应用的 MIL-STD-1553B 已经不能满足新一代运载火箭的需求。相较于通过电信号传输信息，通过光信号传输信息不仅具有更高的通信速率，而且还具有更高的抗电磁干扰特性，采用光纤连接新一代运载火箭系统的各个子系统自然成为了首选方案。

新系统能够通过桥接的方式实现新系统与传统系统的互联，不仅可以避免重复性的工作，还可以节约大量的资源。FC-AE-1553 数据总线与 MIL-STD-1553B 总线的上层协议高度相似，可以较为方便地兼容、继承传统设备。除此之外，FC-AE-1553 的传输介质为光纤，这一特性使其能够满足新一代运载火箭系统各个子系统对通信更为严格的需求。

1 MIL-STD-1553B 与 FC-AE-1553 数据总线

1.1 MIL-STD-1553B 总线概述

1978 年，美国制定了有关数据总线电气特性和通信协议规范的军事标准，即 MIL-STD-1553B^[1]。作为第一代军事数据总线，它规定了飞机内部数字命令-响应时间多路复用数据总线的技术要求，以及多路复用数据总线的操作，总线上信息流的格式和电气要求，并提供了媒介以实现不同系统之间的数据和信息的传输。

MIL-STD-1553B 总线最初是为战斗机的内部电子系统网络标准而提出的，它具有可靠性高、速度快、技术成熟，易于扩展等特点。到目前为止，已从战斗机控制系统逐步扩展到导弹、舰船、航空航天和其他领域的系统。在我国，MIL-STD-1553B 总线已被广泛应用于航空航天领域。除此之外，作为军事数据总线，它在提高船舶、车辆、坦克和军舰等武器领域的技术水平方面发挥了重要作用。

1.1.1 MIL-STD-1553B 构成要素

一个标准的 MIL-STD-1553B 网络如图 1 所示。主要由网络控制器 (Bus Controller, BC)、远程终端 (Remote terminal, RT)、总线监视器 (Bus Monitor, BM)、数据总线 (Data Bus) 这 4 部分组成。其中 BC 是网络控制器，它负责整个网络通信的管理，尽管连接到总线上的各个系统也具有 BC 的功能，但在一定时间内只有一个 BC 被激活。总线通过 BC 启动命令，发出的命令负责总线上各种 RT 和子系统之间的数据传输。RT 为远程终端，总线中

所有不充当总线控制器或总线监视器的终端都称为远程终端，它充当数据总线和各种子系统之间的接口设备。MIL-STD-1553B 数据总线最多可以互连 31 个 RT，只有在 BC 发起命令后，RT 才会做出相应的响应。RT 在收到有效命令后，RT 将发送状态信息，如果收到的命令不符合要求，将丢弃数据。总线监视器负责监视数据总线的的数据传输。BM 可以存储所有传输的数据或者特定部分的数据以进行实时分析。由于 BM 仅存储信息，并且不参与数据传输，因此它充当被动设备，主要用于测试和作为备用总线控制器。总线采用双绞屏蔽线传递电信号，为了提高可靠性，采取冗余措施，每个终端与两根总线连接。

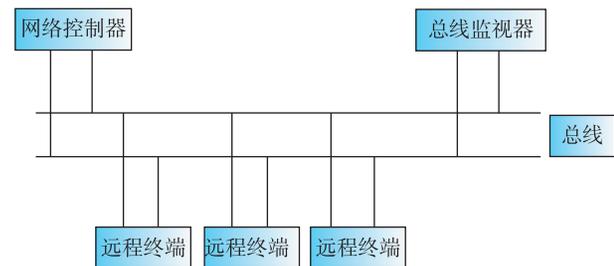


图 1 MIL-STD-1553B 网络结构

Fig. 1 MIL-STD-1553B network structure

1.1.2 字格式

子系统之间通过互相传递消息完成通信，消息是由字构成。MIL-STD-1553B 标准定义了 3 种不同的字类型。字格式的长度为 20 位，并且每种字的格式保持一致，即前 3 位是同步字段，后 16 位用于信息，最后一位是奇偶校验位，用于奇偶校验。MIL-STD-1553B 定义了 3 种不同的字格式。

1) 命令字 (command word) 由 3 位同步字段、5 位远程终端地址字段、1 位发送/接收 (T/R) 位、5 位子地址/模式字段、5 位字数/模式代码字段和一位奇偶校验位组成，命令字由 BC 产生。

