

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2017.07.073

新型机载电源控制器高效便携式测试系统设计

於二军*, 艾莉, 范新明, 闫稳, 赵君

航空工业西安航空计算技术研究所, 陕西 西安 710065

摘 要: 针对新型机载电源控制器 (PCU) 批量测试与维护保障需求, 基于 EtherCAT 总线构建 PCU_ATE 系统, 并对系统架构、硬件设计与软件设计进行了详细阐述, 该系统采用高性能 FPGA 构建低功耗硬件平台, 通过移植 KPA 协议栈实现嵌入式主站控制器功能。同时, 采用模块化设计方法开展功能从站的软硬件设计, 使 PCU_ATE 系统具备良好的可扩展性与灵活配置能力。系统测试结果表明, 与传统测试手段相比, PCU_ATE 便携式测试系统接口测试同步精度高, 提升了测试覆盖率与检测效率, 其低功耗与便携式特点大大提升了机载 PCU 产品的维护保障能力。

关键词: 电源控制器; EtherCAT 总线; 便携式测试系统

中图分类号: TP957.51 文献标识码: A 文章编号: 1007-5453 (2017) 07-0073-06

在现代先进飞机供电系统中, 供电控制单元 (Power Control Unit, PCU) 主要用于实现飞机供电系统的监控和保护功能^[1-3]。PCU 在飞机电源系统中扮演极其重要的角色, 当飞机电源系统出现故障时, PCU 根据故障控制逻辑自动切除故障单元, 防止故障蔓延, 并可以实现故障隔离与定位。同时, PCU 将冗余备份供电设备引入机载供电系统从而保证重要机载设备的用电需求, 并将机载供电系统的工作状态和 PCU 自身状态信息发送给非航空电子系统监控处理机 (NAMP)。

统计结果表明, 电源系统 66% 以上的失效都是电子产品故障引起的, 此类故障接近一半会发生在产品使用的第一年中, 地面测试不充分是隐性故障发生的一个重要原因。目前机载 PCU 产品的生产交付量大, 现有测试环境笨重, 测试手段落后, 外场保障能力弱, 亟须一种测试覆盖率高的便携式可组网 PCU 测试设备。该设备结合 PCU 产品自身的 BIT 功能, 可以将故障隔离至 SRU 级。

本文针对机载 PCU 生产与使用过程中对高覆盖率、轻量化测试能力的迫切需求, 基于 EtherCAT 总线与嵌入式高性能 ARM+FPGA 处理单元, 构建可组网的高效便携式

PCU 测试系统 (简称 PCU_ATE), 采用模块化的设计方法有效地减少了系统维护复杂度与测试耦合度, 并提高了 PCU 便携式测试系统的可扩展性。

1 系统测试原理

1.1 功能需求技术指标

PCU 是为飞机电源系统服务的管理计算机, 可实时监控飞机供电系统的工作状态, 及时对故障部分进行切除和系统重构; 同时使飞机供电系统具备机内自检测功能, 提高系统的可测试性, 减少维护时间。典型的 PCU 产品交联设备包括非航空电子系统监控处理机、发电机控制器、交/直流供电系统以及供电系统其他装置等, 因此, 要求 PCU_ATE 应具备模拟 PCU 交联设备接口电气特性与工作逻辑的能力, 其中典型的接口包括 27V/开 I/O、地/开 I/O、4~20mA、115V/400Hz 交流汇流条、28V 直流汇流条以及 RS-422 通信等。

为满足 PCU 测试需求, 并针对现有测试手段面临的问题对 PCU_ATE 提出如下要求: 该设备应具备可组网扩展能力, 测试单元间同步精度小于 1ms, 重量小于 30kg, 接

收稿日期: 2017-02-07; 录用日期: 2017-02-22

基金项目: 航空科学基金 (2014ZD31006)

* 通讯作者. Tel.: 15991895307 E-mail: fxm0708@163.com

引用格式: YU Erjun, AI li, FAN Xinming, et al. Design of efficient and portable testing system for a new airborne power control unit[J]. Aeronautical Science & Technology, 2017, 28 (07): 73-78. 於二军, 艾莉, 范新明, 等. 新型机载电源控制器高效便携式测试系统设计[J]. 航空科学技术, 2017, 28 (07): 73-78.

