航天器综合电子系统通用测试系统设计

李 姗[1,2], 骆 培[3], 安军社[2]

(1.中国科学院大学, 100049 北京; 2.中国科学院 空间科学与应用研究中心, 100190 北京;
3.波士顿大学 电子与计算机工程系, 02215 波士顿, 美国)

摘 要: 提出了一种接口丰富、可重构扩展的模块化通用测试系统方案.引入开放式柔性测试系统设计方法,基础测试模块使用 FPGA 作为控制核心,以保证系统硬件柔性化;系统软件采用分层模块化方法设计,通过转换层统一操作系统的接口,以保证系统软件柔性化.并应用 PC/104 PLUS 与以太网两种总线技术,将测试模块灵活组合成 3 种本地测试节点模型.本地测试设备以节点的形式通过光纤网络接入测试系统,实现分布式测试系统网络,增强系统兼容性与应用范围,同时保证数据传输安全.真空罐测试和多设备联合测试实验表明该系统有能力适应不同型号任务、不同阶段、不同测试场景的综合电子系统测试工作.

关键词: 通用测试系统;开放式柔性测试系统;分布式系统;可重构
中图分类号: TP 274 **文献标志码**: A **文章编号**: 0367-6234(2014)09-0092-08

Universal test system design for the spacecraft electronic system

LI Shan[1,2], LUO Pei[3], AN Junshe[2]

(1. University of Chinese Academy of Sciences, 100049 Beijing, China; 2. National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, 100190 Beijing, China; 3. Electrical & Computer Engineering, Boston University, 02215 Boston, USA)

Abstract: This paper proposes a scalable, reconfigurable, general test system design oriented the spacecraft electronic system. The design employs open flexible test system design method. Common test interfaces are integrated into classified modules with FPGA as control core, which ensures the reconfigurability of hardware. Software utilizes modularized pattern. Application program interacts with the operating system through transfer layer which ensures reusability of software. All modules can be combined into three local testing machine models using the PC/104 PLUS and Ethernet. The optical fiber transmission technology is employed to combine all the local testing machine models into a distributed testing system. This system is compatible, universal, and secure. Vacuum tank test and multi-device joint test show that the system is competent for all kinds of electronic system testing in different scenarios.

Keywords: universal test system; open flexible test system; distributed systems; reconfigurability

航天器测试技术是指通过一系列技术手段和测试流程,全面检验航天器各个电系统(包括机电、光电、热电)的正确性和兼容性,检测航天器是否达到所要求的电性能指标,检验系统经受各种地面模拟环境考验后,性能是否恶化.通过综合测试,使不满足技术条件的性能、不完善的功能、不匹配的电气接口以及设计缺陷都得到暴露[1-2].综合电子系统是航天器中与姿轨控、热控、能源、结构与机构系统并列的五大平台系统之一,除了完成传统的遥控、遥测、程控、星上自动控制、校时等任务外,还为其他平台和载荷提供全面、综合的调度服务和信息管理[3].因此,综合电子系统的测试系统开发在航天器研制、应用中占有重要地位.传统的测试系统分为专用测试系统和通用测试系统:专用测试系统针对的是孤立任务,实用性强,但无法重复利用,易造成大量资源浪费;传统的通用测试系统是简单的大量接口的堆叠,灵活性低,

收稿日期: 2013-09-03.
基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项资助项目(XDA04060300).
作者简介: 李 姗(1989—), 女,博士研究生.
通信作者: 李 姗,lishanmg@ gmail.com.

难以扩展，实用性较差.随着航天任务数量、复杂度不断提高，传统测试系统研发工作带来的科研压力越来越大.航天事业发展的新形势对测试技术提出了更高的需求.

1　通用测试系统设计与实现

本文旨在面向航天器综合电子系统提出一套通用测试系统.该通用测试系统需要具备本地测试的功能，对单个设备进行功能测试；又需要具备网络测试功能，实现整个系统异地联合测试以及对测试过程的监控、管理及数据处理.本地测试时需具备可靠性、通用性、稳定性；联网测试时需具备低延时，高速率以及合理的拓扑结构.因此，采用开放式柔性测试系统设计方法进行本地测试系统设计；采用分布式系统设计思想将本地测试系统以节点的形式加入到以光纤网络为基础的测试网络中.