2) 数据字 (data word) 包含传输的信息，前 3 位是同步字段，后 16 位是信息字段，该字段由用户根据需要自行定义，最后一位是奇偶校验位。

3) 状态字 (status word) 由远程终端发出，当接收到来自总线控制器的有效消息后，将通过状态字向总线控制器发送 RT 的状态，比如忙碌、错误等。

1.1.3 消息格式

总线上的数据需遵循协议规定，MIL-STD-1553B 标准定义了完整的消息传输格式，其中 BC

到 RT 的传输，RT 到 BC 的传输和 RT 到 RT 的传输被广泛运用，图 2 描述了这 3 种消息格式。

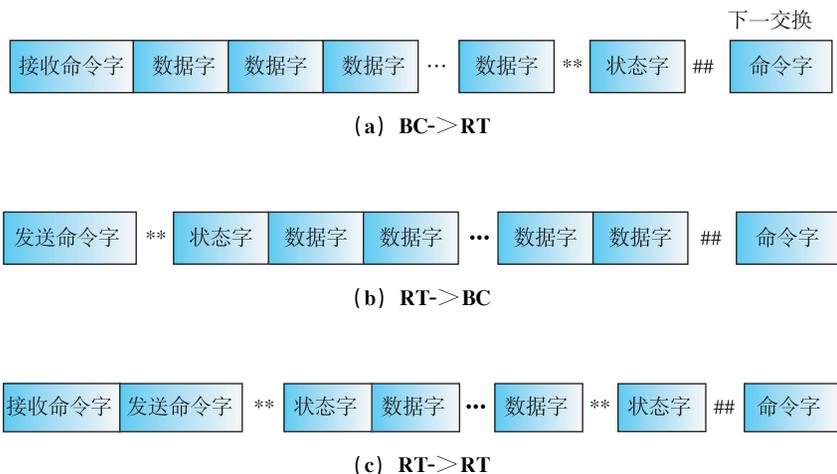


图 2 消息格式

Fig. 2 Message format

1) BC 到 RT: 总线控制器向寻址的 RT 发出命令字，指示它将要接收消息。数据字紧跟在命令字之后，字数范围为 1~32。RT 验证消息后，会发送状态字以响应总线控制器，从而完成 BC 到 RT 之间的数据传输。

2) RT 到 BC: 总线控制器向 RT 发出命令字，指示它发送一条消息，该消息的字数在 1~32 之间。RT 验证命令字之后，RT 传输状态字和数据字。总线控制器验证状态字，完成 RT 到 BC 的数据传输。

3) RT 到 RT: 控制器将接收命令字发送给寻址的 RT，然后再将发送命令字发送给另一个寻址的 RT，两者都包含相同的特定字数，范围在 1~32 之间。在对命令字进行验证之后，发送 RT 传输其状态字，然后传输正确数量的数据字。接收方 RT 验证消息后，发送其状态字，完成 RT 到 RT 数据传输。

1.2 FC-AE-1553 概述

FC-AE-1553 总线是一种高度可靠的高速光纤通道总线，该协议由美国国家标准协会 (ANSI) 制定^[2]，FC-AE-1553 传输介质采用光纤，使得 FC-AE-1553 具有光纤通道的良好网络性能。除此之外，FC-AE-1553 是上层对 MIL-STD-1553B 的映射^[3]，对后者的特点能够很好地继承和保留，能够在前者的基础上进行平滑升级。FC-AE-1553 与 MIL-STD-1553B 都是采用命令响应式，前者采用光信号传递信息，其信息传递速率是后者的百

倍乃至千倍以上，具有更高的高传输宽带、更低的延时特点，能够满足目前航空系统对高速总线的的需求。一个经典的 FC-AE-1553 网络如图 3 所示。

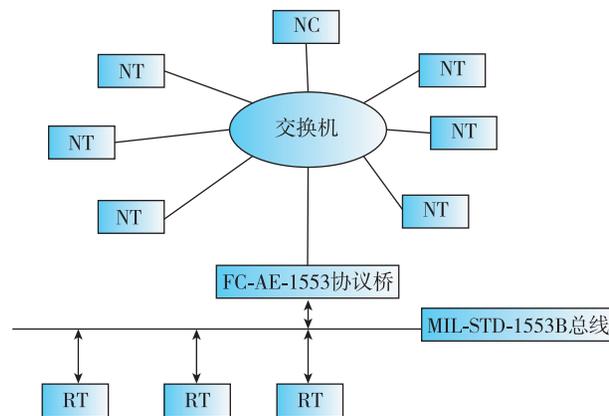


图 3 FC-AE-1553 网络

Fig. 3 FC-AE-1553 network

FC-AE-1553 网络包含了网络控制器 (Net Controller, NC)、网络终端 (Net Terminal)、RT 和 FC-AE-1553 协议桥。NC 是一个消息的发起者，控制整个网络的通信，一个 FC-AE-1553 网络可以具有多个 NC，但处于工作状态时，只能由一个 NC 控制网络。

