

引用格式:黎黎,乔德治,何世民,等.星载计算机软件通用测试平台的设计与实现[J].微电子学与计算机,2019,36(3):23-27.
[LI Li, QIAO De-zhi, HE Shi-min, et al. Design and implementation of universal software test platform for on-board computer[J]. Microelectronics & Computer, 2019, 36(3): 23-27.]

星载计算机软件通用测试平台的设计与实现

黎 黎, 乔德治, 何世民, 李晓锋

(北京控制工程研究所, 北京 100190)

摘 要: 为了实现星载计算机软件的测试通用化, 本文提出了一种星载计算机软件通用测试平台的设计与实现方案. 该方案以真实 CPU 主板为核心, 利用 FPGA 模拟 CPU 外设, 形成星载计算机软件运行的目标系统; 通过模块化设计及参数配置, 实现测试平台在不同型号的软件测试中的应用; 通过对地面仿真软件与 FPGA 逻辑的设计, 可准确施加测试激励和捕获测试结果. 将该测试平台应用在不同航天飞行器的星载计算机软件测试中, 其结果表明使用该测试平台可对星载计算机软件进行有效测试, 可实现星载计算机软件测试平台的通用化, 并具有研制周期短、成本低的特点.

关键词: 星载计算机; 测试平台; 软件测试

中图分类号: TP311

文献标识码: A

文章编号: 1000—7180(2019)03—0023—05

Design and implementation of universal software test platform for on-board computer

LI Li, QIAO De-zhi, HE Shi-min, LI Xiao-feng

(Beijing Institute of Control Engineering, Beijing 100190, China)

Abstract: This paper provides a design and implementation of universal software test platform for on-board computer which aims to realize testing generalization. By taking real CPU as the core and utilizing FPGA to simulate peripherals, this platform makes a target system for the software. The test platform is universal for different aerospace craft projects with modular design and parameter configuration. The design of ground simulation software and the logic of FPGA can apply testing incentives and capture results accurately. With proposing in a variety of testing tasks, the results show that the platform is effective, and it has the advantages of short development period and low cost.

Key words: on-board computer; test platform; software test

1 引言

星载计算机软件为实时嵌入式软件, 其正确性与硬件时序关系较大^[1], 因此软件研发过程中的调试、测试需依托半物理仿真环境. 传统的软件测试平台是针对真实的软件运行目标系统定制开发的, 属于专用测试设备. 该测试平台结构复杂、价格昂贵^[2]、开发周期长, 每个新研星载计算机软件的测试

平台都需要经历设计、生产、调试和使用四个过程. 但面对我国空间控制技术的飞速发展, 卫星研制任务剧增、卫星功能日趋复杂的现状, 星载计算机软件作为任务的实际载体, 对其研制效率及质量要求也与日俱增; 此外, 卫星研制模式也由单件定制和试验性生产, 逐步向小批量和批量化生产模式转变. 这些变化使得传统的软件测试平台暴露出研制效率低、研制成本高、复用性差的问题.

为了解决以上问题,本文提出了一种星载计算机软件通用测试平台的设计与实现方案.该方案可通过分析测试平台的功能和性能需求,给出星载计算机软件通用测试平台的总体设计思路、硬件和软件设计与实现方案,实现星载计算机软件半物理测试平台的通用化,并具有研制周期短、成本低的特点.

2 星载计算机软件测试平台系统设计

2.1 测试平台需求分析

为实现星载计算机软件测试平台通用化,从测试实用性和有效性出发,测试平台应具备以下功能:

(1)对星载计算机软件运行目标系统的模拟.星载计算机软件依托的嵌入式系统在一定时期内采用的 CPU 类型相对固定,但为满足型号的特定需求, CPU 外设的种类及组合应用方式是多样化的.目前,在目标系统研制完成后进行软件调试和验证的传统工作模式已经难以满足项目进度及质量要求,应针对现有 CPU 类型,在项目初期构建目标系统原型,在接近真实的硬件环境中确保软件开展调试和验证工作^[3].

(2)对测试激励的模拟及捕获测试结果.模拟与 CPU 交互的所有外部信号,信号类型和时序可配置;能够测量目标系统各输出信号间的时序相位关系;预留测试接口,方便与逻辑分析仪、CodeTest 等专业测试工具集成.

(3)人机交互及通信接口.测试平台应具备良好的交互功能,便于开展测试活动;可采用配置方式实现测试平台快速搭建;提供以太网、LVDS 等通讯接口,方便数据交互.