1.1　开放式柔性测试系统设计

开放式柔性测试系统（open flexible test system，OFTS）是一种能够根据测试任务需求及测试环境的变化，快速改变系统的组织模式、硬件与软件结构，以迅速调节测试功能来适应新任务和新环境的自动测试系统[4].开放式柔性测试系统的 3 项关键技术为：总线技术，可重构技术，仪器互换技术.

测试系统的组成离不开测试总线，总线本身亦成为测试系统的主要组成部分[5].开放式柔性测试系统需要便捷的总线技术，使系统能够快速改变构型来适应不同的任务.同时为了保证系统可靠性，要求总线技术尽可能的简单、高效.本系统使用 PC/104 PLUS 总线与以太网相结合的方式，结构多样，兼容性强[6-7].

可重构技术是实现开放式柔性测试系统通用性和灵活性的关键，也是构建开放式柔性测试系统的一项重要技术，需由软硬件共同保障[8-9].可重构系统的软硬件模块均能根据不同的数据流或控制流，对系统结构和算法进行重新配置，匹配不同的任务需求.硬件电路可重构的本质是利用可编程器件逻辑状态可配置的特性，根据不同任务配置不同的逻辑结构.本系统选用 SRAM 型的 FPGA 搭建硬件电路，SRAM 型 FPGA 配置信息保存在 PROM 中，可通过修改 PROM 中信息修改 FPGA 配置实现系统可重构.软件重构是在一些原因（如提高效率与可维护性等）促使下，将一个面向对象的设计以不同的方式进行重新组织从而使设计更加灵活、重用性更强的过程[10-11].本系统软件采用分层模块化方法进行软件设计，并在应用层与操作系统之间设计转换层.系统软件的开发转变为多个模块的开发，测试过程转换为按照测试项目选择模块、设置顺序、多个测试任务独立执行的过程.软件模块从实际测试过程抽象而成，拥有实用、透明、可移植的特点.

仪器互换技术能够实现测试模块互换，充分发挥测试平台的功能，更易于升级维护.硬件上，将测试接口分类模块化，并且统一测试模块的系统互连接口；软件上，将测试项目分类模块化，在各模块与操作系统间加入转换层，统一系统与功能模块的交互接口；驱动层采用通用驱动设计，兼容多种硬件模块.

1.2　系统硬件实现

系统根据测试过程中的具体需求，设计实现多种基础模块，使用 FPGA 实现模块控制核心，集成常用的综合电子系统测试接口.基础模块通过 PC/104 PLUS 总线或以太网互联，可构成适用于不同需求、不同场景的本地测试节点.节点既可以单独承担测试任务，也可将若干节点通过光纤网络与数据中心连接，组成分布式测试网络.

1.2.1　基础模块的设计与实现

基础模块分为三类，分别为基础测试模块（A 类）、辅助测试模块（B 类）和高速数据模块（C 类）.A 类模块为航天器综合电子系统常用接口功能子模块，通过总线与主控计算机相连，搭建本地测试系统.B 类辅助测试模块，具备 LED、液晶显示、按键输入等基本交互功能，通过自定义接口与 A 类测试模块相连.C 类高速总线接口模块用于本地测试节点与测试网络的连接.各类模块具体介绍见表 1.

A 类低速基础接口模块主要用于低速通讯接口的测试.航天常用接口为：RS232、RS422、RS485.由于 RS485 与 RS422 可兼容，只使用 RS232、RS485 芯片.RS232 接口采用 UART 通讯协议，RS485 接口即可采用 UART 通讯协议进行异步传输，又可采用时钟+ n 路数据+选通信号的方式进行同步传输.UART 波特率、奇偶校验位、起始终止位，同步通讯数据位宽，速率均可通过无源模块或由软件通过 PC/104 PLUS 总线或者工业以太网实现模块在线配置.

A 类高速基础接口模块主要用于高速通讯接口的测试，包含 80 路 LVDS 收发接口.航天中多用 LVDS 接口采用同步传输方式传输图像、视频.软件通过工业以太网和 PC/104 PLUS 总线进行配置及数据采集.