1.2.1 FC-AE-1553 与 MIL-STD-1553B 的对比

FC-AE-1553 协议是由 MIL-STD-1553B 的上层协议映射而来，故其协议与 MIL-STD-1553B 高度相似。映射的基本目的是将 MIL-STD-1553B 远程终端连接到光纤通道网络中，支持将 MIL-STD-

1553B 命令字映射到光纤通道标头字段, 尽管 FC-AE-1553 主要基于 MIL-STD-1553B 结构, 但它包含的扩展功能超出标准 MIL-STD-1553B 的功能。扩展的功能有: 更大的终端接入数量 (2^{24}), 更大的字数 (2^{32} 个 32 位字) 和更大的子地址空间 (2^{32})。FC-AE-1553 充分利用了光纤通道提供的网络拓扑 (相对于 MIL-STD-1553B 的总线拓扑), 从而允许同时在网络和多个网络控制器实体之间进行数据通信。该映射还支持将多个 MIL-STD-1553B 总线集中到一个共同的 FC-AE-1553 网络中, 同时保持单个 MIL-STD-1553 总线的功能。表 1 提供了 MIL-STD-1553 和 FC-AE-1553 的比较。

表 1 MIL-STD-1553 与 FC-AE-1553 的比较

Tab. 1 Comparison with MIL-STD-1553B and FC-AE-1553

	MIL-STD-1553B	FC-AE-1553
最大 NC 个数	1	大于 1
最大 NT 个数	32	2^{24}
子地址	32	2^{32}
传输字数量	32	2^{32}
传输速率	1 Mbit/s	1 Gbit/s, 2 Gbit/s
传输介质	电缆	光纤
字宽	16 位	32 位

1.2.2 FC-AE-1553 的特点及优势

MIL-STD-1553B 总线特别适合关键任务处理模块与实时传感器和控制器之间的互连。在过去的数十年中, MIL-STD-1553B 在军事航空电子平台上被广泛使用, 其原因主要有: 1) 线性网络结构。凭借这种拓扑结构, MIL-STD-1553B 非常适合用于连接飞行器和地面车辆中的分布式设备, 点对点连接使所需的电缆大大减少, 从而减小了整体质量和必要的空间。对于线性网络, 系统设计人员和维护人员很容易添加或减少网络节点。2) 冗余。采用双总线冗余结构, 可以通过传输通道之间的自动切换来提高系统的容错性。3) 出色的环境适应性。MIL-STD-1553B 总线可广泛用于极端高温等极端环境。

MIL-STD-1553B 总线虽然具有上述优点, 但对于高度复杂的电子系统, 仍存在某些限制, 例如其总线数据速率只有 1 Mbit/s, 有限的容错能力以及复杂的维护工作等。而 FC-AE-1553 采用了光纤通道技术, 同时保留了 MIL-STD-1553B 总线

的诸多优点, 因此 FC-AE-1553 相较于 MIL-STD-1553B 有了很大的改进。

由于映射 MIL-STD-1553B 协议, FC-AE-1553 能够利用现有的为 MIL-STD-1553B 航天器, 航空电子网络的系统设计硬件和软件。由于采用了光纤通道技术, FC-AE-1553 的数据速率可以达到 1 Gbit/s 或 2 Gbit/s^[4]。光纤通道采用 8B/10B 编码, 实际传输速率可达 106.25 Mbit/s, 可实现该传输速率的 1/8, 1/4, 1/2 构建链路, 该传输速率范围能够满足可预见的未来宇宙飞船、航空电子系统网络的需求。FC-AE-1553 在端口到端口之间的数据传输延迟低于 10 μ s 量级。

FC-AE-1553 可通过铜线或光纤介质传输, 低成本的视频同轴线物理层可达到 1 Gbit/s 的传输速率和 25 m 的传输距离。对于多模光纤, 传输速率可扩展到 500 m; 对于单模光纤, 将提供 1000 m 以上的输距离。在使用光纤作为介质传输数据的前提下, 可以提高航天器网络传输的抗电磁干扰能力^[5]。FC-AE-1553 的 10-12 位最大允许错误率使高可靠的数据传输成为可能, 节省验证数据的步骤, 这样就可以传输低成本的块应用数据, 如传感器数据^[6]。

和 MIL-STD-1553B 类似, FC-AE-1553 也采取冗余设计, 典型的网络接口控制器由 2 个数据传输通道组成, 一个是主通道, 一个是备用通道。如果主通道传输出现故障问题, 可切换到备用通道。FC-AE-1553 支持不同的拓扑结构, 因此可以达到成本和性能之间的权衡。

