

EtherCAT 在编队卫星动力学仿真测试中的应用研究

张少坡 陆文高 赵川 王梦园

(航天东方红卫星有限公司 北京 100094)

摘要: 针对编队卫星在轨的精确队形控制需求,以及卫星研制中地面动力学仿真测试需结合编队飞行的特点,提出一种基于 EtherCAT 总线的编队卫星动力学分布式仿真测试系统。该仿真系统在传统单星动力学仿真计算的基础上,通过 EtherCAT 网络实现了分布式仿真系统构建,充分利用 EtherCAT 网络实时性高、拓扑结构灵活、可扩展的特点,实现编队卫星在轨星间数据、队形拓扑、动力学特性实时仿真,并具备综合调度和数据管理功能。通过构建 EtherCAT 分布式仿真测试系统,设计综合调度软件,对分布式仿真测试系统的实时性进行了验证。经验证分布式仿真系统能够实现优于 1 ms 的系统实时性,可以满足编队卫星动力学仿真测试的要求。

关键词: EtherCAT;编队卫星;动力学;仿真

中图分类号: TP274, TN06 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1050

Satellite formation dynamics simulation test system based on EtherCAT

Zhang Shaopo Lu Wengao Zhao Chuan Wang Mengyuan

(DFH Satellite Co., Ltd., Beijing 100094, China)

Abstract: Generally, formation flying should be taken into consideration during satellite development. Aiming at the demand of precise formation control, a distributed dynamics simulation and test system for formation flying satellites based on EtherCAT is proposed in this article, compared with traditional single satellite dynamics simulation systems. Taking the advantages of EtherCAT's real-time character, flexible topology and extensibility, the system is capable of integrated dispatching and data management, including the real-time simulation function of satellite data, formation topology and dynamic characteristics. In this paper, the validity has been demonstrated by constructing the EtherCAT based distributed system and designing the integrated dispatching software. Finally, the real-time performance of the proposed system has been tested and verified better than 1 ms, which meets the requirement of satellite formation dynamics simulation and test.

Keywords: EtherCAT; satellite formation; dynamics; simulation

0 引言

近年来小卫星技术得到快速发展,尤其是商业小卫星的发展极大地带动了小卫星星群的发展。小卫星星群编队飞行组成的“虚拟大卫星”具有应变能力好、可靠性高、灵活性高等优势,编队飞行时功能和性能能够达到甚至超过大卫星^[1]。因此,国内外卫星制造商和运用商都在开展数百颗甚至是上千颗的小卫星星群建设。编队星群通常是由不同载荷的卫星以特定队形运行的,每个卫星都同其他卫星保持联系,实现队形控制、轨道保持,完成信号处理、通信、有效载荷工作等,其任务功能由整个编队飞行的各个卫星共同来完成。编队飞行各星相互协同工作,卫星系统的各颗卫星按自己的轨道特性运行,只有外加星间闭路控制系

统才能保证它们按编队飞行要求保持队形^[2-3]。

鉴于以上编队星群的特点,在星群的地面研制及测试中,需要针对星群编队的特点开展专项测试,实现编队星群卫星队形控制、轨道控制、姿态控制等动力学的地面仿真测试,传统的单星动力学仿真设备无法满足多星编队的仿真需求,必须要结合编队星群的多星、分布式、数据实时交互的特点,构建地面动力学仿真测试系统。

分布式网络化仿真系统可以针对星群的特点开展星群动力学仿真。地面测试设备的拓扑架构依赖于星群组网卫星的拓扑形式^[4]。工业串、并口的总线、拓扑结构单一,数据传输量较小,受到极大约束。网络总线可以基于以太网实现星群在轨仿真设备的网络化集成,通过路由器实现网络测试设备组网及数据交互,但基于 TCP/IP 协议的以太

网,在数据发送之前必须和对方建立可靠的连接线路,在保证数据传输有效性的同时降低了网络速度和实时性,而且轮询的访问方式效率并不高^[5-7]。

近些年,工业现场技术不断发展,工业以太网技术具备高传输速率、高实时性的优点。EtherCAT作为一种工业以太网解决方案,其高速、简单、易于实现的特点获得了大量关注和应用,并已经发展成熟^[8-9]。将EtherCAT技术应用到编队星群的动力学仿真测试中,完全可以实现分布式、多节点、高实时性的系统仿真^[10]。

