

新一代航天电子系统现场总线及其应用

邹 伟¹, 郝现伟^{1,2}, 李 菲³, 陈开颜²

(1 中国人民解放军 91550 部队 大连 116200

2 北京宇航系统工程研究所 北京 100076

3 山西省新型工业总线工程技术研究中心 太原 030051)

摘要: 针对航天电子系统的特殊性,从航天电子系统现场总线技术的发展现状出发,结合现场总线技术的特点,分析了现场总线未来的发展方向。重点介绍了新一代航天电子系统现场总线——有限级联自动重构总线(FCARB)及其在某测量存储系统中的应用。测量存储系统可实现数据并发量 10 M,时间同步精度 750 ns,系统实时性 260 ns。与传统的航天总线相比,新一代现场总线在自动重构、实时性、支持 BIT 模式、支持仪器总线等方面具有更高的性能,同时对用户更加友好,兼容性更强,能够适应高冲击、高动态等恶劣环境。

关键词: 航天电子系统; 现场总线技术; 有限级联自动重构总线; 自动重构; 实时性

中图分类号: TP273 文献标识码: A 文章编号: CN11-1780(2021)03-0027-06

A new generation of fieldbus in aerospace electronic system and its application

ZOU Wei, HAO Xianwei, LI Fei, CHEN Kaiyan

(1. 91550 Unit of the Chinese People's Liberation Army, Dalian 116200, China;

2. Beijing Institute of Astronautical Systems Engineering, Beijing 100076, China;

3. Shanxi Engineering Research Center for New Industrial Bus, Taiyuan 030051, China)

Abstract: In view of the particularity of aerospace electronic system, starting from the development situation of fieldbus technology in aerospace electronic system, combined with the characteristics of fieldbus technology, the future development direction of fieldbus is analyzed. It focuses on the new generation of fieldbus in aerospace electronic system—Finite Cascading Auto-Reconfigurable Bus (FCARB) and its application in measurement storage system. The measurement storage system can achieve data concurrency of 10 M, time synchronization accuracy of 750 ns, and system real-time performance of 260 ns. Compared with the fieldbus in traditional aerospace electronic system, the new generation of fieldbus has higher performance in terms of auto-reconfigurable, real-time performance, support for BIT mode, support for instrument bus, etc. At the same time, it is more user-friendly, more compatible, and can adapt to harsh environments such as high impact and high dynamics.

Key words: Aerospace electronic system; Fieldbus technology; Finite Cascading Auto-Reconfigurable Bus; Auto-reconfigurable; Real-time performance

引 言

随着航天电子系统的复杂化,现场总线应运而生。现场总线将协议、拓扑结构等进行了优化和标准化,使之成为一个系统的底层数据传输网络,具有标准统一、系统开放、互换性和互可操作性高的特点,解决了传统电子系统连接关系和拓扑结构混乱的问题^[1]。利用总线能够大幅度降低航天电子系统的故障率,提高维修性和故障检测能力。

现场总线设计的初衷是为将其应用在工业现场。为了将现场总线应用在对现场总线的需求具有特殊性的航天领域,就需要解决诸多问题,对现有总线提出了许多新的技术要求。随着航天电子技术的快速发展,其电子系统架构越来越复杂,整个系统数字化信息量急剧增加,传统的 RS232、RS485、CAN、ARINC429、MIL-STD-1553B 等总线已经不能满足新型航天电子系统的带宽需求,因此,新一代航天数据

总线技术正逐渐代替传统的总线技术^[2-4]。国外新型的航天机载网络已经开始转向光纤通道 FC (Fiber Channel)、航空电子全双工交换式以太网 AFDX (Avionics Full Duplex Switched Ethernet)、SpaceWire、TTP (Time Triggered Protocol) 和时间触发以太网 TTE (Time Triggered Ethernet)^[5-10]。与传统总线技术相比, 新一代总线技术在带宽、可靠性和延迟性等方面具有十分显著的技术优势, 可以更好地满足新一代航天电子系统设计与实现需求^[11]。