口测试覆盖率 98%,支持边界扫描,测试用例用户可编辑等功能。

1.2 系统运行原理

测试覆盖是度量测试完整性的一个手段,是测试有效性的一个度量。针对 PCU 产品应具备批量测试要求,本文构建的 PCU_ATE 测试系统不仅需要针对 PCU 的单机产品进行单一接口的逐点测试,同时该系统应具备仿真机载电源系统工作剖面的能力,最大限度激励被测试产品,从而达到提高产品接口与工作逻辑覆盖率的目的。

为满足以上需求,PCU_ATE 测试系统采用基于 EtherCAT 总线的分布式测控系统架构,具备系统内跨时域同步能力和基于表驱动的配置测试能力,采用接口模块化设计方法,使系统具备良好的扩展与维护能力^[4]。该系统主要由 5 个功能单元组成,系统工作原理如图 1 所示,各功能单元组成及功能为:

(1) 人机交互单元,由高性能计算机与嵌入式 EtherCAT 主站组成,主要完成人机交互、测试用例编制、测试系统供电管理、主/从站工作模式配置、数据存储与分析等功能;

(2) 主站控制单元,作为 EtherCAT 总线主站控制器,主要完成测控拓扑检测,系统从站间跨时域同步,并根据测控主机配置的信息完成测控任务的实时调度;

(3) 从站控制单元,作为 EtherCAT 总线从站控制,主要完成输入输出接口控制,并根据主站控制器配置信息完成自主配置;

(4) 信号调理与适配单元,由信号调理电路及断连工装组成,主要完成针对 PCU 连接器信号针位适配与 I/O 信号的调理,并具备故障注入接口功能;

