

基于 TTP/C 总线的开放式电子控制器的设计 及 HIL 仿真试验研究

余之杰¹, 张天宏¹, 陈建², 刘冬冬²

(1. 南京航空航天大学 江苏省航空动力系统重点实验室, 南京 210016; 2. 中航工业动力控制系统研究所, 江苏无锡 214063)

摘要: 开放式电子控制器具有模块化程度高、可靠性好、维护方便、全寿命周期成本低等特点, 是未来航空发动机电子控制器的发展方向之一。基于自主开发的 TTP/C 总线构建了 1 个拥有 3 个智能节点的开放式电子控制器, 实现了主机控制器与 TTP/C 总线控制器的接口设计, 以及转速信号和油针位置信号的采集及其闭环控制和转速闭环控制功能, 利用 FADEC 系统接口模拟器开展了 HIL 仿真试验研究。研究表明: 基于 TTP/C 总线构建的开放式电子控制器的各智能节点能协调可靠地实现发动机的控制功能, 同时具有实时性好、安全性高、开发维护方便等特点。

关键词: 开放式电子控制器; TTP/C 总线; HIL 仿真试验; 航空发动机

中图分类号: V233.7

文献标识码: A

doi:10.13477/j.cnki.aeroengine.2015.06.017

Design and HIL Simulation Verification of Open Electronic Control Based on TTP/C Bus

YU Zhi-jie¹, ZHANG Tian-hong¹, CHEN Jian², LIU Dong-dong²

(1. Jiangsu Province Key Laboratory of Aerospace Power System, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China; 2. AVIC Aeroengine Control Research Institute, Wuxi Jiangsu 214063, China)

Abstract: Open electronic controller with good modularity, high reliability, easy maintenance and low life-cycle cost is one of the possibilities of the aeroengine electronic controller in the future. An open electronic controller with 3 smart nodes was designed based on self-designed TTP / C bus. Interface between the host controller and bus controller, signal on speed and oil needle position collected, closed-loop control and speed closed-loop control were achieved. HIL simulation verification was carried out with FADEC (Full Authority Digital Engine Control) system interface simulator. Results show that smart node of the open electronic controller can achieve reliable and real-time engine control, it has advantages such as good real-time performance, high safety, and convenient maintenance.

Key words: open electronic controller; TTP/C bus; HIL simulation; aeroengine

0 引言

目前航空发动机数字式电子控制器(Digital Electronic Engine Controller, DEEC)一般采用集中式架构,其计算任务集中在某 1 个处理器上。这种架构导致软件设计难度大、故障检测及系统重构设计复杂、维护升级成本高、系统可重用性差等问题^[1-3]。先进的 DEEC 应具备较好的开放结构特性,一般具备以下特点:(1)硬件子模块具备高度的通用性;(2)运行在

硬件子模块上的软件代码可以在不同的硬件平台上移植;(3)任意 1 个子模块的修改或更换不影响其它模块^[2-6]。

TTP/C 总线是 1 种先进的基于时间触发协议(Timer Trigger Protocol, TTP)的数据总线,其中 C 是指该协议达到了 SAE 的 C 类标准^[7]。TTP/C 总线具有严格时间确定性、安全关键性和完全分布式的特点,比 TTCAN、Flex Ray 总线具有更完备的容错机制,比

收稿日期:2015-06-02 基金项目:江苏省优势学科项目资助

作者简介:余之杰(1990),男,在读硕士研究生,研究方向为航空发动机全权限数字电子控制;E-mail: yzj@nuaa.edu.cn。

引用格式:余之杰,张天宏,陈建,等.基于 TTP/C 总线的开放式电子控制器设计及 HIL 仿真试验研究[J].航空发动机,2015,41(6):88-92. YU Zhijie, ZHANG Tianhong, CHEN Jian, et al. Design and HIL simulation verification of open electronic control based on TTP/C bus[J]. Aeroengine, 2015, 41(6): 88-92.