国内总线主要通过仿制来研发, 其成本巨大, 而且存在很多不确定性。目前, 航天电子系统现场总线技术还停留在传统总线的技术范围之内, 对于新一代航天电子系统现场总线还处于调研和预研阶段, 因此, 国内航天研制单位如果想发展下一代现场总线需要考虑新型总线技术的仿制和推广, 依托传统总线技术应用基础逐步消化新型总线技术, 以便实现在航天总线技术上的飞跃, 满足未来现场总线的技术指标需求。但是受技术壁垒影响, 这种仿制和推广需要很长的周期, 相应的研发和应用成本巨大, 并不能突破测量系统与控制系统分离的方式, 在风险控制方面还具有很大不确定性。

为了长远发展, 自主研发新一代现场总线是国内航天的必然趋势, 也是国家实现关键技术自主可控的战略布局需要。总线技术作为决定电子系统性能的核心技术之一, 依赖引进、仿制国外技术只能处于落后于人的状态, 而且受技术壁垒影响, 不能管控风险。国内技术市场经过多年的发展, 储备了大量先进的支撑技术, 比如 LVDS、光纤通讯、嵌入式技术、微电子技术, 已经具备了自主研发下一代高性能总线的条件。只有研发具有国内自主知识产权的现场总线, 才能在技术上不落后, 摆脱国外总线技术的影响, 使航天电子系统现场总线快速发展^[12,13]。

本文介绍了由山西省新型工业总线工程技术研究中心自主研发的新一代航天电子系统现场总线及其在某测量存储系统中的应用。通过与其他现场总线的性能指标对比, 新一代现场总线在自动重构、终端数目、实时性和延迟等许多重要的指标上优于现有的现场总线。

1 有限级联自动重构总线网络架构

1.1 有限级联自动重构总线简介

有限级联自动重构总线 FCARB (Finite Cascading Auto-Reconfigurable Bus) 是新一代高速率、强实时的有限级联自动重构网络现场总线^[14]。与现有各类现场总线相比, 在网络协议、网络架构、速率提升和可靠性方面做了极大的改进与提高, 是能够适应大型独立系统和工业生产制造领域需求的新一代通用测量与控制总线。该总线支持智能重构, 采用 80 位并行处理内核, 并采用特殊的优先级策略, 在同一个总线网络内兼容测量和控制能力。

基于有限级联自动重构总线, 模块级深度网络化仪器系统架构 SNXI (SharkNet Network Extensions for Instrumentation) 也相继被推出。SNXI 突破现有的仪器概念, 以其强大的融合性能将板卡级模块直接接入网络, 再根据被测对象和节点布局进行封装, 融合 BIT (Build in Test) 的理念, 将仪器和被测设备融为一体, 形成全新的新一代大一统测试架构和体系。

1.2 高可靠性网状冗余拓扑架构

典型的有限级联自动重构总线是一个树状网络, 拥有一个 TOP 根节点 (或叫顶节点), 每个路由器最多只能有 16 个下行端口和两个上行端口。路由器与路由器可以通过端口级联, 路由器最多可以级联 6 层; 任意一个路由器的空闲端口都是功能对等的, 可以任意互换挂接终端设备。有限级联自动重构总线协议约定, 16 端口路由器和终端设备经过多层级联, 最多可以连接 50 000 台左右的终端。

利用网络路由器的两个上行端口, 可以连接成为具有高可靠性的网状冗余结构的网络, 示意图如图 1 所示。其典型特点如下:

- ① 具有两个 TOP 节点, 避免顶节点干路出现单点故障;
- ② 具有同枝冗余、跨枝冗余、跨层冗余三种冗余接法;
- ③ 同枝冗余能解决传输线路的备份, 如果两个设备之一出现故障, 不能保证数据可靠传输, 所以不建议使用这种冗余方式;