1 EtherCAT 网络技术

1.1 EtherCAT 原理及组成

EtherCAT是在2003年由德国倍福公司提出的一种新型以太网技术,它以传统以太网为基础,充分利用了以太网全双工特点,并在实时性上进行了改进,使其具备了更高的网络传输速度,可以采用多种拓扑结构,数据通信率高,易于实现。目前,EtherCAT在工业实时控制中得到了广泛的应用,技术已经趋于成熟^[11]。

EtherCAT以标准网卡为主站,专用芯片为从站,网络最多可连接65 536台设备,其运行原理如图1所示,EtherCAT采用主站控制从站收发数据的主从模式介质访问方式,主站发送数据帧,经过从站设备1时,从站设备读取报文中相关数据,同时将输出数据写入到报文中,报文到下一个从站执行,依次完成所有从站的操作后,报文返回到主站,完成一个通信周期。整个数据的通信过程,从站控制器都是通过硬件实现的,与运行协议堆栈软件的CPU的性能及实时系统性能无关,保证了通信的实时性。一个通信过程,报文延迟在纳秒量级,报文最大长度为1 498字节,发送接收的压缩帧中包含大量的设备数据,有效数据达到90%以上。

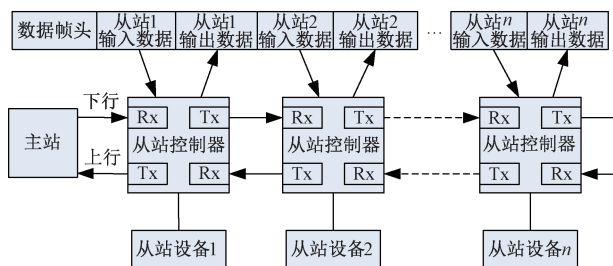


图1 EtherCAT运行原理

EtherCAT支持多种拓扑类型,支持多种传输电缆,通过交换机或介质转换器实现不同布线的结合。EtherCAT主站使用标准以太网控制器实现,从站采用专用芯片完成,从站需要完成通信和控制应用两个功能,分为通信控制器、控制微处理器、物理层器件和其他应用层器件。

1.2 EtherCAT 通信协议

EtherCAT以标准以太网为基础,帧类型识别字0x88A4,

数据可以在UDP/IP协议中传输。EtherCAT数据帧结构由目的地址、源地址、帧类型(0x88A4)、EtherCAT头、若干子报文、CRC校验构成。图2所示为EtherCAT数据帧结构,其中包含了若干子报文,子报文由子报文头、数据区、WKC(working count,工作计数器(寻址次数))构成;子报文头包含命令(寻址方式及读写方式)、索引号、子报文地址、长度、M(报文后是否还有报文)、状态位(中断标示)。子报文WKC是16位的计数,EtherCAT报文完成一次从站寻址,从站自动完成WKC加1操作,通过比较返回报文的WKC值是否为期望值来校验报文传输的正确性。

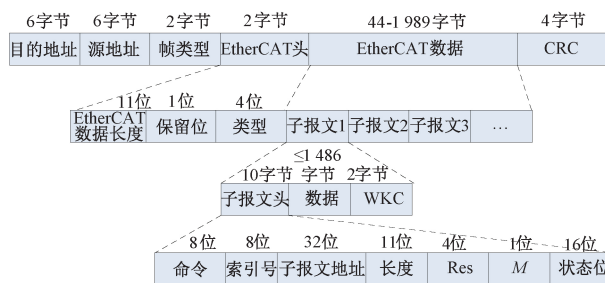


图2 EtherCAT数据帧结构

在编队卫星的动力学仿真测试中,为了仿真的真实性,保证卫星高效协同运行,各分系统之间需要准确的时间同步和数据实时交互,尤其是对卫星数量较多的编队飞行,需要对节点间数据传输延迟进行控制^[12-13]。通常卫星在轨控制周期在100~1 000 ms之间,地面动力学仿真测试中仿真周期通常是1~100 ms,相比在轨状态小一个数量级^[14-15]。编队卫星在动力学仿真中,星间数据传输延迟需要控制在100 μs以内,即比地面动力学仿真周期小一个数量级,保证仿真测试的有效性。EtherCAT的报文传输在从站都是由硬件实现的,传输速率快,实时性高,整个数据周期的延迟在几百纳秒,理论上可以满足实时仿真测试实时性的需求。