ARINC659 总线具有体积小、可用性高和价格低的优势^[8]。因此,TTP/C 总线更适合构建开放式 DEEC,并已在航空航天领域得到应用^[9]。

本文基于自主开发的 TTP/C 总线控制器^[9],设计了 1 种以 FPGA+DSP 为核心的智能节点,并构建了 1 个包含 3 个智能节点的开放式架构的 DEEC。3 个智能节点协同实现开放式控制发动机油针位置和转速。最后通过接口模拟器进行 HIL 仿真验证。

1 基于 TTP/C 总线的开放式 DEEC 设计

1.1 开放式 DEEC 架构

基于 TTP/C 总线的开放式 DEEC 的一般架构如图 1 所示。控制器由多个智能节点通过 TTP/C 总线互连,每个智能节点包含 TTP/C 总线控制器和主机控制器。TTP/C 总线控制器(以下简称 TTP/C 控制器)功能由 FPGA 实现,主机控制器功能由 DSP 实现^[9]。

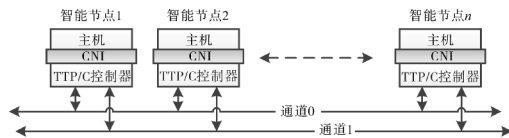


图 1 基于 TTP/C 总线的开放式 DEEC 的一般架构

1.2 智能节点设计

转速控制回路是发动机最典型的控制回路,也是最基本、最重要的控制回路,其控制性能的优劣将直接影响发动机的性能和安全^[10]。本文搭建的开放式 DEEC 包括 3 个智能节点,分别实现转速信号采集、油针位置信号采集和闭环控制、转速闭环控制功能。

智能节点设计的共同之处是 TTP/C 控制器、主机控制器与 TTP/C 控制器接口部分。智能节点控制器内部结构如图 2 所示。基于 FPGA 的 TTP/C 控制器包括 Nios II 软核处理器、冗余收发器和接口电路等。TTP/C 控制器和主机控制器之间的数据交换通过通信网络接口(Communication Net Interface,CNI)实现。CNI 实质上是为主机与 TTP/C 控制器提供了一致性的虚拟共享内存,允许这 2 个控制器随机访问这个存储空间。CNI 内部包含 3 个数据区域:控制域、状态域和消息域。

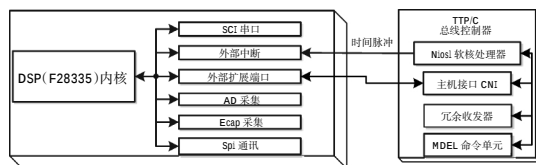


图 2 智能节点控制器内部结构

TTP/C 控制器的异常状态中断信号也通过 CNI 传递给主机。每次中断信号判断有效后,主机从中断服务程序中读取 TTP/C 控制器状态域中的中断向量列表,并通过相应的协议判断异常事件的类型,例如:控制器错误、启动同步完成、同步异常、C 状态有效等。如果 2 个控制器同时访问状态域和数据域,读取状态可能不确定,为此必须建立主机和控制器读取数据的互斥机制,防止其同时访问。CNI 接口互斥访问示意图如图 3 所示。

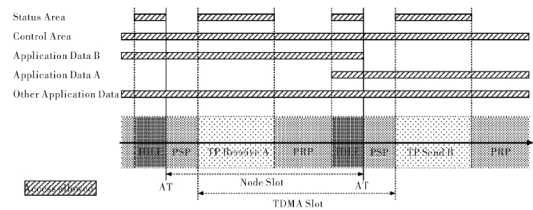


图 3 CNI 接口互斥访问

CNI 的实现方式多样,但是在安全关键领域必须阻止 TTP/C 控制器和主机之间的故障传递。为此本文的 TTP/C 控制器在 FPGA 内部构建了 1 个双口 RAM 作为公共数据区。主机 DSP 设置 1 个外部数据扩展区(XINTF),能够对双口 RAM 区的数据进行读写操作。DSP 根据 TTP/C 控制器发送的中断请求实现对双口 RAM 读写操作^[11]。

智能节点设计针对各智能节点实现的不同功能,设计相应的扩展接口电路。简要描述 3 个智能节点的设计。

(1)节点 1 为转速信号采集智能节点,用于采集转速信号。转速信号是周期性脉冲信号,本节点采用 DSP 的 ECAP 采集模块,自动捕获转速信号周期,并采用中断方式实现连续周期采集和滤波处理,以保证转速测量的可靠性。

(2)节点 2 为油针位置信号采集和控制智能节点,用于采集油针位置和闭环控制。油针位置 LVDT 信号经过调理后是电压信号,通过 DSP 的 AD 模块采集位置信号。油针是通过驱动电流控制的,电流由 DA 芯片 MAX532 输出的电压信号经电路驱动电路提供。DSP 通过 SPI 同步通讯模块控制 MAX532。