表 1 模块分类信息表

分类	模块名称	功能子模块	通用子模块
A 类基础测试模块	低速基础接口模块	RS422 接口(40 对),RS232 接口(10 对)	FPGA,PC/104 PLUS 总线接口,工业以太网口,变压子模块,自定义接口
	高速基础接口模块	LVDS 接口(50 对)	FPGA,PC/104 PLUS 总线接口,工业以太网口,变压子模块,自定义接口
	模拟量模块	OC 门(10 个输出 2 个输入),AD(10 个),DA(10 个),数字电阻器(10 个)	FPGA,PC/104 PLUS 总线接口,工业以太网口,变压子模块,自定义接口
	低速总线模块	CAN 总线接口(3 个),MIL-STD-1553B 总线接口(3 个)	FPGA,PC/104 PLUS 总线接口,工业以太网口,变压子模块,自定义接口
B 类辅助测试模块	无源模块	可变电位器(10 组),按键(10 个)	自定义接口
	指示模块 1	液晶显示屏(1 个),LED(30 个)	自定义接口
	指示模块 2	LED(80 个)	自定义接口
C 类高速数据模块	高速总线模块	PC/104 PLUS 总线接口(3 个),DDR2 SDRAM(2G),工业以太网接口(3 个),以太网光纤接口(1 个)	FPGA,变压子模块,自定义接口

A 类模拟量模块包含采集范围、精度可变的 AD,DA 芯片,数字电阻器,OC 门以及施密特芯片,主要用于遥测量测试,如模拟量、开关量.模拟量采集范围为-10~+10 V,0~+10 V,-10~0 V,0~+5 V,-5~0 V,-5~+5 V 可设,采集精度为 16/12/8 位可设.模拟量输出范围为-10~+10 V,0~+10 V,-10~0 V,0~+5 V,-5~0 V,-5~+5 V 可设,转换精度为 12/8/4 位可设.OC 门芯片输出开关量,施密特芯片用于优化 OC 门输入信号以便 FPGA 检测脉冲信号.软件通过 PC/104 PLUS 总线或工业以太网实现模块在线配置及数据收发.

A 类低速总线模块包含航天综合电子系统中常用的 MIL-STD-1553B 与 CAN 总线接口各 3 个,主要用于被测设备的低速总线功能测试.MIL-STD-1553B接口使用我单位自主研发的 IP 核控制.IP 核有三种工作模式:总线控制器(BC)、远程终端(RT)、总线监控器(MT).CAN 总线使用 XILINX 公司的 CAN 总线 IP 核控制.FPGA 中加入软路由算法,6 个接口的数据流向可控.软件通过 PC/104 PLUS 总线或工业以太网实现模块在线配置及数据收发.