2.2 测试平台总体设计

传统的星载计算机软件测试平台主要由地面仿真计算机、调理箱以及星载目标系统组成.其中,地面仿真计算机和调理箱包含大量定制开发的电路板,同时需要大量电缆实现部件之间的互联,其研制成本和研制周期较长.此外,测试平台研制工作主要集中于对星载目标系统接口信号的处理,但是软件测试的关注点在于软件对硬件操作的行为和时序是否正确,至于适配不同系统的物理信号正确与否应由硬件研制方保证,软件测试平台应回避对目标系统接口电路的处理环节^[4-6].

针对星载计算机软件而言,“算法运算”与“接口操作”是其两大基本功能.算法运算取决于 CPU,为保证测试的准确性,应以真实 CPU 为软件运行载

体^[7];对于接口操作,软件测试主要关注其行为和时序,因此应确保测试设备接口操作特性与真实设备一致.利用大容量高速 FPGA 装载星上硬件产品真实 IP 核,可确保星载计算机软件操作的接口逻辑及时序与真实星载计算机硬件一致,并且信号状态易于测量^[8].对于 FPGA 不便模拟的复杂通信模块,如 CAN 总线、1553B 总线等,则采用真实协议芯片进行模拟.综合以上设计思路,一种星载计算机软件通用测试平台结构如图 1 所示.

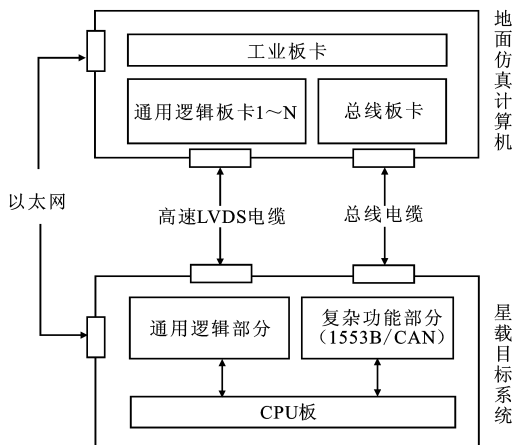


图 1 星载计算机软件通用测试平台结构图

3 星载计算机软件通用测试平台硬件设计

星载计算机软件通用测试平台硬件包括星载模拟目标系统和地面仿真系统.目标系统除 CPU 板外,可通过可编程逻辑器件搭建“通用逻辑板”实现真实星载系统中 IO 板、FT 板等外设的逻辑功能,通过“复杂功能板”以协议芯片实现 CAN 总线、1553B 总线等通信,结合“通信底板”、“电源板”构成完整的星载计算机软件运行目标系统.地面仿真系统由 PC 机及 LVDS 通信模块组成,实现空间环境、卫星部件、测控系统的模拟和测试数据处理等功能.星载计算机软件通用测试平台硬件结构如图 2 所示.

3.1 星载软件运行模拟目标系统

为实现测试设备小型化和便携化,对星载软件运行目标系统的模拟需采用一体化设计,其结构组成包括通用逻辑板(地面逻辑模块和星上逻辑模块)、复杂功能板(1553B 总线或 CAN 总线)、CPU 板、电源板和通信底板.其中,通用逻辑板、复杂功能板、CPU 板和电源板间通过通信底板完成交互.考虑未来要对复杂系统进行测试,测试设备可提供多个扩展插槽,实现容纳三块 CPU 板及四块测试板