除此之外, Fibre Channel 是一个基于 COTS 的网络, 涉及 Fibre Channel 领域的民用企业在标准和产品供应方面拥有广泛的技术基础。ANSI 光纤通道的标准制定始于 1988 年, 涉及约 80 家民间公司, 包括著名的 Sun、IBM、希捷、惠普、戴尔和康柏等。这些公司的努力可以作为进一步发展 FC-AE-1553 技术的基础。MIL-STD-1533B 总线的成功源于其开放性, 而光纤通道也是一种开放标准, 因此光纤通道的标准制定工作将向所有组织开放。通过这种方式, 将有越来越多的公司和组织参与 FC-AE-1553 的开发, 推动 FC-AE-1553 的进一步完善。

1.3 FC-AE-1553 在军事和航天领域的应用

现代武器系统、航空航天系统趋于复杂化、精细化, 为了保证各个子系统之间的通信稳定、

快速,其搭载的通信系统应该具有如下特点。

- 1) 整体通信系统应该具有很强的抗干扰能力,因为在不同的环境下有着不同的电磁环境;
- 2) 通信系统应设计灵活,易于修改;
- 3) 通信子系统应具有很强的抗干扰能力;
- 4) 通信子系统相对独立工作,并且对应用程序软件尽可能透明,尽量减少占用整个系统的通信时间。

FC-AE-1553 满足上述要求,因此在现代武器系统、航空航天系统、舰船系统中得到越来越广泛的应用。自 1973 年美国制定 MIL-STD-1553B 以来,1553B 系列的标准被广泛应用于 F-16, F-18 和 F-22 等战斗机。1553B 总线传输介质可以使用同轴电缆、屏蔽双绞线和光纤电缆等,各个终端通过变压器耦合或直接耦合到总线。FC-AE-1553 总线的传输速率、传输距离和远程终端数量符合中小型船舶和海底系统通信要求,因此也已广泛用于海军舰船。

作为陆军的地面武器,所有类型的坦克都经常在剧烈振动、嘈杂、多尘且温度变化剧烈的恶劣环境中工作,因此内部电子设备之间数据通信的故障检测必须非常严格。为了实时控制发动机和变速器,它们之间的数据通信要求信息的最大响应时间尽可能短,以提高整个动力系统的整体性能。FC-AE-1553 总线具有高可靠性和良好的实时性,并且与集成了这种类型的数据通信的电力传输、大量数据和实时的集成控制的系统相比,它具有比绝大多数现有总线更大的性能优势。

随着我国航天事业的蓬勃发展,航空航天电子系统越来越精密,功能复杂,因此航空航天电子系统一体化、综合化的程度越来越高,传统的 MIL-STD-1553B 较低的传输带宽愈发不能满足航空航天电子的需求。除此之外,随着人类探索太空脚步的不断迈进,航空航天电子系统将面对比在地球更加复杂的电磁环境,比如太空探测器、人造卫星,时刻暴露在宇宙射线辐射干扰下,需要抗干扰能力更强的设备。因此,以光纤作为信号传输介质的 FC-AE-1553 在航空航天电子系统中的更多应用趋势愈发明显。就目前而言,国内已经将 FC-AE-1553 应用于实际工程领域,比如上海宇航系统工程研究所在某运载火箭上采用 FC-AE-1553 数据总线传递遥测数据。

FC-AE-1553 总线作为重要的军事数据总线,

具有较高的传输速率、良好的环境适应性、电磁兼容性和冗余容错能力。FC-AE-1553 总线采用双重冗余结构,以确保良好的容错能力和故障隔离能力。协议中采用的曼彻斯特编码格式可确保错误的检测位置和错误的隔离,字格式和消息传输格式确保纠错和定位检测,总线的传输介质采用屏蔽双绞线、光纤等介质,并采用耦合方式与端子连接,有效抑制了外部电磁干扰,保证了通信的可靠性。因此,FC-AE-1553 总线不仅在军事领域中占有重要地位,而且在未来很长一段时间内将继续被应用。

2 1553B 数据总线的研究重点方向

随着我国航天事业的蓬勃发展,基于 FC-AE-1553 的数据传输网络正应用于航天工程研制,主要有如下研究方向:

- 1) 增强 1553B 通信总线的安全性。1553B 数据总线是一项军事标准,定义了已在军事和航空航天电子平台中实施 40 多年的串行通信总线的规范。1553B 数据总线专为实现较高容错能力而设计,而对网络安全问题的关注较少。目前已有学者对该方向进行研究,例如 Stan 等^[7]通过集成基于机器学习的入侵检测系统 (IDS) 来增强 1553B 数据总线的安全性。