(3)节点 3 为转速控制智能节点,是主控制节点,实现转速闭环控制及与监控计算机通信。通过 DSP 的 SCI 异步通信模块实现与监控计算机的串口通信。串口发送周期为 20 ms,与转速控制步长一致,而串

口接收采用中断方式,以防止数据覆盖出错。

在节点 2 和节点 3 中均采用 PID 闭环控制算法,因为 PID 算法简单且鲁棒性好,在实际工程中得到了广泛应用。

2 HIL 仿真试验

2.1 构建 HIL 仿真试验平台

本文搭建了如图 4 所示的开放式 DEEC HIL 仿真试验平台。节点 3 通过串行通信接口与监控计算机连接,实现对开放式 DEEC 工作状态的监控。节点 1 的转速传感器信号接口、节点 2 的位置传感器及伺服阀接口与 FADEC 系统接口模拟器 NFSIE-II 连接^[12]。

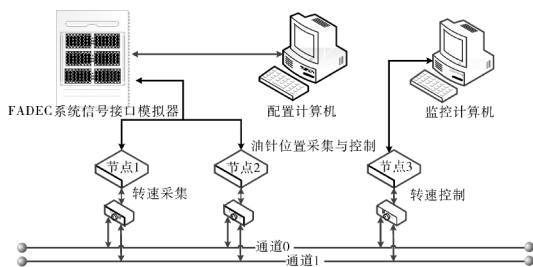


图 4 开放式 DEEC 的 HIL 仿真试验平台结构

FADEC 系统接口模拟器 NFSIE-II 是南京航空航天大学针对某电子控制器原型样机研制的仿真试验设备,具有 FADEC 系统传感器、执行机构及部分飞机系统的电气信号接口模拟能力,同时具备强大的故障注入能力^[13]。

2.2 HIL 仿真试验原理

试验原理如图 5 所示。由于转速闭环试验包含油针位置小闭环试验,所以先进行油针位置闭环控制 HIL 试验,整定油针位置控制 PID 参数,使油针位置能够迅速响应阶跃位置指令。油针位置闭环控制步长取 5 ms,以便能快速响应油针位置指令^[14]。在油针位置闭环试验响应速度达到要求的基础上,再进行转速闭环控制 HIL 试验,转速闭环控制步长取 20 ms。

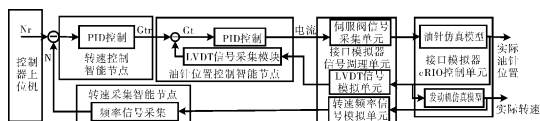


图 5 开放式电子控制器 HIL 仿真试验原理

开放式 DEEC 的 HIL 仿真试验流程如下:

(1)由监控计算机通过串口发送转速控制指令给节点 3;

(2)节点 1 将采集到的实际转速信息广播到 TTP/C 总线上;

(3)节点 3 的转速控制器根据转速控制指令和实际转速信息产生油针位置控制指令,并将其广播到 TTP/C 总线上;

(4)节点 2 从总线上获取油针位置控制指令,进行油针位置小闭环控制,并将油针实际位置等信息广播到 TTP/C 总线上;

(5)节点 3 将各节点的信息通过串口发送到监控计算机用于试验监控。

2.3 HIL 仿真试验信号标定

在接口模拟器中,需要将模型内嵌到 cRIO 中,通过 LabVIEW 建立了油针位置模型和简易的发动机模型^[14-16]。试验前需要进行信号标定,将模型输入/输出的工程量、接口模拟器电信号量和 DSP 采集/输出的工程量一一对应。

(1)转速信号标定。转速信号与接口模拟器产生的频率信号成正比,通过 2 组数据可以得到其对应关系。将接口模拟器发动机模型的转速分别设定为 0 和 120000 r/min (默认为满转速),DSP 通过 ECAP 模块采集这 2 个频率量,分别对应实际百分比转速的 0 和 100%,得到

$$N=0.05 \times f \quad (1)$$

式中: N 为实际百分比转速,范围 0~100%; f 为 DSP 采集到信号的频率量,Hz。

(2)油针位置 LVDT 信号标定。油针位置信号与接口模拟器产生的电压信号成正比,通过 2 组数据可以得到其对应关系。将接口模拟器中油针模型的油针位置分别设定为 0 和 100%,DSP 通过 AD 模块分别采集其输出电信号量,采集到的 2 个量分别对应实际油针位置的 0 和 100%,最终得到

