

时间触发以太网在运载火箭测量系统中的应用

栗登银¹ 吴登祥¹ 陈秋丰¹
SU Dengyin WU Dengxiang CHEN Qiufeng

摘要

现有测量系统采用了 LVDS、1553B、RS422 等多种总线协议构成数据传输网络, 具有接口形式多样、电缆设计复杂等缺点。时间触发以太网具有强实时性、高精度时间同步、高可靠性等特点, 能够进一步拓展使用以太网 PoE (power over ethernet) 供电功能, 改善测量系统接口形式多样的现状。从时间同步、箭地一体化设计和 PoE 供电三个方面介绍了时间触发以太网在运载火箭测量系统中的应用方案。实验结果表明, 基于时间触发以太网技术的测量系统, 实现了接口统一, 满足测量数据传输和 PoE 供电等需求。

关键词

测量系统; 时间触发以太网; 时间同步; PoE 供电

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2025.11.032

0 引言

测量系统是运载火箭电气系统重要组成部分, 其功能是实时监测火箭内部各设备工作状态, 为飞行过程的实时监测和事后数据分析提供数据支持。目前, 运载火箭测量系统设备种类繁多, 数量庞大, 且分布在火箭的各个舱段。这些设备之间的数据传输主要依赖于 LVDS、RS422/485 和 1553B 等多种总线协议, 传输介质则采用光纤和 RS422 串口线等, 形成了高、中、低不同速率的数据传输能力。尽管现有的混合总线应用方式在一定程度上满足了数据传输需求, 但也暴露出诸多问题。首先, 通信带宽的不足, 使数据传输的效率降低和容量受到限制, 难以满足不断增长的数据需求; 其次, 接口种类繁多增加了系统的复杂性和维护难度; 最后, 电缆网设计复杂增加了系统的重量和成本^[1-4]。

时间触发以太网 (time-triggered ethernet, TTE) 技术以其独特的优势, 对以上问题的解决提供了新的思路。首先, 以太网使用五类线/六类线, 成本低廉, 可以显著降低系统的整体费用。其次, 以太网可以满足数据传输的需求, 通过更改配置就能满足不同需求, 灵活性和扩展性都很高^[5-6]。此外以太网还支持通过 PoE (power over ethernet) 为设备供电, 简化了箭上供电电路设计, 减少了电缆数量。最后, 以太网具备高精度的时间同步能力, 能够确保数据传输的时序一致性, 为实时监控和数据分析提供可靠保障。

时间触发以太网技术的引入, 能够有效解决运载火箭测量系统存在的数据量大、接口协议多和电缆复杂等问题。通

过以太网的一体化设计, 可以实现测量系统箭地一体化的升级换代, 提高系统整体性能和可靠性。

1 时间触发以太网技术

时间触发以太网是一种确定性的网络通信技术, 它以标准以太网为基础, 旨在满足高实时性、高可靠性和强同步性的通信需求。它通过引入时间触发、时间同步、速率受限通信等机制, 在传统以太网的基础上进行数据传输, 满足其确定性和高实时性需求^[7-8]。如图 1 所示。

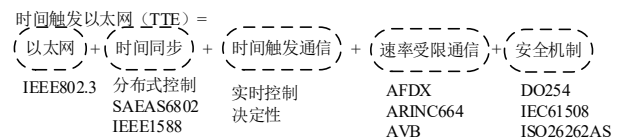


图 1 时间触发以太网示意图

时间触发以太网的核心原理是将网络通信划分为多个时间窗口, 每个时间窗口对应特定的通信任务。通过精确的时间同步和调度机制, 时间触发以太网确保关键数据在预定的时间窗口内传输, 避免传统以太网中因竞争、冲突而产生的问题。时间触发以太网网络中的每个节点都遵循全局统一的时间基准, 数据传输严格按照预定时间表执行, 这种机制使得数据传输的时间是可预测和可控的。

时间触发以太网的通信流量分为三类: 时间触发 (TT) 流量、速率约束 (RC) 流量和尽力而为 (BE) 流量。TT 流量用于传输最关键、对实时性要求最高的数据, 如控制指令和传感器数据; RC 流量用于传输较为重要但对实时性要求稍低的数据, 如状态信息和日志数据; BE 流量则用于传输

1. 中国人民解放军 63723 部队 山西忻州 036300

非关键数据，如文件传输和配置信息。通过这种分级传输机制，时间触发以太网能够确保关键数据的实时可靠传输，同时充分利用网络带宽^[9-10]。

时间触发以太网的技术特点分别为：

（1）高确定性。时间触发以太网最核心的好处就是它的确定性。也就是说，数据传输的时间是可预测的，也是可控的。通过时间触发机制，能够确保关键数据在预定的时间窗口内传输，从而有效地避免了传统以太网中由于竞争、冲突而产生的不确定因素。