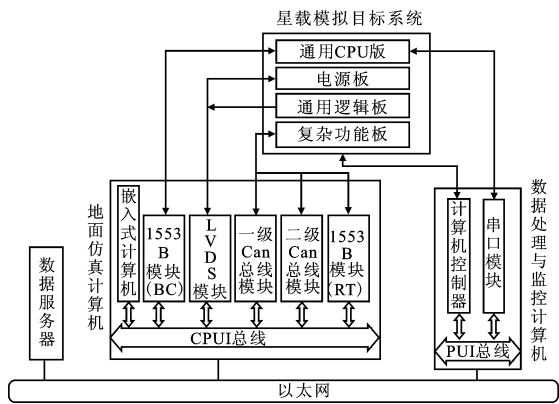


图 2 星载计算机软件通用测试平台硬件结构图

同时运行。

3.2 通用逻辑板

通用逻辑板是测试平台的重要组成,是实现快速重构星载目标系统的关键.该板卡由双 FPGA 构成,一块 FPGA 模拟星载 CPU 外设逻辑功能,另一块实现地面仿真系统的测试激励及测试数据捕获功能,两块 FPGA 相互独立,通过硬线连接,真实模拟目标系统的信号流.设计 LVDS 数据通路与地面仿真系统通信,数据吞吐率可达 800 Mbps 且稳定可靠.为加强测试数据的捕获能力,将 FPGA 的空闲 IO 扩展成逻辑分析仪监测口,实现对 CPU 板地址总线、数据总线、控制总线的实时监测,并预留与专业测试工具集成接口实现高级软件测试及分析。

3.3 复杂功能板

目前星载计算机硬件系统常用的通信总线为 1553B 和 CAN 总线,复杂功能板采用真实协议芯片模拟星载目标系统一级/二级 CAN 总线、内/外 1553B 通信接口.复杂功能板的物理端通过专用电缆与地面仿真系统的通信接口连接,数据端通过板载 FPGA 扩展映射至 CPU 板的 IO 空间内,CPU 板可以进行实时读取.板上预留一块高性能、大容量 FPGA 芯片,后期可用于模拟 CAN 或 1553B 仿真接口,进一步降低设备成本。

4 星载计算机软件通用测试平台软件设计

星载计算机软件通用测试平台的软件部分由地面闭环软件和地面 FPGA 软件组成.为了实现软件的通用性和易用性,地面软件进行了模块化设计,通过修改软件参数就可完成对不同项目的配置.软件部分结构如图 3 所示。

4.1 地面闭环仿真软件设计

地面闭环仿真软件包括下位机软件 and 上位机软

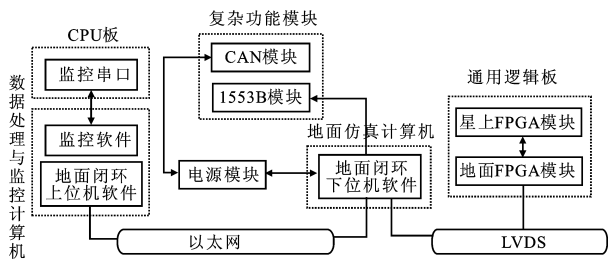


图 3 星载计算机软件通用测试平台软件结构图

件两部分,前者实时调用空间环境模型及测控仿真模型,后者实现人机交互。

4.1.1 下位机软件

下位机软件为实现空间环境仿真、测控仿真、通信、同步信号处理等模块的独立并发执行,基于实时操作系统开发,利用 LVDS 通信模块的中断接口,完成对星载目标系统下行信号的实时识别和响应.通过以太网通信接口,实现星地闭环控制以及数据监控.各型号根据其任务特点只需修改参数和重载空间模型即可实施应用.下位机软件调用流程如图 4 所示。

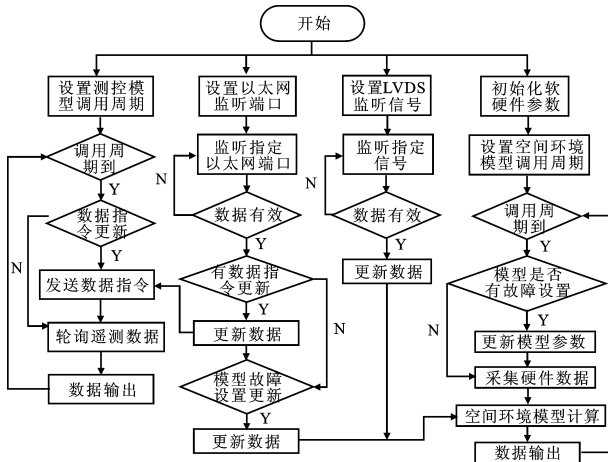


图 4 地面闭环仿真下位机软件流程图

4.1.2 上位机软件

上位机软件应具备以下功能:

- (1)遥控指令、遥控注入发送.
- (2)动力学运行状态实时干预.
- (3)各敏感器、执行机构应答数据实时干预.