2 编队卫星动力学仿真系统设计

2.1 硬件系统架构

由于动力学计算的实时性要求高,动力学仿真计算量大,并且在轨编队卫星具备一定的姿轨控制自治权,因此编队卫星的动力学仿真计算以单星为基础,基于EtherCAT的编队卫星动力学仿真测试系统通过分布式架构,以编队卫星的主星作为EtherCAT的主站,副星作为EtherCAT的从站,实现EtherCAT网络的布局。另外,在整个仿真测试系统中具备数据库、综合调度计算机、综合测试显示设备作为辅助测试支撑,数据库实现编队卫星动力学仿真测试的数据管理和存储,综合测试显示设备作为仿真测试的图形化输出设备,综合调度计算机能够对所有动力学仿真设备进行数据通信,实现仿真测试状态设置、仿真过程的控制等相关操作指令输入。基于EtherCAT的编队卫星动力学仿真测试系统架构如图3所示。其中卫星与动力学仿真机通

过星表电缆连接,数据库、综合调度计算机、综合测试显示设备与动力学仿真机通过以太网连接。

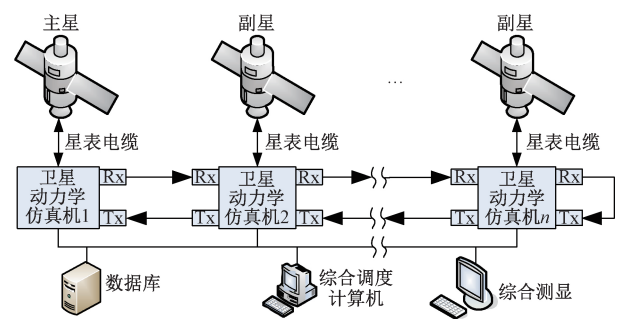


图 3 基于 EtherCAT 的编队卫星动力学仿真测试系统架构

仿真计算软件, EtherCAT 主站采用 NIC 网卡作为 EtherCAT 硬件接口, 实现简单方便。动力学仿真机从站采用 KPA 公司的基于 PCI 的 EtherCAT 板卡, KPA 公司的 EtherCAT 板卡能够支持 RTX、VxWorks 等实时系统, 方便地实现实时系统连入 EtherCAT 网络中。EtherCAT 板卡内部基于 ET 1100 芯片, 能够完全支持 EtherCAT 从站的实现^[16]。

2.2 软件系统架构

编队卫星动力学仿真测试主要完成编队卫星每个卫星的动力学仿真计算、星间动力学相关数据交互仿真、仿真测试综合控制、仿真数据管理、仿真数据显示、仿真测试报表生成。编队卫星动力学仿真测试软件系统结构如图 4 所示。软件系统架构包含由实时动力学仿真计算、EtherCAT 通信构成的动力学仿真计算系统, 以及由综合调度及控制软件、数据服务软件、综合显示软件构成的测控软件系统。