(5) 程控供电单元,由程控电源组成,通过接收人机交互单元控制命令实现 PCU 批量测试中的供电功能,并提供过流检测与保护能力。

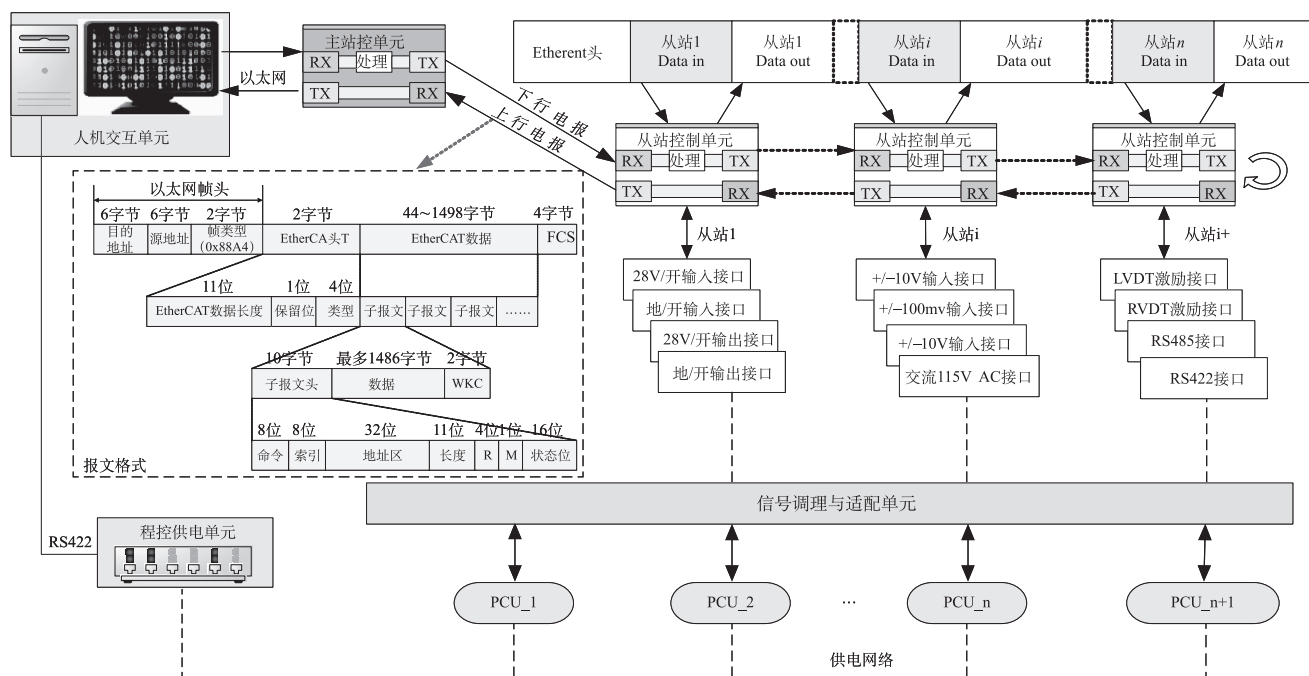


图 1 新型机载 PCU 可组网便携式测试系统原理

Fig.1 Netting and portable testing system principle of new airborne PCU

PCU_ATE 采用分布式主从工作方式,从站控制单元的数据帧处理机制允许在 EtherCAT 网段内的任一位置使用分支结构,同时该机制保证不破坏系统的逻辑环路。EtherCAT 总线可以在分支结构中构成各种物理拓扑结构,如系统可独立构成星形、树形、菊花链与线形结构,也可以实现各种拓扑逻辑的组合结构,从而使测试系统在实际布线中更加灵活方便^[5]。

EtherCAT 总线同时具备背板总线和外总线特性,系统采用从站控制器芯片 (ESC) ET1100,设计基于 LVDS 的通信接口 (EBUS) 和遵循标准以太网技术的线缆及接口。前者适合于基于机箱或板卡拼接的方式进行连接,后者适合于多终端的分布式测量。通过 EtherCAT 从站控制器提供的两种接口方式,系统可以灵活地组建多种拓扑结构的分布式测试架构。