- 2) 实时更新 1553B 网络的同步时间。目前的 1553B 通信网络时间同步后不能自动对时,为解决此问题,Zhang 等^[8]设计了一种具有 GPS 模块接口的 FC-AE-1553 网络,通过 GPS 模块接收器从卫星接收包括时间、纬度和经度在内的信息,将从 GPS 接收器接收的数据传输到 FC-AE-1553 网络,以对网络进行时间同步。

- 3) 将 FC-AE-1553 协议与其他技术相融合,以增强 FC-AE-1553 高可靠、低延迟、高带宽。目前已有此方面的研究成果,例如 Fang 等^[9]设计了一种具有交换类型和总线类型的异构 FC-AE-1553 网络,主要实现方式是融合 PON 技术和 FC-AE-1553 协议。

- 4) 动态带宽调度。虽然 FC-AE-1553 具有较高的数据传输带宽,但是面对 FC-AE-1553 交换网络中的突发流量,可能会造成端口堵塞。目前,He 等^[10]和姜国义等^[11]探索了此方面的可行性,设计了动态带宽调度方法,可以在硬件资源和功耗限制的前提下提高航空航天网络的传输性能。

3 结论

本文比较了 FC-AE-1553 与 MIL-STD-1553B 两种数据总线, FC-AE-1553 相较于 MIL-STD-1553B 能够满足更多的子系统互联, 且有着更高的数据传输速率和可靠性, 满足新一代运载火箭系统的需求。随着我国太空探索的脚步迈向深空, FC-AE-1553 数据传输总线将在更多的型号任务中被广泛应用, 支撑我国航天事业的进一步发展。

除此之外, 采用 FC-AE-1553 数据总线的系统能够与传统采用 MIL-STD-1553B 总线的系统之间进行通信, 可以较为方便地对传统系统进行升级, 避免资源浪费。

参考文献

- [1] Bracknell D. Introduction to the MIL-STD-1553B serial multiplex data bus[J]. *Microprocessors and Microsystems*, 1988, 12(1): 3-12.
- [2] Sullivan W. Fibre channel: replacement for MIL-STD-1553 & next generation military data bus[J]. *DY Systems Inc., Ontario, Canada*, 2008.
- [3] 鞠铭阳, 张利洲, 王世奎. FC-AE-1553 协议分析与研究[J]. *现代电子技术*, 2016, 39(11): 21-23+29.
- [4] 房亮, 赵光恒, 曹素芝. FC-AE-1553 网络传输性能评价[J]. *北京航空航天大学学报*, 2015, 41(8): 1396-1402.
- [5] 曹素芝, 张善从. FC-AE-1553 高级特性介绍[J]. *光通信技术*, 2010, 34(2): 49-51.
- [6] 杜玲, 廖小海. FC-AE-1553 总线在箭载测量系统中应用研究[J]. *遥测遥控*, 2015, 36(5): 33-43.
- [7] Stan O, Cohen A, Elovici Y, et al. Intrusion detection system for the MIL-STD-1553 communication bus[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2019, 56(4): 3010-3027.
- [8] Zhang J N, Qiao J Q. Design of FC-AE-1553 interface GPS module[C]. *2013 Third International Conference on Instrumentation, Measurement, Computer, Communication and Control*, IEEE, 2013: 462-464.
- [9] Fang L, Zhao G H, Cao S Z. Design of heterogeneous FC-AE-1553 network [C]. *2014 IEEE International Conference on Control Science and Systems Engineering*, IEEE, 2014: 130-134.
- [10] He Y, Wang L Q, Zhan Y Y, et al. Dynamic bandwidth scheduling algorithm for space applications in FC-AE-1553 switching network[C]. *2018 Asia Communications and Photonics Conference (ACP)*, IEEE, 2018: 1-3.
- [11] 姜国义, 孙蕾, 张海全, 等. 基于 FC-AE-1553 总线的航天电子网络带宽动态分配机制研究[J]. *导航与控制*, 2018, 17(1): 34-41.

引用格式: 黄俊木, 王洋, 徐天慧, 等. FC-AE-1553 数据总线的特点及在航天领域的应用[J]. *宇航总体技术*, 2021, 5(4): 67-72.

Citation: Huang J M, Wang Y, Xu T H, et al. The characteristics of FC-AE-1553 data bus and its application in aerospace field[J]. *Astronautical Systems Engineering Technology*, 2021, 5(4): 67-72.