上位机软件搭建涉及两部分,分别为下位机软件接口和人机交互界面,其与软件功能对应关系如表 1 所示.上位机与下位机软件的接口实际上是一组特定变量的集合,人机交互界面则是对其中每一个变量的取值进行修改的媒介.本文提出通过配置文件指导上位机软件自动生成的通用化方案.将接

表 1 上位机软件功能对应关系

软件功能	人机交互	与下位机软件接口
遥控指令发送	复选框	标志变量
遥控注入发送	注入文件选择对话框	标志变量、注入数据数组
动力学运行状态干预	复选框、下拉列表框、文本框	标志变量、数值变量或数组
敏感器、执行机构干预	复选框、下拉列表框、文本框	标志变量、数值变量或数组

口封装为一个包含所需变量的结构体,并以该结构体定义文件作为配置文件. 结构体中每个变量的注释用于约束与变量对应的人机交互界面的生成.

4.2 地面 FPGA 软件设计

地面 FPGA 软件负责模拟测试激励及捕获测试结果,按功能进行模块化设计,兼顾现有项目的正常运行模式和故障运行模式,通过配置各功能模块的使用数目及节点线序应对项目需求. 为防止信号出现杂波干扰情况,在采集输入信号前增加滤波处理,保证滤波行为有效可靠;数字量输入、输出及串口模块均设计二级缓存(RAM 和 FIFO),并通过控制 RAM 读写时序的一致性,确保数据包的完整.

4.2.1 数字信号通用输出模块

数字信号通用输出模块能够实现高低电平输出、正负单脉冲输出、有限个数脉冲输出和连续脉冲输出,可满足多种数字量信号产生的需求. 首先定义初始化设置描述,包括发送模式、脉冲宽度、脉冲个数、电平状态、信号触发延时时间以及外部信号同步设置参数,判断发送使能或同步信号有效,等待相应延时时间后依据参数配置信息产生相应高低电平输出、正负单脉冲输出、有限个数脉冲输出和连续脉冲输出.

4.2.2 数字信号通用采集模块

数字信号采集模块可通过配置通道数量和电平存储个数同时对多路数字信号进行实时采集,并存储检测到的电平状态、电平宽度以及电平变化次数信息,用于还原原始信号. 在进行数字信号采集之前,首先要进行初始化设置,设置的内容为采集通道数量和电平存储个数. 然后,获取输入信号的电平状态,开始信号采集,当检测输入信号上升沿或者下降沿时,记录电平宽度、电平个数和电平状态等信息. 在被测时间段内,地面仿真软件通过读取电平宽度、电平个数和电平状态信息可还原出星载硬件输出的数字信号波形.

4.2.3 通用异步串口模块

异步串口模块为满足物理协议与应用协议均可配置的需求,采用双向接口模式,即前端 RAM 读写实现应用协议、后端 UART 控制接口实现物理协议. RAM 读写接口提供最大 4 096 字节读写空间,其中

512 字节用于寄存器参数配置,512 字节用于发送数据缓冲,2 048 字节用于接收数据缓冲. 初始化配置寄存器后,接收数据检测命令字,与设置的命令字匹配后,根据该命令字对应的应答设置进行发送操作,应答设置包括应答延时、应答长度、应答起始地址等. UART 控制接口遵循 UART 标准协议,提供相应的可配置参数,实现全双工异步通信模式,其中检验位、停止位、波特率、起始位、数据位可配等.

当通用异步串口检测到信号后,执行开始条件,按照接口配置的物理层协议特性进行数据解析还原,得到接收判读数据,然后检测接口配置的应用层协议,并且逐字节与应用层协议进行匹配,匹配全部成功,回送应答数据完成异步串口通信,匹配不成功记录错误信息,匹配成功与否均保存接收的异步串口数据供分析使用.

5 星载计算机软件通用测试平台应用与验证

根据本文提出的设计方案,将通用测试平台先后在三个卫星控制分系统的软件测试中进行了应用. 在实际的应用过程中,通过地面软件参数配置和调试,实现了具体项目测试环境的快速搭建,可完成对被测软件的接口和算法验证,交付的软件产品未发现因设备原因导致的问题遗漏. 图 5 为随机抽取的 1 000 个采样点的动力学仿真周期、LVDS 读写周期、1553B 总线处理周期. 从图中可知,系统的平均运行精度优于 3 μ s,具有精度高、实时性强的特点,能够满足测试需求.