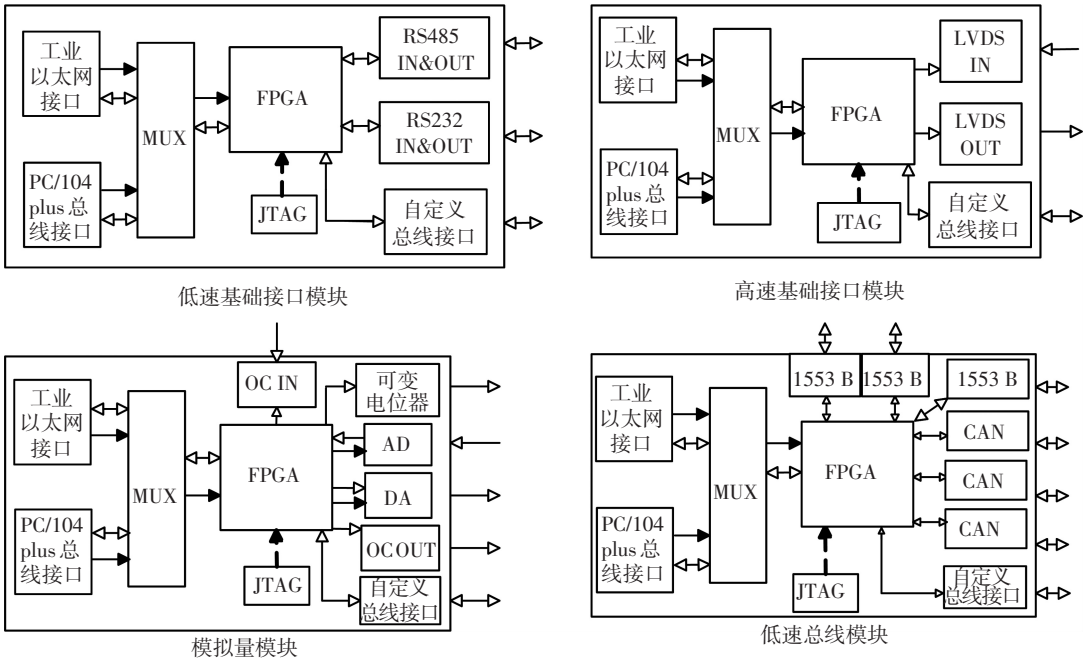

图 1 A 类模块结构

B 类辅助测试模块用于辅助测试，包含可变电位器、按键、液晶屏、LED.可变电位器，旋钮旋转度数为 3600°，精度为±5%.可通过旋钮改变电位器阻值，搭建精度极高的模拟量采集电路，以弥补 A 类模拟量模块中 DA 转换精度有限的缺陷.模块中有 10 组模拟量输出电路，每组由 100 Ω、500 Ω、1 kΩ、10 kΩ、50 kΩ 的 5 个可变电位器串联构成，电位器拥有对应的并联通路开关.通过调整外加电压幅值，以及通过开关控制接入电路中可变电位器的数量，来改变电路输出精度.按键可用于控制模块工作，液晶屏及 LED 用于显示基本工作信息.

C 类高速总线模块主要用于测试网络的连接，包含 3 个 PC/104 PLUS 接口和 3 个工业以太网接口.PC/104 PLUS 接口和工业以太网接口用于与 A 类测试模块交互，而以太网光纤接口用于与数据中心交互.PC/104 PLUS 接口使用 XILINX 公司的 PCI IP 核实现，可配置为 Target 或 Initiator 模式.以太网 MAC 层使用 XILINX 公司三态 MAC IP 核.MAC IP CORE 有 1 000 Mbps、100 Mbps 和 10 Mbps 3 种工作模式，且支持半/全双工操作，可根据测试场景进行切换.工业以太网接口的物理层芯片为 88E1111.光纤接口使用 XILINX 公司的 RocketIO GTP Transceiver IP 核实现对光信号收发模块的控制，传输速率高达 2.5 Gbps.模块中使用 DDR2 SDRAM 作为数据缓冲，解决接口间速率不匹配的问题.为了灵活配置数据流向，加入软路由算法.

1.2.2　本地测试节点模型

基础测试模块与辅助测试模块组成本地测试节点模型，根据使用总线类型及功能可分为：PC/104 PLUS 总线完全组合，PC/104 PLUS 总线简易组合，以太网组合.

PC/104 PLUS 总线完全组合使用 PC/104 PLUS 总线连接 A 类模块与 PC/104 PLUS 主板并根据需求搭配 B 类模块，最多可容纳 4 个 A 类模块.PC/104 PLUS 主板上运行基础测试软件，与其栈接的模块中配置出测试所需逻辑与待测设备相连.测试中，基础测试软件可通过 PC/104 PLUS 总线实现对各模块的配置，传输测试数据.B 类测模块通过自定义总线与 A 类测试模块相连，辅助测试.组合可通过 PC/104 PLUS 主板外接显示器，键盘鼠标完成测试工作.组合结构简单，稳定，适合现场测试、环境模拟测试及出差时随身携带.

PC/104 PLUS 总线简易组合使用 PC/104 PLUS 总线连接至多 4 个 A 类模块，测试过程无需主板或者计算机参与，完全由 FPGA 内置逻辑控制及使用 PC/104 PLUS 总线实现模块间数据传递.可根据任务需要选用 B 类模块，实现模块与测试人员的基本交互.组合高度自动化，能耗少，结构稳定，适于无人监管测试，野外测试等对能耗要求较高的场景及出差时随身携带.

以太网组合通过工业以太网连接各测试模块或者以上两种组合，由各模块配合测试计算机实现完成测试.此组合中测试计算机可为一台或多台计算机，配合软件实现测试流程控制，测试模块配置，数据处理等功能.组合可承载更多测试模块，结构灵活多变，测试覆盖面广适合本地测试中的多种测试场景.

1.2.3　分布式测试系统设计

分布式系统由若干个节点通过通讯网络联接集合而成，每个节点都拥有完整的数据管理系统.节点软件使用通用的系统编程接口，节点与节点间可以通过网络协调，共同完成单一或多项任务，实现系统的整体功能[12-14].分布式系统，系统结构清晰，容错性增强，每个节点对外可以视作黑箱，软件程序面向通信，脱离对硬件的依赖，各测试模块间相互独立，软硬件开发均可独立进行，工作时相互依赖性较小.与开放式柔性设计相辅相成，进一步增强了系统扩展性，通用性.