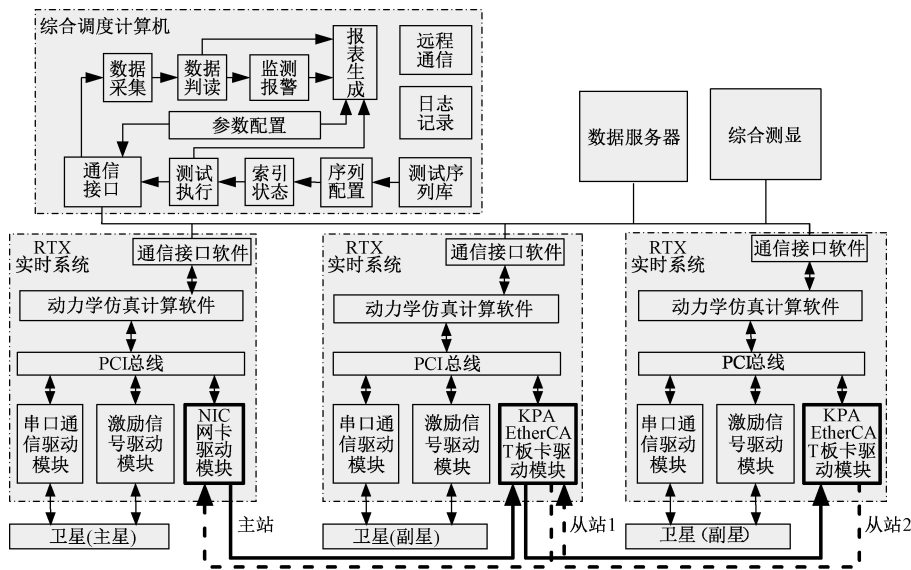


图 4 编队卫星动力学仿真测试软件架构

动力学仿真计算系统的核心是基于 RTX 实时系统的单星动力学计算软件。EtherCAT 驱动软件实现 RTX 中动力学计算软件与 EtherCAT 网络的数据交互, 串口驱动软件实现动力学计算软件与卫星基于 RS-422 串行通信接口的实时通信, 激励信号激励软件满足动力学仿真计算的姿态信息, 通过电流源激励卫星的陀螺, 通信接口软件完成基于 UDP 的数据交互工作, 包括操作参数及指令的接收、动力学仿真参数的输出等。

测控软件系统包括由测试参数配置软件、序列配置及实施软件构成的操作软件; 由数据监测及判读软件、测试报表生成软件、日志记录、测显软件构成的综合监测软件; 由基于 UDP 的通信软件和远程控制接口软件构成的通信软件; 由数据服务软件构成的综合数据库软件。测控软件能够很好地完成人机交互的功能和数据管理功能。编队卫星动力学综合仿真测试调度软件如图 5 所示。



图 5 编队卫星动力学综合仿真测试调度软件

2.3 系统实时性测试

根据上述搭建的编队卫星分布式仿真测试系统, 通过综合测试调度软件完成了分布式节点的综合调度和队形设

置。实验中设置了 12 个系统节点,进行了 1 个主星、11 个副星的编队动力学仿真,通过综合调度软件实现了 12 个节点动力学仿真节点的轨道数据、姿态四元数据的交互。测试验证了分布式系统能够在单星动力学仿真基础上实现优于 1 ms 的系统仿真实时性,通过设置各个仿真节点硬件触发输出波形的模式,测试了数据在 EtherCAT 网络各分布节点间传输的实时性,分别对主站截取了最大的传输延迟如图 6 所示,传输时间延迟为 52 μ s,优于 100 μ s。

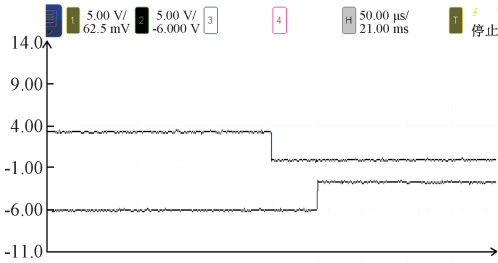


图 6 仿真系统间数据传输延迟测试

3 实验验证

完成系统搭建及实时性测试后,针对一组 4 颗卫星构成的星座开展了仿真验证工作,按照一颗主星三颗副星的状态进行设置,按照图 3 所示连接方式连接,仿真测试结果与全数字仿真结果进行比对一致。实验中主星与副星间通信数据长度一致,采用 64 字节固定长度通信协议,各仿真节点计算机系统及动力学计算部分的软件相同,具体实验情况如表 1 所示。

表 1 系统实验结果

序号	项目	本系统	设计要求
1	节点动力学仿真周期	1 ms	1 ms
2	主节点数据调度功能	满足	收发正确
3	最大通信时延	62 μ s	<100 μ s
4	星间数据仿真实时性	62 μ s	<100 μ s
5	稳定后轨道波动峰值	322 m	<500 m
6	节点拓展性	满足	可扩展
7	综合监测功能	满足	显示记录功能