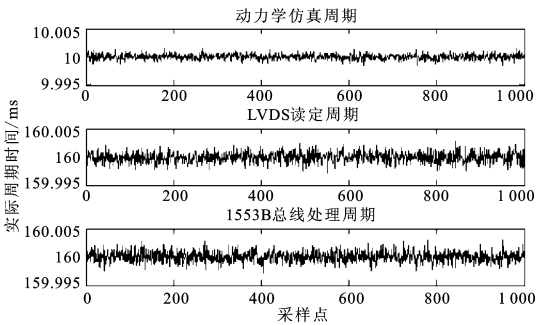


图 5 通用测试平台实际运行周期时间

6 结束语

本文根据星载嵌入式软件测试需求,提出了一种星载计算机软件通用测试平台的设计与实现方案,实现了软件运行目标系统以及地面闭环仿真系统的快速搭建和复用,其精度及实时性优于传统测试平台,并具备良好的扩展性和可维护性.

参考文献:

[1] TSAI W T, NA Y, PAUL R, et al. Adaptive scenario-based object-oriented test frameworks for testing embedded systems[C]//Proceedings of 26th Annual International on Computer Software and Applications. Oxford, England, 2002: 321-326.

[2] 付志红,马静,谢品芳,等. 基于高速数字信号处理平台的实时仿真技术[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(16): 3680-3755.

[3] 高磊,孙宁. 星载可重构计算机硬件验证平台设计[J]. 自动化仪表, 2006, 27(3): 48-51.

[4] 崔小乐,刘斌,钟德明,等. 实时嵌入式软件仿真测试平台的体系结构设计[J]. 测控技术, 2003, 22(7):

38-40.

[5] 沈永清,徐中伟. 通用嵌入式系统软件测试平台的设计[J]. 计算机工程与应用, 2007, 43(15): 83-85.

[6] 林丹丹. 嵌入式软件仿真测试平台开发[J]. 信息技术, 2012, 35(10): 77-79.

[7] 高放. 一种嵌入式仿真与测试平台的设计与实现[D]. 北京:北京邮电大学, 2009.

[8] 王轶辰,刘斌. 嵌入式软件仿真测试环境的软件体系结构设计[J]. 计算机工程与应用, 2005, 41(16): 97-99.

作者简介:

黎 黎 女, (1984-), 硕士, 工程师. 研究方向为嵌入式软件技术工作. E-mail: whisper2012@126. com.

乔德治 男, (1985-), 硕士, 工程师. 研究方向为卫星飞行器控制分系统总体设计与测试.

何世民 男, (1987-), 硕士, 工程师. 研究方向为嵌入式软件技术工作.

李晓锋 男, (1982-), 硕士, 高级工程师. 研究方向为嵌入式软件技术.

(上接第 22 页)

[11] WAINWRIGHT M J, SIMONCELLI E P. Scale mixtures of Gaussians and the statistics of natural images [C]//Advances in neural information processing systems. United States, Colorado, 2000: 855-861.

[12] LI Q, WANG Z. Reduced-reference image quality assessment using divisive normalization-based image representation[J]. IEEE journal of selected topics in signal processing, 2009, 3(2): 202-211.

[13] PORTILLA J, STRELA V, WAINWRIGHT M J, et al. Image denoising using scale mixtures of Gaussians in the wavelet domain[J]. IEEE Transactions on Image processing, 2003, 12(11): 1338-1351.

[14] 黄虹,张建秋. 彩色自然场景统计显著图模型[J]. 复旦学报: 自然科学版, 2014, 59(1): 51-58.

[15] CHEN Y, LI D, ZHANG J Q. Complementary color wavelet: a novel tool for the color image/video analysis and processing[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2017, 29(3): 1-3. DOI: 10.1109/TCSVT.2017.2776239.

[16] MA Q, ZHANG L. Saliency-based image quality assessment criterion [C]//International Conference on Intelligent Computing. Springer, Berlin, Heidelberg, 2008: 1124-1133.

[17] PRIDMORE R W. Complementary colors theory of color vision: Physiology, color mixture, color constancy and color perception[J]. Color Research & Application, 2011, 36(6): 394-412.

[18] PRIDMORE R W. Complementary colors: the structure of wavelength discrimination, uniform hue, spectral sensitivity, saturation, chromatic adaptation, and chromatic induction[J]. Color Research & Application, 2009, 34(3): 233-252.

作者简介:

陈 扬 男, (1982-), 博士研究生. 研究方向为多尺度滤波与图像处理. E-mail: IB110720040@fudan. edu. cn.

张建秋 男, (1962-), 教授、博士生导师. 研究方向为包括信息处理应用、图像处理等.