分布式测试网络以光纤网络为基础采用易更改维护、容错性好的星形拓扑结构的单层网络，可容纳多个节点.光纤网络延时小、速率高、容错性强，可根据传输距离选择线缆有效控制成本又可防止被分接偷听或者辐射波窃听.本地测试节点中指示模块负责显示网络状态，数据收发状态，高速总线模块负责将各本地节点接入网络，其余模块负责模拟待对接设备进行测试数据收发.数据中心通过光纤交换机实现对网络中节点的管理、监控，并将数据同步进行显示，供专家团队分析判断.数据库管理软件设计中将判断条件、配置数据抽取出来独立于测试过程，判断条件、配置数据与测试数据分别存储在数据中心的配置信息数据库和测试数据数据库中.系统分布式测试网络模型如图 2 所示.

1.3　系统软件实现

系统软件开发包含驱动程序与应用层测试程序两部分.驱动程序直接管理控制硬件并提供上层软件所需的支持；应用层测试程序负责分类显示、处理数据以及与操作系统进行数据交互.两者都使用了分层模块化的设计方法，并遵循数据和过程分离的原则.软件由相对独立且具有单一功能的模块组成，具有“模块内高内聚，模块间低耦

合”的特点[15].应用层的各模块均通过转换层与操作系统交互,保证软件的持续增长性与灵活性,随着任务的变换及技术的更新,交互接口关系不变,软件可便捷地进行维护,更新.

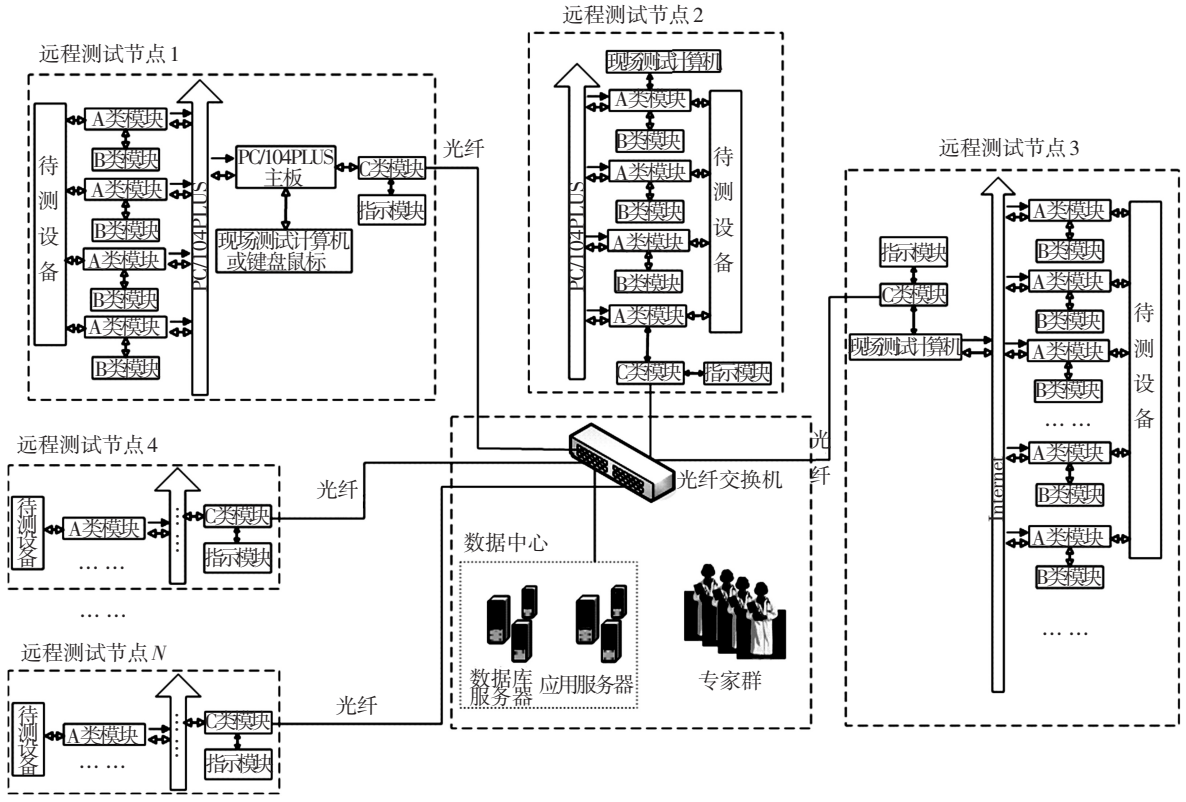

图2　系统分布式测试网络模型

测试程序根据运行平台不同分为基础测试软件与高级管理软件.基础测试软件基于 Vxworks 开发,用于 PC/104 PLUS 主板上,实现测试数据收发等基本测试功能;高级测试软件基于 WINDOWS XP 运行在测试计算机上,完成系统通讯,数据处理,系统管理等功能.