$$G_i=0.028 \times V_{AD}-15.708 \quad (2)$$

式中: G_i 为实际油针位置,范围 0~100%; V_{AD} 为 DSP 采集的接口模拟器输出电压信号的数字量,12 位 AD 的范围为 0~4095。

(3)电流信号标定。伺服阀驱动模块所需的输出电流范围在 -40~+40 mA 之间。控制器通过 SPI 控制 MAX532 产生电压并经过驱动电路产生驱动电流。MAX532 为 12 位 DA 转换,控制指令为 0~4095。通过接口模拟器界面观察电流信号和控制指令,确定 12 位数字量与电流信号的关系。

$$I = \frac{D - 2047}{4096} \times 128 \quad (3)$$

式中: D 为数字控制量,范围 0~4095; I 为电流, mA。

2.4 HIL 仿真结果及分析

3 个智能节点控制信号与总线上的广播信号如图 5 所示。图中上面 3 条曲线分别是 3 个节点的广播控制信号,只有在其为高电平时,才允许该节点在总线上广播数据,最下面的曲线是总线上的数据信号。从图中可见,各节点的发送时段都限定在预设的时间槽内, TTP/C 总线工作正常。

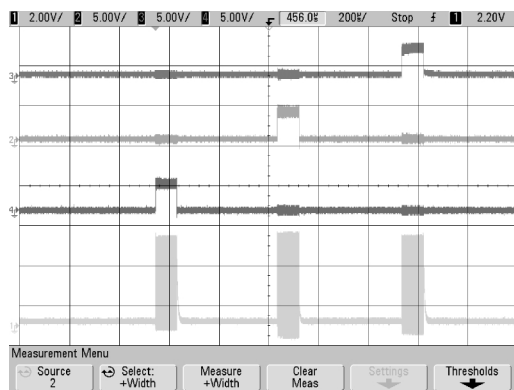


图 5 节点控制信号与总线上的广播信号

油针模型简化后是 1 个积分环节,所以在 PID 算法中,只要加入比例环节,就能实现快速无静差控制^[17]。通过整定 P 参数,优化控制效果,最终得到的油针位置闭环控制响应曲线如图 6 所示。其调节时间小于 0.5 s,无静差、无超调。

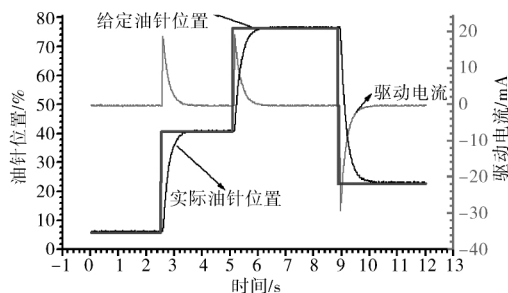


图 6 油针位置闭环控制响应曲线

阶跃位置给定时,期望油针位置与实际油针位置之间的差值较大,计算出的控制量也较大,图中电流为控制量,初始时电流较大,甚至达到饱和值。随着期望油针位置与实际油针位置接近,控制量减小,当差值为零时,控制电流为 0 mA。当给 1 个反向的阶跃位置参考量时,控制电流为负值。

优化 PID 控制效果后转速闭环控制响应曲线如

图 7 所示。从图中可见,系统调节时间小于 1 s,无静差、无超调。

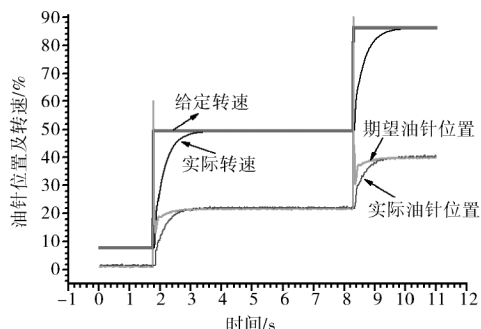


图 7 转速闭环控制响应曲线

当给定转速突然变大时,通过 PID 计算出来的期望油针位置也突然变大,实际油针位置开始变大,供油量增加,转速增大,期望油针位置下降。最终实际油针位置等于期望油针位置,这时实际转速也等于给定转速。