通过以上实验分析,基于 EtherCAT 总线的分布式仿真测试系统的实时性满足要求,整个系统仿真优于 1 ms。在动力学仿真周期 1 ms 时,最大传输延迟 48 μ s,满足数据传输延迟优于动力学仿真周期一个数量级(优于 100 μ s)的要求,在系统稳定过程中,减少数据传输延迟影响,系统稳定后相对轨道最大峰值满足要求,满足队形控制的仿真要求。设计的测试系统数据调度功能、监测功能满足要求。

4 结 论

本文详细介绍了基于 EtherCAT 的编队卫星动力学仿真测试系统的软硬件架构及组成,基于 EtherCAT 技术实现了编队卫星动力学仿真计算之间的数据实时交互,结

合综合调度计算机、数据服务器、综合测显完成编队卫星的动力学综合仿真,能够达到地面验证编队卫星在轨动力学特性和编队飞行能力的要求。基于 EtherCAT 的分布式架构具备更好的数据实时性、灵活的拓扑结构,能够极大提升地面仿真测试的有效性。

参考文献

[1] 林来兴,张小琳.纳型卫星编队飞行技术现状及发展趋势[J].航天器工程,2017,26(5):65-73.

[2] 尤政,李滨,张晓敏,等.微小卫星编队飞行仿真平台设计[J].清华大学学报(自然科学版),2006(2):199-202.

[3] 林来兴,张小琳.星群、星座与编队飞行的概念辨析[J].航天器工程,2012,21(5):97-102.

[4] SABOL C, BURNS R, MCLAUGHLIN C A. Satellite formation flying design and evolution[J]. Journal of Spacecraft & Rockets, 2012, 38 (2): 270-278.

[5] 王玉梅,赵宏卫,陈家林.基于 EtherCAT 的井下电网防越级跳闸方案研究[J].电子测量技术,2016,39(11):164-167.

[6] 周德新,蒋红菊.EtherCAT 技术在机载测试系统通信中的应用[J].测控技术,2014,33(10):89-92.

[7] BRIDGES C P, SAUTER L, PALMER P. Formation deployment & separation simulation of multi-satellite scenarios using satlauncher [C]. IEEE Aerospace Conference. IEEE Computer Society, 2011:1-9.

[8] 赵君,刘卫国,彭喆.基于 EtherCAT 总线的分布式测控系统设计[J].计算机测量与控制,2012,20(1):11-14.

[9] 党选举,刘亚平,姜辉,等.EtherCAT 从站设计及精确时钟同步技术研究[J].测控技术,2017,36(2):99-103.

[10] ROSTAN M, STUBBS J E, DZILNO D. EtherCAT enabled advanced control architecture [C]. Advanced Semiconductor Manufacturing Conference, IEEE, 2010: 39-44.

[11] JANSEN D, BUTTNER H. Real-time ethernet: The EtherCAT solution [J]. Computing & Control Engineering, 2004, 15 (1): 16-21.

[12] ZHANG C, WANG Y, ZHAO Y. Agent-based distributed simulation technology of satellite formation flying [C]. Software Engineering, IEEE, 2014:13-16.

[13] 林来兴.卫星编队飞行动力学仿真及其应用[J].中国空间科学技术,2005,4(2):26-33.

[14] 苏振华,齐晶,张少坡.一种便携式微纳卫星姿控测试系统[J].国外电子测量技术,2017,36(10):73-76.

[15] 冯向军,廖瑛,杨雪榕,等.卫星控制仿真数据库管理系统软件的自动化测试[J].航天控制,2006(2):38-42.

[16] JIA H, YAO P F, LI B Z. Four axes wear-resistant coating testing system based on EtherCAT [C]. Chinese Automation Congress(CAC), 2017:2842-2846.

作者简介

张少坡,硕士、工程师,主要从事小卫星控制系统测试及相关技术研究。

E-mail:zhangsp_control@163.com