1.3.1　基础测试软件

在 PC/104 PLUS 主板上移植嵌入式实时操作系统 Vxworks.Vxworks 是一种嵌入式实时操作系统,属于占先式实时内核,适合小型系统.基础测试软件在多任务实时系统 Vxworks 基础上,自主开发应用层、设备驱动层程序.具体模块包括 RS485 收发模块、RS232 收发模块、PCI 收发模块、模拟量收发模块、数字量收发模块、LVDS 收发模块、MIL-STD-1553B 收发模块、CAN 总线收发模块、门控信号测试模块及校时模块等.以上各模块在操作系统应用层开发,并经由转换层与操作系统进行交互.设备驱动层包含 PC/104 PLUS 驱动可实现 PC/104 PLUS 主板与各模块间的底层通讯.

1.3.2　高级测试软件

高级测试软件在 WINDOWS XP 基础上开发应用层程序,应用层模块根据功能分为基础测试和高级管理两类模块,基础测试模块和基础测试软件中应用层模块相同,高级管理模块种类较多根据功能大致分为:1)根据接口、数据流向分类显示数据;2)对数据进行进一步处理,如编码,解码,压缩,解压缩等;3)自动判读数据、筛选条件设置;4)更改测试流程.设备驱动层包含以太网驱动实现模块与测试计算机、数据中心间的底层通讯.

1.4　网络联合测试

航天器电子系统中多个设备通常由不同单位研制,为了验证系统的正确性需要进行多次局部、整体的联合测试.联合测试时多家单位携带设备前往统一测试地点进行对接,每次联合测试不仅耗费大量资源,而且无法保存管理宝贵的测试数据.使用分布式测试网络,将多个待测设备通过光纤网络与数据中心连接,实现远程联合测试,监控测试过程.基于测试网络的设备测试可为 3 个阶段:独立测试、远程单机测试、远程联合测试.

1)独立测试:测试人员根据测试需求调整本地测试节点模型,使其能够充分模拟待对接设备.使用该模型对待测设备进行功能测试,并通过光纤网络将测试数据传输至数据中心,供日后对比、

查错.

2)远程单机测试:本地测试节点模型使用远程数据库中待对接设备测试时产生的真实数据,对待测设备功能进行进一步验证.首先,由测试单位向远程数据中心提出测试申请,由远程控制中心在数据库中搜寻所需数据并将其下传至申请者.

3)远程联合测试:将多个待测设备同时接入测试网络模拟现场联合测试,完成对待测设备间匹配度及系统功能的测试.测试前,本地测试设备接受远程传来的配置数据完成软硬件的配置,模拟远程设备与待测设备相连接.测试时,本地测试设备接收传来的测试数据将其发送给待测设备,实时模拟远程设备与待测设备进行数据传输.远程待测设备的测试与此相仿.

2　测试方案示例

2.1　本地测试节点应用示例(示例一)

航天设备测试有多种特殊环境模拟测试,如热循环实验.热循环试验时待测设备需置于热循环罐中,测试设备置于罐外,内外通过信号线缆连接.测试线缆经过锦纶加固等工艺后,单根线缆直径大于 1 cm,而引线口直径只有 6 cm,信号线缆较多时无法全部引出.测试时测试人员需与设备保持一定距离,信号的衰减、数据传输的实时性都影响着最终的测试结果.

测试采用以太网组合的本地测试节点,将 PC/104 PLUS 总线完全组合放入罐内模拟对接设备,通过以太网电缆、交换机与罐外测试计算机连接.PC/104 PLUS 主板中运行测试程序,测试计算机进行数据处理、判读.以某型号载荷电控箱测试为例,其对外接口有:2 路 1553B 接口,三路 RS422 接口,OC 门指令发送接口 10 个,LVDS 接收 28 路发送 4 路,遥测 7 路.选取低速基础接口模块,高速基础接口模块,模拟量模块以及低速总线模块各一个与 PC/104 PLUS 主板连接组成罐内测试部分.具体方案连接如图 3 所示.