（2）强实时性。时间触发以太网能够满足高实时性需求，确保关键数据的及时传输和处理。实验表明，TT 流量的端到端延迟可控制在微秒级，完全符合高实时性应用场景的要求。

（3）良好的兼容性。时间触发以太网保持了与传统以太网的兼容性，能够无缝集成到现有网络基础设施中。这意味着不需更换现有网络硬件，只需通过软件升级就可实现，降低了部署成本。

（4）高可靠性。时间触发以太网通过冗余设计及容错机制进行操作，显著提升了系统的抗干扰能力和故障容忍度。即使某些节点出现故障，仍能保持系统正常运行，保证数据的可靠传输。

（5）高精度同步。通过采用精确的时间同步协议，实现高精度的全网节点时间同步。测试数据显示，时间触发以太网网络的同步精度可达 100 ns 级别，这种高精度同步能力极大地改善了多源数据的时间一致性。

2 现有的测量系统数据传输方案

测量系统以遥测数据为核心，监测各系统工作状态。箭上设备主要由温度、压力等类型传感器及变换器、数据采集编器、数据综合装置、发射机、存储器、电池及配套的电缆网组成。现有测量系统数据传输一般采用主从模式，遵循级间分级采集、逐步综合的方式完成数据采集、变换和传输。不同类型数据，其传输速率要求也不同，因此采用了多种数据传输协议。压力、温度等缓变量参数数据量小，一般使用 RS422 串口协议进行传输。图像数据量大，采用 LVDS 协议更合适。数据综合装置作为 1553B 总线上的监听设备，获取总线数据^[11-12]。系统构成如图 2 所示。传感器及数据采集编器采集、变换温度、压力、过载等数据，经过采样、量化、编码等步骤后，传送给数据综合装置。数据综合装置是测量系统的关键单机，完成测量数据采集、综合以及按照帧格式对数据进行编码，形成 PCM 数据流，之后将其传送给发射机进行信道编码以增加抗干扰能力。另外，数据综合装置还可

以将 PCM 数据流送入存储器进行冗余备份保存。

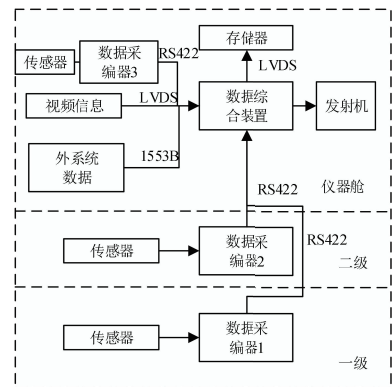


图 2 测量系统现有数据传输方案

现有测量系统数据传输模式中，不同设备之间的数据传输采用 LVDS、RS422、1553B 等总线协议，能够适应不同速率数据传输需求。通过将多种数据传输总线协议混合应用，能够搭建适应不同传输速率要求的火箭测量系统。然而，测量系统采用多种总线协议也存在不足，主要表现在：

（1）不同类型总线协议需要不同的传输电缆，导致电缆种类多样，设计复杂，容易造成系统重量超过设计指标；

（2）多种协议的使用，使得数据传输格式不统一，造成数据共享困难，影响了数据判读效率^[13]；

（3）电缆通用性差，难以大规模设计生产，电缆出现故障后，更换速度慢，在商业航天快速发射的背景下，难以实现降本增效的目的。

3 时间触发以太网的应用

测量系统采用“1 个中心 +N 个远端”星型拓扑结构进行数据采集汇总，充分利用时间触发以太网和传统测量系统的功能和特点，能够统一测量系统采用的数据传输协议，降低电缆网设计复杂度。测量系统各设备之间的数据传输均采用时间触发以太网总线协议。传感器及数据采集编器为端节点设备，将采集的数据按照以太网规定的数据包格式发送给数据交换机，数据交换机用于实现数据的高速传输以及通过堆叠或级联方式扩展网络。基于时间触发以太网的测量系统方案如图 3 所示。

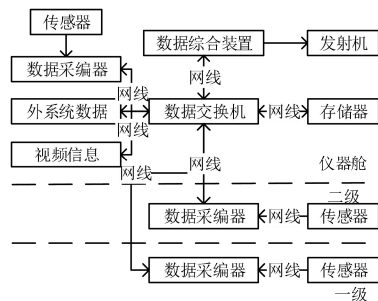


图 3 基于时间触发以太网的测量系统方案

图3中数据交换机、传感器、数据采编器等设备均支持PoE供电。数据交换机是系统的重要组成部分,功能是数据传输和供电,通过PoE技术为数据采编器、传感器等设备提供电源,并将数据传输到数据综合装置。数据综合装置从数据交换机获取各类参数,进行测量数据编帧。基于时间触发以太网总线协议的测量系统通过严格的时间同步进行设备之间的数据通信。将时间调度周期划分为多个时间间隔,每个设备占用固定的时间间隔进行数据传输。