④ 跨枝冗余既解决了传输线路的备份，数据的收发方是不同的，而且通过多层的不断跨枝冗余，形成很多条网状交错的路径，极大地提高数据传输可靠性；

⑤ 跨层冗余具有跨枝冗余相同的多路径特点，而且还可以针对特殊设备缩短数据传输路径，具有良好的伸缩特性；

⑥ 跨枝冗余和跨层冗余可以避开顶节点，实现数据传输的“近道”操作，减轻顶节点通信负荷的同时，消除顶节点单点故障导致的可靠性降低。

每个终端接口模块也支持双端口冗余，所以两个底层终端设备间的通讯链路最多可以达到 4 096 条。

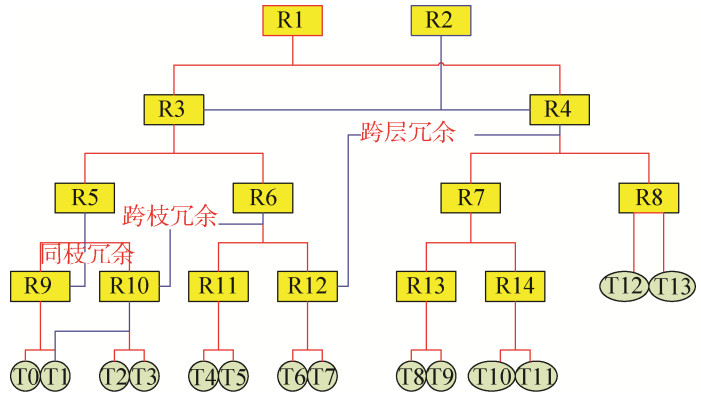


图 1 带冗余的有限级联自动重构网络结构示意图
Fig. 1 Schematic diagram of finite cascading auto-reconfigurable network structure with redundancy

2 有限级联自动重构总线特点与优势

2.1 基于 LVDS 物理链路的 FCARB 性能特点

① 高速率：200 Mbps ~ 800 Mbps，由于采用特殊设计的网络结构，可实现端对端高速率传输，而且支持网络内多端并行传输，提升网络总吞吐量；

② 强实时性、确定性、同步精度高：微秒级单跳，远高于现有绝大部分背景需求。数据传输时间可控，采用与数据包等宽度的 80 位并行处理内核，可以实现对数据包单时钟转发，同时从物理层支持命令包的高优先级，满足强实时控制应用需求；

③ 自动重构：网络对用户全透明，无需对网络设备做任何配置，路由器就会自动侦查构建更新整个网络，简单易用，彻底消除不同用户间的协调成本；

④ 网状链路冗余：可以针对特殊应用将部分或全部端口配置为网状冗余链路，可以提高链路连接的可靠性，也可以对网络传输负载进行平衡优化；

⑤ 介质无关：可根据项目特性选用 LVDS、光纤、双绞线等作为传输介质，甚至可以混合使用，适应性极强，可以满足现有电子系统的局部改造需求；

⑥ 模块级高可测试性：从任何一个终端接口接入，可与全网所有终端通讯，快速完成全部设备的检测，可深入到模块级，彻底改变现有测试模式和效果。

2.2 FCARB 与其它总线的性能指标对比

有限级联自动重构总线与现有航天电子系统现场总线的参数对比如表 1 所示。有限级联自动重构总线最显著的优势在于自主研发，同时支持混合传输介质、自动重构，可连接的终端数目大于 50 000 个，端到端延迟在 5 μs 以内，数据传输速率在 1 Gbps 以上，支持 BIT 模式、支持仪器总线。其它各类指标也都与其它先进总线的性能达到一致，且具有更高的扩展性。

3 有限级联自动重构总线的应用

3.1 在某测量存储系统中的应用

基于有限级联自动重构总线的某测量存储系统用于遥测任务，获得各系统的状态参数和环境参数的数据，完成试验过程中环境力学、温度及姿态等参数数据的测试及存储。整个测量系统由前端环境测量传感器、惯组、采编存储器、锂电池配电器、总线控制器、地面监控台、锂电池配电台、远近端光电变换装置等设备组成，该系统主要负责采集记录环境力学、温度及姿态等参数测试数据，并对其进行事后处理和分析。试验结束后，可以回读存储数据，并对其进行分路显示和处理等操作。系统总体结构如图 2 所示。