2 系统硬件设计

2.1 EtherCAT 主站硬件设计

EtherCAT 嵌入式主站实现各从站控制器统一调度、时

间同步、各从站内测控模块的同步输入输出控制、总线数据解析与封装、网络监控及高速数据存储等功能^[6],其实现原理如图 2 所示。

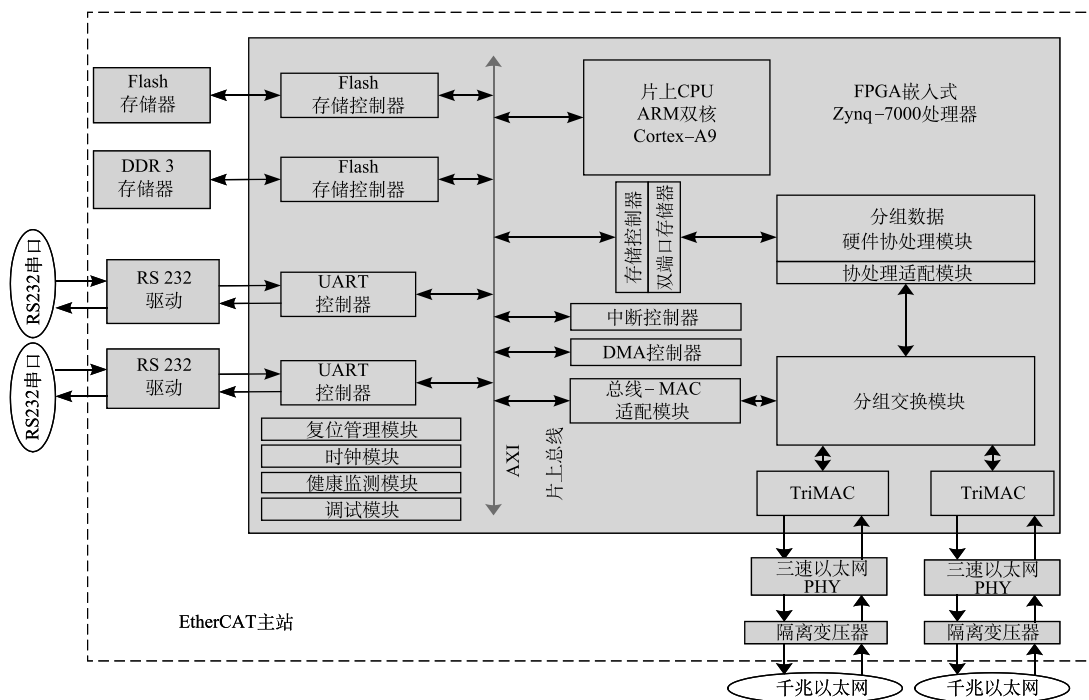


图 2 嵌入式总线控制器硬件设计框图

Fig.2 Hardware design frame of embedded bus controller

PCU_ATE 系统中嵌入式主站控制器选择 Zynq-xc7z020 高性能 FPGA 处理器,其内部包括两个 Cortex-A9 MPCore (CPU0+CPU1)、存储器接口和通用外设 3 部分并用 AXI4 实现开放式标准互联,支持单、双精度浮点运算,工作频率可达到 800MHz。其中,CPU0 运行 Vxworks 操作系统,提供实时控制功能,TCP/IP 协议栈的加载和应用程序的调试;CPU1 配置为运行裸机程序,执行中断服务函数、主要完成故障检测与系统 PHM。FPGA 逻辑部分,主要提供分组数据硬件协处理功能与分组交换功能,支持通信接口交换,支持数据预处理,实现相关通信协议和数据存储格式的协处理功能。

2.2 EtherCAT 从站硬件设计

PCU_ATE 的从站机箱内由多种功能模块组成,每个功能模块均具备独立的 FPGA 和 ESC 构成的基本总线通信单元,从站内模块间采用 E-BUS 内总线互联,从站机箱间互联通过总线耦合器或端接器和标准以太网线缆实现。

PCU_ATE 从站模块以 ET1100 为基础,根据测试系统的实际需要设计功能不同的从站功能模块。系统中主要的功能模块包括:电源模块、模拟量激励模块、可配置离散量

接口模块、模拟量采集模块、27V/ 开离散量输出模块、地/开离散量输出模块、115V/400Hz 汇流条模拟模块、通用通信模块等。各功能从站模块具有相同的硬件架构,包括通用处理单元与功能处理单元。其中,功能处理单元为各模块专用处理电路,主要完成针对 PCU 产品的接口激励功能;通用处理单元由具备并行处理能力的 FPGA 与 ET1100 构成,主要用于构建 EtherCAT 总线链路,完成主站与从站数据交互。

本文以模拟量采集从站进行设计阐述,其他功能单元设计方法类似。模拟量采集从站基于 FPGA 实现 ESC 通信控制、信号通道配置、数据采集控制以及数据处理,硬件架构如图 3 所示。模拟量采集从站工作时,首先待测信号经过信号调理电路完成阻抗匹配、比例控制与低通滤波处理,调理后的模拟信号由 A/D 转换器进行模数转换,模拟量数据在 FPGA 中的数字滤波器进行截止频率可配置的滤波环节,形成与待测模拟信号对应的高精度数字测量值,最后操作 ET1100 将数据封装至数据帧中传输至主站完成模拟量采集功能。

模拟量采集从站使用 6 片 AD7656 实现,该模拟量采

集芯片是一种 SAR 型双极性多通道自同步模数转换器, 可实现 16 位 6 通道同步采样, 每通道的数据吞吐率可达 250ksps (功耗 160mW), 省电模式下, 功耗可降至 16.5 μ W, 相比较同类双极性模数转换器功耗降低了 60%。