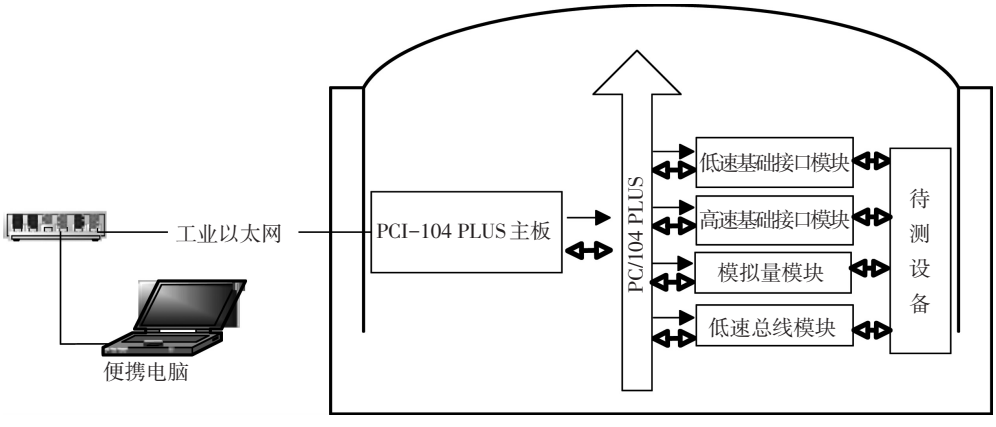

图 3　热循环实验方案连接简图

测试软件主界面如图 4,界面上方的选项卡为具体使用模块的名称.图中中间界面为 LVDS 数据输入界面,测试数据可以以 txt 或者 excel 的格式导入软件,并在软件中设置发送方式.图中左边为参数状态监视栏,监视此时数据收发状态.监视栏内项目可手动关联参数,编辑名称,设置正常阈值范围.图中下方两个小窗口,左边是中断状态监视窗口,该模块用于监视脉冲量的时间以及个数.右边为参数的曲线图,根据参数值实时绘制,时间轴范围、精度可调.

测试中 AD 采集模块监控±3.3 V 遥测、±5 V 遥测、15 V 遥测以及 28 V 遥测量,实际监测到的值与设计值对比如表 2,可知设计与实测值相符.

测试系统通过 LVDS 发送接口、RS422 模拟载荷向待测设备发送图像数据、工程参数,由待测设备进行压缩后由 LVDS 接收接口传回测试系统.测试软件使用解码模块解码后与原始数据进行比对,数据一致,满足应用需求.

PC/104 PLUS 主板完全能够满足测试需求,以太网良好的隔离性能及高传输速率保证高质量的信号传输.测试软件中模块多样,参数可灵活配置,可满足测试需求.此测试系统可通过更换模块的方式满足更多型号任务的测试,良好的满足了本地测试的需求.

2.2　联合测试应用方案(示例二)

以某型号载荷电控箱与载荷对接命令接口为例,设计远程联合测试流程.命令接口对接需要检验的内容有:开关机指令,数据发送指令.首先搭建测试平台,分别将测试设备与待测设备相连并设置工作模式搭建本地测试节点.将两端的本地测试节点通过高速总线模块接入分布式系统网络,使数据中心可监控测试设备.具体测试流程如图 5 所示,出现测试终止故障时先由本地测试人员进行故障排查,如无法解决则申请远程协助,由

远程专家群根据数据库中数据协助解决.测试成功后,分别由两端将目前的配置数据通过高速总线模块传输至数据中心.

测试前,先将两端设备接入光纤网络,待数据中心检测到两端设备后开始进入正式测试流程.测试时,为保证两端传输的实时性,由数据中心在总线上每隔 2 s 广播时间码.图 6 为总线监视模块实验时监测实况.