3.2 系统各部分功能

采编存储器负责量化采集传感器输出的模拟量、数字量,将采集编帧后的数据以 422 方式传输到内部存储模块进行存储,同时通过总线控制器进行地面长线监测,完成测量参数数据的接收和记录,并能长期保存数据。采编存储器与地面监控台配合,完成地面模拟实验,并完成发射中的数据记录工作及发射后数据回读功能,地面模拟实验时具有实时监测、记录、数据在线读取、格式化等功能。

总线控制器主要功能是通过 LVDS 接口,将 2 台设备的测试数据进行综合和分发,内部集成了有限级联自动重构总线链路传输协议。完成通讯及接收地面监控台的操作指令,作为核心中央数据综合设备,实现数据综合和转发。

锂电池配电为部分传感器、采编存储器、总线控制器供电。同时,在设备内部也增加了供断电控制电路,近端锂电池配电控制台可以对其进行对外供电通断控制。内部配置有采编电路将设备电量实时采集和转发至采编存储器内进行编帧处理。

地面监控台能够对采编存储器进行单元测试,具有发射前实时监测采编存储器,对其进行启动记录、停止记录、硬启动等操作,测试人员可以通过地面监控台软件实时接收数据,监测各个设备信息。

光电变换装置负责将地面近端总线控制器和远端地面监控台的信号进行电光/光电转换,完成通讯。

锂电池配电台对锂电池配电装置中的锂电池进行长线充电,同时,内部配置了锂电池的通断控制继电器回路,控制测试台开关或地面监控台发送指令,即可对锂电池配电器进行对外供电的通断操作。

相对于原有的测量存储系统来说,本测量系统采用了总线控制器作为通信控制的核心设备,其内部集成了有限级联自动重构总线链路传输协议,实现了高速远距离信号传输,同时缩减了系统电缆数量,提高了数据传输接口的通信能力,极大地提高了测量存储系统工作效率。

3.3 实现的技术指标

内部集成了有限级联自动重构总线链路传输协议的总线控制器与 7 台单机相连,与单机接口采用 LVDS 接口,可实现以波特率 300 Mbps 高速率传输。测量存储系统的数据并发量 10 M,时间同步精度 750 ns,系统实时性 260 ns,验证了有限级联自动重构总线的强实时性、确定性和高同步精度。

系统的各部分设备都按照技术条件先后进行了单板温度循环试验、单板随机振动试验、绝缘电阻检查、整机温度循环试验、整机老炼试验、高低温试验、模拟运输试验,各项试验结束后均进行通电测试,测试结果符合技术条件的各项技术指标要求。

4 结束语

随着航天电子系统复杂度不断上升,航天领域的总线应用也更加广泛。现场总线技术就目前的发展现状来看还存在较多不足和问题需要解决,因此,需要从当前存在的问题出发不断完善现场总线技术,使其更好地服务于航天电子系统的建设。新一代航天电子系统现场总线——有限级联自动重构总线与现有的现场总线相比,在延迟、实时性等方面具有显著的优势,同时支持自动重构、BIT 模式、仪器总线。有限级联自动重构总线在某测量存储系统的优势显而易见,可以实现数据并发量 10 M,时间同步精度 750 ns,系统实时性 260 ns。同时它的成功应用表明,研发属于自己的新型总线是未来的发展方向,是航天领域的一次重要革命,对推动我国航天电子系统的完善和发展具有重要意义。

参考文献

- [1] 周双印. DCS 集散型控制系统及工业控制技术的最新进展[J]. 导弹与航天运载技术, 2003, (3): 57-62.
ZHOU Shuangyin. The latest development of DCS distributed control system and industrial control technology[J]. Missiles and Space Vehicles, 2003, (3): 57-62.
- [2] 贾天宝, 王彦, 李俊德. CAN 总线技术在远程监测系统的应用[J]. 遥测遥控, 2002, 23(4): 51-54, 64.
JIA Tianbao, WANG Yan, LI Junde. Application of CAN bus in long range monitoring system[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2002, 23 (4): 51-54, 64.
- [3] 顾胜, 祝学军, 杨华. 基于 1553B 总线的运载火箭控制系统分析[J]. 导弹与航天运载技术, 2005, (3): 9-12.