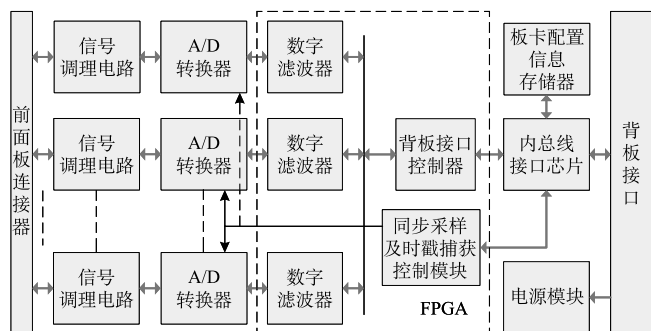


图 3 数据采集从站工作原理
Fig.3 Principle of data acquisition of slave nodes

3 系统软件设计

PCU_ATE 系统软件主要由 EtherCAT 主站软件设计和 EtherCAT 从站软件构成。

3.1 EtherCAT 主站软件设计

PCU_ATE 系统基于 EtherCAT 主站硬件平台, 通过移植 KPA EtherCAT 主站软件实现系统主站管理功能。KPA EtherCAT 主站软件根据功能不同, 提供了 Basic、Standard、Premium 和 Extension 4 个版本主站协议栈, 除支持 ETG1500 定义了 Class A 和 Class B 两种主站类型外, KPA 还支持一些拓展功能, 如设置不同的访问权限 (Access Rights)、线缆冗余 (Cable Redundancy)、多主站 (Multi Master)、记录数据和报文 (Data-and-Frame-Logger)、热插拔 (Hot-Connect) 等。KAP 提供基于多种硬件平台和 OS 的开发包, 支持 SoC (ARM+FPGA) /ARM/X86/PowerPC 等硬件平台, 支持 Linux (Xenomai/RT) /Windows (INtime/RTX) /QNX/Ucos/Vxworks 等, 本系统选用 Vxworks 操作系统进行 KAP 协议栈移植。

KAP 主站协议栈采用模块化架构, 具备良好的可扩展性, 如图 4 所示。KPA 主要功能模块为:

(1) 应用层: 应用层负责与各种不同的编程 / 配置环境交互, 负责与不同的应用或设备交互。确保在应用或过程任务端顺利访问主站功能函数; 与主站通过 Remote Procedure Calls 服务交互, 提供了 TCP/IP 以及 UDP 连接, 如通过 UDP 与从站设备进行 Mailbox 相关的通信。

(2) Mailbox Module: EtherCAT 主站核心 Mailbox 模块

利用不同的协议处理服务数据对象 (SDP), 数据传输以及数据交换。支持 CoE, FoE, EoE, SoE, VoE, AoE 等邮箱服务。

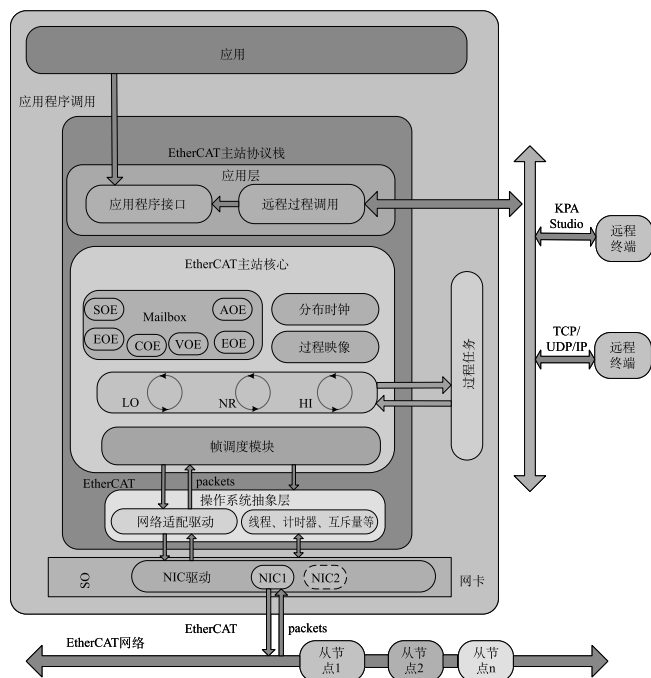


图 4 KPA EtherCAT 主站架构
Fig.4 Frame of master nodes of KPA EtherCAT

(3) Process Image Module 过程映像模块 Process Image 简称 PI, 它的地址是由 EtherCAT Network Information (ENI) 文件提出, ENI 文件可由配置工具 KPA Studio 自动生成。从控制 / 过程任务访问过程映像是由主站接口执行的。