3.1 时间同步方法

基于时间触发以太网技术的测量系统数据传输的调度是在全局精确同步的基准下进行的,经过全局时钟同步,使得时间触发消息(TT)具有时间上的严格确定性。

根据SAE AS6802协议,将数据交换机和数据综合装置设置为同步主控制器,其他采编设备设置为同步客户端。同步主控制器提供全网时间基准,定时发送同步协议控制帧(protocol control frame, PCF),供同步客户端校准时间。数据综合装置和数据交换机同为同步主控制器,为网络提供了冗余能力,保证系统能够持续稳定运行。数据交换机作为同步主控制器,还负责管理调度表。调度表规定了每个TT帧的收发时间,确保消息在精确的时间点传输。在数据交换机、采编设备中先离线设计好调度表,规定TT帧的发送顺序,使得数据交换机在接收TT帧过程中避免设备之间的冲突,降低了丢包率。采编设备作为同步客户端,接收同步主控制器发送的同步消息,调整本地时钟,保持与主控制器时间一致,同时向主控制器报告自身的同步状态和健康状况。

时间触发以太网具有透明时钟传输机制。任意两个设备之间的路由随着网络拓扑的确定也就固定下来了,最大消息传输时延也就确定了。在获得了准确的时间同步后,通过加上最大消息传输时延的偏移量,最终实现建立并维护网络各节点同步时钟。

采用以上方法,使得测量系统中各设备的时间基准达到同步统一,能够按照信息传输调度表进行数据传输。

3.2 箭地一体化设计

箭地通信接口协议统一设计是测量系统的发展趋势。现有测量系统箭地通信网络协议多,接口繁杂,给一体化设计带来困难。箭上和地面设备之间通过时间触发以太网网络进行数据和指令的传送,实现箭地通信一体化设计。

如图4所示,控制台通过时间触发以太网网络发送加电、转电池供电、存储器启动记录、下载数据等指令,箭上数据综合装置、存储器等设备收到指令后,执行相关动作。数据判读计算机能够通过时间触发以太网网络实时获取数据综合装置形成的PCM数据流,以监测箭上各系统工作状态。

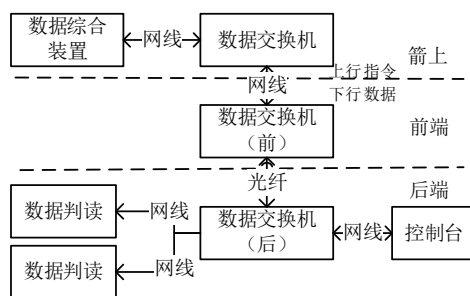


图4 箭地一体化数据传输示意图

3.3 POE 供电

以太网供电是一种可以在以太网中透过双绞线来进行供电与数据传输的技术。该技术通过采用以太网布线结构,在不需要额外电缆的情况下为网络上的设备供电,可节省电缆数量,为系统减轻重量,使整个系统的组成简洁明了,系统可靠性提高,成本降低。2003年由IEEE首次发布后,PoE技术已取得了飞跃性的发展。最新的IEEE 802.3bt标准通过五类线/六类线提供10G-BASE-T的数据传输和60~90 W的功率输出^[14]。

PoE供电通过由4对双绞线电缆(八根芯线)组成的网线实现,一般为五类线、六类线,采用RJ45型连接器与用电设备连接。供电距离一般不超过100 m。PoE供电有模式A、模式B和4-pair三种供电方式。模式A通过正极(1、2)、负极(3、6)芯线供电,4根芯线也能进行数据传输。模式B通过正极(4、5)、负极(7、8)芯线供电,当采用五类线时,4根芯线只进行供电,不进行数据传输。4-pair供电方式通过所有的芯线进行供电,其中正极为芯线1、2、4、5,负极为芯线3、6、7、8^[15]。

3.4 应用测试

按照图3和图4搭建了基于时间触发以太网网络总线测量系统测试环境,并进行验证测试。网线使用六类线,采用模式A进行PoE供电。地面控制台发送加电指令,数据综合装置和数据交换机加电,进行初始化。数据交换机状态准备好后,通过PoE供电技术给数据采编器、传感器、存储器等设备供电。整个系统供电好后,数据综合装置和数据交换机发送同步协议控制帧,完成时间同步后,系统进入工作模式。将采集到的数据通过时间触发以太网网络发送给数据综合装置进行编帧,形成三路数据流,分别传送给发射机、存储器和地面测试设备。