- GU Sheng, ZHU Xuejun, YANG Hua. The analysis of launch vehicle control system based on 1553B bus[J]. Missiles and Space Vehicles, 2005, (3): 9–12.
- [4] MURDOCK J K, KOENIG J R. Open systems avionics network to replace MIL-STD-1553 [C]. The 19th Digital Avionics Systems Conference, 2000.
- [5] 徐亚军, 张晓林, 熊华钢. 基于光纤通道的航空电子网络研究[J]. 遥测遥控, 2006, 27(3): 8–13.
XU Yajun, ZHANG Xiaolin, XIONG Huagang. Study of fibre channel interconnections in future avionics system[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2006, 27(3): 8–13.
- [6] 冯文全, 张晓林. 可在未来航天器电子联网系统中应用的 FC-AE-1553[J]. 遥测遥控, 2004, 25(6): 57–61.
FENG Wenquan, ZHANG Xiaolin. Study of the application of FC-AE-1553 in future spacecraft electronic networking systems[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2004, 25(6): 57–61.
- [7] 周强, 熊华钢. 民机航电 AFDX 互连可靠性建模研究[J]. 遥测遥控, 2008, 29(4): 57–63.
ZHOU Qiang, XIONG Huagang. Research on the reliability model with AFDX interconnection of civil avionics system[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2008, 29(4): 57–63.
- [8] John M. AFDX technology to improve communications on Boeing 787 [J]. Military & Aerospace Electronics, 2005.
- [9] 同江, 蔡远文, 解维奇, 等. IEEE1588 精确时钟同步技术[J]. 导弹与航天运载技术, 2010, (4): 37–40.
TONG Jiang, CAI Yuanwen, XIE Weiqi, et al. IEEE1588 precise time synchronization technology[J]. Missiles and Space Vehicles, 2010, (4): 37–40.
- [10] 张英静, 熊华钢, 刘志丹, 等. 可用于航空电子系统的时间触发以太网[J]. 电光与控制, 2015, 22(5): 49–53.
ZHANG Yingjing, XIONG Huagang, LIU Zhidan, et al. Application of TTE communication technology in avionics system[J]. Electronics Optics and Control, 2015, 22(5): 49–53.
- [11] 冯晓旺, 蓝海文. 新一代航空航天总线技术[J]. 航空制造技术, 2012, (3): 98–99.
FENG Xiaowang, LAN Haiwen. New generation aerospace bus technology[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2012, (3): 98–99.
- [12] 王小军. 中国商业航天的发展与未来[J]. 导弹与航天运载技术, 2020, (01): 1–6.
WANG Xiaojun. The development and future of China's commercial aerospace[J]. Missiles and Space Vehicles, 2020, (1): 1–6.
- [13] 刘伟, 陈曦, 杨秀山, 等. 网络控制系统及其在航天领域中的应用研究[J]. 导弹与航天运载技术, 2015, (1): 56–60.
LIU Wei, CHEN Xi, YANG Xiushan, et al. Research on network control system and its application in space area[J]. Missiles and Space Vehicles, 2015, (1): 56–60.
- [14] 刘文怡. 军工现场总线技术发展趋势与展望[J]. 计算机测量与控制, 2018, 26(7): 1–7, 20.
LIU Wenyi. Tendency and future of fieldbus technology in military industry[J]. Computer Measurement and Control, 2018, 26(7): 1–7, 20.

[作者简介]

邹 伟 1980 年生, 本科, 工程师, 主要研究方向为箭载遥测遥控。

郝现伟 1985 年生, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为箭载遥测系统和新型箭载高速总线技术。

李 菲 1995 年生, 在读博士研究生, 主要研究方向为新型高速数据传输总线。

陈开颜 1991 年生, 硕士, 工程师, 主要研究方向为运载火箭总体设计。