(4) Distribution Clock 分布时钟模块: 使得所有的 EtherCAT 设备 (包括主站和从站) 总是能够共享相同的 EtherCAT 系统时间。这是通过补偿编译和漂移时间来实现。

(5) Frame Schedule Module 帧调度模块: 不同 PDO 采用不同的扫描周期。在配置工具 KPA Studio 里用户可以单独定义每个从站的扫描速率。帧调度表模块管理 EtherCAT 帧速率, 转发它们到 EtherCAT 网络驱动。

(6) OSAL 操作系统抽象层模块: 包含与操作系统相关的功能函数的包装, 如处理线程、计时器、互斥量等; 包括网络适配驱动器模块: 从底层的网络实现提取主站堆栈的 Core 核心。

同时, 为了满足实际的需求, 将嵌入式主站的启动分为两种模式: 第一种模式是配置模式, 当系统第一次启动或在后续的启动中需要修改配置信息时, 由人机交互终端通过

千兆网口向 PCU_ATE 主站发送 XML 配置信息,将主站的工作模式设置成配置模式。在配置模式下,主站需要完成一些必要的参数配置并将配置信息写入从站 EEPROM;第二种模式是工作模式,系统上电默认处于工作模式,在该模式下各从站通过加载 EEPROM 中的工作参数配置信息自动进行初始化和周期运行。

3.2 EtherCAT 从站软件设计

PCU_ATE 系统功能从站通过 EtherCAT 总线实现接口控制与数据交互,并根据总线命令完成工作模式配置。系统中功能从站软件主要包括网络通信模块与功能任务模块。网络通信模块为系统中所有功能从站共有特征软件,功能任务模块需要根据从站任务需求进行编制。本文仅对共用网络通信模块进行介绍。

网络接口模块软件主要完成 MCI 接口控制,系统分布时钟,状态机处理、总线数据操作,EOE、邮箱通信处理等协议处理,并根据系统 ICD 完成 EtherCAT 数据包的封装与解析。功能任务模块通过获取网络接口模块的数据包,根据应用层协议规定完成过程数据交互及接口控制。网络接口模块的 3 个状态机设计如图 5 所示。

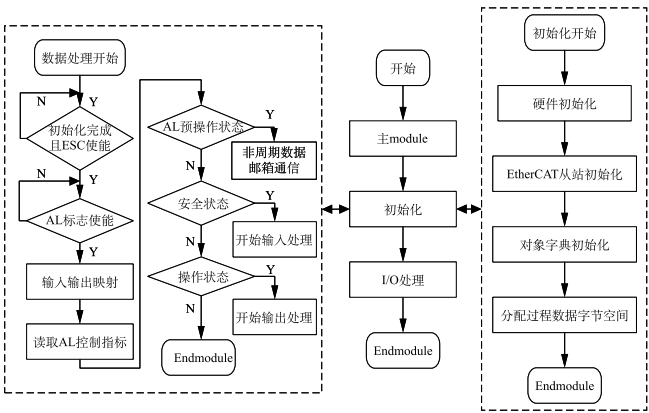


图 5 网络接口程序总流程图
Fig.5 General flow chart of network interface program

4 系统测试结果

基于以上设计方法设计了新型机载电源控制器轻量级测试系统,与传统基于工控机、功能板卡、调理单元的实现方式相比,其在小型化、减重、性能等方面均有较大的提升,对比结果如表 1 所示。PCU_ATE 系统的模拟量采集从站单元实物如图 6 所示。

表 1 不同测试方法测试结果对比
Table 1 Testing results contrast of diffident testing measures

	PCU_ATE	传统工控设备	人工测试
测试时间	10min	25min	2.5h
测试覆盖率	>98%	≤ 90%	<80%
体积	60mm × 55mm × 17.78mm (长 × 宽 × 高)	60mm × 55mm × 1800mm (长 × 宽 × 高)	标准仪器设备组成 体积大
接线关系	简单	简单	复杂
重量	≤ 20kg	> 70kg	> 50kg
功耗	≤ 130W	> 500W	> 800W
经济性	成本较低	成本高	成本低