实验结果显示,箭上设备加电正常,电压电流都在指标范围内,设备均工作正常。各设备之间的同步时间优于100 ns。满负荷运行时,最大数据传输速率能够达到300 Mbit/s,满足瞬时大容量数据的传输。实验过程中,数据未出现丢帧、误码。存储器数据下载速率达到100 Mbit/s,

相比于传统的 RS422 协议,节省时间约 80%。以上测试结果表明基于时间触发以太网网络的测量系统能够实现可靠高速率数据传输以及 PoE 供电。

4 结语

通过在测量系统中采用时间触发以太网技术,各个设备之间实现了高速数据通信,统一了数据通信格式,简化了设计复杂度,有利于实现数据共享共用,PoE 供电进一步简化了电缆网设计,采用通用程度高的网线,能够起到降本增效的效果。

搭建的简易测量系统,能够完整实现设备供电和数据采集、编帧、传输,证明了火箭测量系统采用时间触发以太网技术的可行性。基于时间触发以太网采用的五类线及六类线硬度较高,为适应火箭舱内空间狭小操作环境,下一步需研究不影响其性能的情况,采用的包裹材料更易敷设和弯折。

参考文献:

- [1] 王报华,郝现伟,王昕,等.FC-AE-1553 光纤总线技术在运载火箭测量系统的应用[J].导弹与航天运载技术(中英文),2023(2):137-140.
- [2] 王子瑜,胡钰,彭越,等.运载火箭地面测发控系统架构研究[J].测试技术学报,2023,37(3):185-193.
- [3] 刘帅,张喜民,郭鹏.TTE 通信技术在混合安全关键系统的应用[J].航空计算技术,2013,43(2):120-122.
- [4] 黄韬,陈长胜.TTE 时间同步协议关键算法研究和仿真分析[J].电子科技大学学报,2014,43(3):437-442.
- [5] ZHANG X Y, ZHAO X D. Architecture design of distributed redundant flight control computer based on time-triggered buses for UAVs[J].IEEE sensors journal, 2021, 21(3): 3944-3954.
- [6] ZHOU X, HE F, XIONG H G, et al. Improving end-to-end delay analysis for TT and RC traffic of TTEthernet in DIMA systems[C/OL]//2019 IEEE/AIAA 38th Digital Avionics Systems Conference (DASC). Piscataway:IEEE,2019[2025-08-25]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9081706>. DOI: 10.1109/DASC43569.2019.9081706.
- [7] 杨劲赫,李峭,汤雪乾.TTE 高完整性和标准完整性配置下同步机制和容错能力对比分析[J].载人航天,2020,26(1):63-68.
- [8] ERAMO V, FIORI T, LAVACCA F G, et al. A max plus algebra based scheduling algorithm for supporting time triggered services in ethernet networks[J].Computer communications, 2023, 198: 85-97.
- [9] 王报华,徐林丰,张金刚,等.基于时间触发以太网的遥测通信技术[J].导弹与航天运载技术(中英文),2023(4):118-122.
- [10] 张秀再,范阳,周硕.时间触发以太网流量调度研究进展[J].电讯技术,2025,65(1):152-162.
- [11] 彭逸飞,涂晓东,许都,等.时间触发以太网与时间敏感网络时钟同步失效对比分析[J].电子科技大学学报,2023,52(5):718-727.
- [12] 赵漫菲,姚蕊,王浩枫,等.TTE 时间触发以太网技术在国产化平台中的应用[J].计算机工程与设计,2021,42(11):3018-3025.
- [13] ZHONG C M, JIA H Y, WAN H, et al. DRLS: a deep reinforcement learning based scheduler for time-triggered Ethernet [C/OL]//2021 International Conference on Computer Communications and Networks (ICCCN). Piscataway:IEEE,2021[2025-09-10]. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9522239>. DOI:10.1109/ICCCN52240.2021.9522239.
- [14] CHEN H, WANG L D, SHEN P, et al. Static schedule generation for time-triggered ethernet based on fuzzy particle swarm optimization[J]. Chinese journal of electronics, 2019, 28(6): 1250-1258.
- [15] 邢培峰.基于 PoE 供电的楼宇智能互联照明系统设计[J].智能建筑与智慧城市,2024(3):150-152.

【作者简介】

栗登银(1987—),男,湖北建始人,硕士,工程师,研究方向:遥测数据处理。

吴登祥(1993—),男,浙江温州人,本科,工程师,研究方向:遥测数据处理。

陈秋丰(1983—),男,山西长治人,本科,研究方向:遥测数据处理。

(收稿日期:2025-03-26 修回日期:2025-10-29)