3 结论

(1) 基于 TTP/C 总线的开放式电子控制器各智能节点能够可靠协同工作,实现对发动机实时、可靠地控制。

(2) 这种开放式架构能够快速实现功能的扩充或改进,而对其他节点没有影响,极大地简化了系统的维护、升级过程。

总之,开放式电子控制器具有计算性能高、可扩展性好、可维修性强、全寿命周期成本低、开发和验证难度小、开发效率及可靠性高的优势,是新一代 FADEC 系统的发展方向。

参考文献:

- [1] Jeffrey J T, Dr. Kevin D Le, Sivak P. Design and system implementation considerations for high-temperature distributed engine control[R]. AIAA-2010-6674.
- [2] Alireza B. Advanced, adaptive, modular, distributed generic universal FADEC framework for intelligent propulsion control systems[C]//ACGS Committee Meeting 100. Florida: Aerospace Control and Guidance Systems Committee, 2007: 2008-2044.
- [3] Alireza B. Status vision and challenges of intelligent distributed engine control architecture[R]. AFRL-RZ-WP-TP-2008-2042.
- [4] Bhal T, Alireza B, Richard M. Vision for next generation modular adaptive generic integrated controls (MAGIC) for military/commercial turbine engine[R]. AIAA-2007-5710.
- [5] Brendan Hall, Michael Paulitsch. Jet engine control using Ethernet with

- a brain[R]. AIAA-2008-5291.
- [6] Rama K Y, Rohit K B, Alireza R B. Stability analysis of distributed engine control systems under communication packet drop [R]. AFRL-RZ-WP-TP-2008-2189.
- [7] Roman Obermaisser. Time-triggered communication [M]. Raton, CRC Press, 2011: 93-119.
- [8] 刘冬冬, 张天宏, 陈建. 开放式 FADEC 系统的数据总线技术研究[J]. 航空动力学报, 2012, 27(4): 920-929.
LIU Dongdong, ZHANG Tianhong, Chen Jian. The study on data bus of open FADEC system [J]. Journal of Aerospace Power, 2012, 27(4): 920-929. (in Chinese)
- [9] 刘冬冬. 开放式 FADEC 系统架构及可靠性建模技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2013.
LIU Dongdong. Research on architecture design and reliability modeling of open FADEC systems [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2013. (in Chinese)
- [10] 陈建. 基于 FPGA 的 TTP/C 总线控制器设计及验证[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2013.
CHEN Jian. Design and validation of a TTP/C bus controller based on FPGA [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2013. (in Chinese)
- [11] 陈建, 刘冬冬, 张天宏. 基于 TTP/C 总线的开放式 DEEC 设计及 PIL 仿真验证[J]. 航空动力学报, 2014, 29(12): 2936-2941.
CHEN Jian, LIU Dongdong, ZHANG Tianhong. The design of open DEEC based on TTP/C data bus and PIL simulation [J]. Journal of Aerospace Power, 2014, 29(12): 2936-2941. (in Chinese)
- [12] 韩建军. 基于 BIT 的双通道容错电子控制器设计及验证[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2010.
HAN Jianjun. Design and validation of a dual-channel and fault-tolerate DEEC based on BIT [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2010. (in Chinese)
- [13] 张树彦, 吕晓武, 殷锴, 等. FADEC 硬件在回路测试系统设计[J]. 测控技术, 2013, 32(9): 81-84.
ZHANG Shuyan, LYU Xiaowu, YIN Kai, et al. Design of hardware-in-the-loop test system for FADEC [J]. Measurement and Control Technology, 2013, 32(9): 81-84. (in Chinese)
- [14] 张天宏. 航空发动机数字电子控制器的 BIT 技术 [J]. 航空制造技术, 2009(18): 42-45.
ZHANG Tianhong. BIT technology of aeroengine digital electronic controller [J]. Aeroengine Manufacturing Technology, 2009(18): 42-45. (in Chinese)
- [15] 孙健国. 现代航空动力装置控制 [M]. 北京: 航空工业出版社, 2011: 93-95.
SUN Jianguo. Modern aircraft power plant control [M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2011: 93-95. (in Chinese)
- [16] 刘绍辉. 基于 PowerPC 的航空发动机电子控制器快速原型研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2013.
LIU Shaohui. A study of aeroengine electronic controller rapid prototype based on PowerPC [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2013. (in Chinese)
- [17] 殷彬彬. 基于 LabVIEW 的发动机控制系统设计技术研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2013.
YIN Binbin. Research on design technology of engine control system based on LabVIEW [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2013. (in Chinese)

(编辑: 赵明菁)