图 6 PCU_ATE 系统模拟量采集从站单元实物
Fig.6 The product of analog signals acquisition slave node of PCU_ATE system

5 结束语

本文提出的 PCU 测试系统设计方法,基于 EtherCAT 总线构建嵌入式主从站网络架构,在硬件设计方面考虑了测试过程中的可靠性、实时性、安全性与可扩展性要求,采用嵌入式实时系统代替传统的 Windows 系统工控平台,不仅提高了测试效率,也解决了传统测试方法无法模拟精准时序测试的缺陷,提高了 PCU 产品的测试覆盖率,同时 PCU_ATE 系统具备良好的便携特性,可以为机载 PCU 产品外场排故与维护工作提供强有力的保障条件。

参考文献

- [1] XIE Wei, ZHANG Xiaobin, ZHANG Pengsong, et al. Design of tester system for Power Control Unit (PCU) [J]. Computer Measurement & Control, 2010, 18 (9): 2207–2209.
- [2] ZHANG Xiaobin, LI Weilin, ZHENG Xiancheng, et al. Design of power control unit for aircraft based on DSP2812[J]. Computer Measurement & Control, 2009, 17 (5): 980–986.
- [3] MA Qiang, WANG Boyang. Design of portable power control unit test system based on LabWindows/CVI[J]. Electronic Design Engineering, 2011, 19 (12): 147–149.
- [4] ZHAO Jun, LIU Weiguo, PENG Zhe. Distributed measurement and control system based on EtherCAT bus[J]. Computer Measurement & Control, 2012, 35 (10): 1492–1496.
- [5] ZHAO Jun, SONG Shoujun, LIU Weiguo, et al. Study on the distributed synchronous acquisition function based on EtherCAT bus[C]//International Conference on Electrical and Control Engineering (ICECE' 11), 2011.
- [6] ZHAO Jun, ZHANG Zhen, YAN Wen, et al. Study on

network-based comprehensive testing of a new avionic UMS[J]. Measurement & Control Technology, 2015, 34 (6): 92–95.

作者简介

於二军 (1981—) 男, 硕士, 高级工程师。主要研究方向: 新型机载机电系统嵌入式智能控制、机电系统综合仿真与评估技术。

Tel: 15991895307

E-mail: fxm0708@163.com

艾利 (1983—) 女, 学士, 高级工程师。主要研究方向: 机载计算机设计与应用。

范新明 (1989—) 男, 硕士, 助理工程师。主要研究方向: 机载计算机设计与应用。

闫稳 (1975—) 女, 学士, 副研究员。主要研究方向: 机载机电系统嵌入式智能控制, 机电系统综合管理技术。

赵君 (1982—) 男, 博士, 高级工程师。主要研究方向: 新型机载机电系统嵌入式智能控制技术。

Design of Efficient and Portable Testing System for a New Airborne Power Control Unit

YU Erjun*, AI li, FAN Xinming, YAN Wen, ZHAO Jun

AVIC Xi'an Aeronautics Computing Technique Research Institute, Xi'an 710065, China

Abstract: According to the requirements for the batch testing and maintenance and support of the new airborne Power Control Unit (PCU), designed the PCU Automatic Test Equipment (PCU_ATE) system based on EtherCAT bus and expounded the system framework, hardware design and software design in detail. The system adopted high performance FPGA to build the low power hardware platform, realizing the embedded master node function by migrating the protocol stack of KPA. Meanwhile, based on modular design concept, designed the hardware and software of the functional slave nodes, thus the PCU_ATE system has better extensibility and flexible configuration. The results show that, compared with the traditional testing, the system using PCU_ATE with the low power and portable character, has advantages in high synchronous precision, high testing coverage and detecting ratio, which improves the capability of maintenance and support enormously for the PCU.

Key Words: PCU; EtherCAT bus; portable testing system

Received: 2017-02-07; Accepted: 2017-02-22

Foundation item: Aeronautical Science Foundation of China (2014ZD31006)

*Corresponding author. Tel.: 15991895307 E-mail: fxm0708@163.com