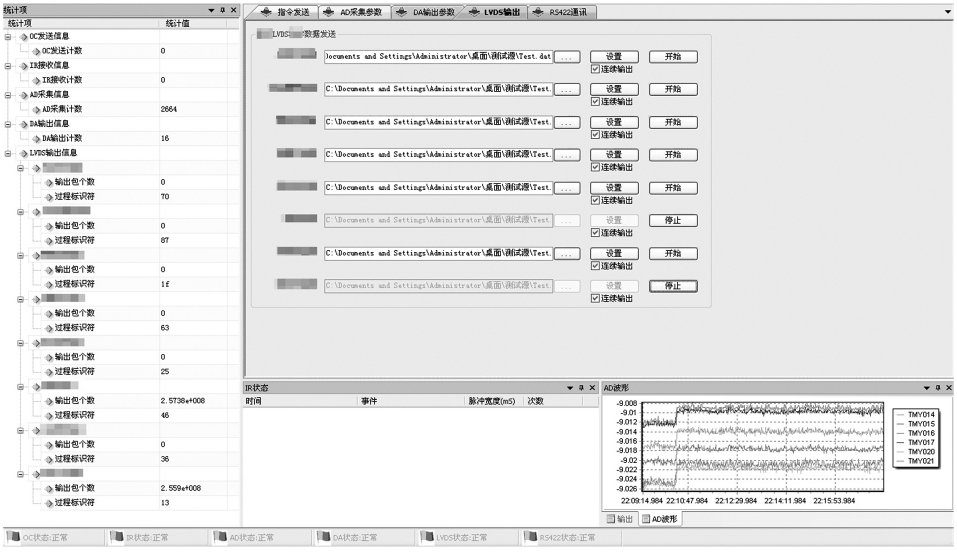

图 4 测试软件主界面

表 2 AD 遥测量比对表

项目	设计值/V	实测值/V
+3.3 V 遥测	+3.3±0.15	+3.21~+3.39
−3.3 V 遥测	−3.3±0.15	−3.41~−3.26
+5.0 V 遥测	+5.0±0.15	+4.91~+5.14
−5.0 V 遥测	−5.0±0.15	−5.11~−4.93
+15.0 V 遥测	+15.0±0.30	+14.86~+15.21
+28.0 V 遥测	+28.0±0.80	+27.42~+28.45

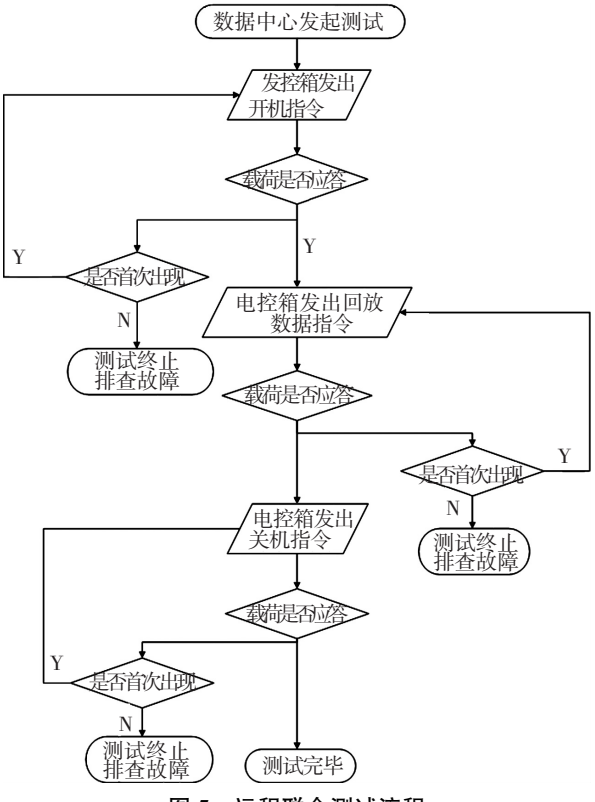

图 5 远程联合测试流程

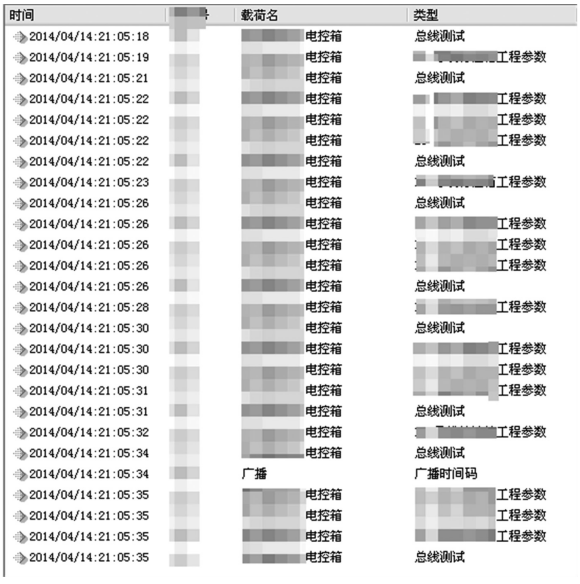

图 6 总线监视模块监测实况图

目前光纤网络单根理论传输速率为 2.5 Gbps,传输距离达百公里.实测时,两个设备相距 2 km,光纤上的最大峰值速率为 1.932 Gbps.载荷电控箱与载荷间多使用低速总线进行通讯,如:CAN 总线,1553B 总线等.这些总线的传输速率不超过 1 Mbps.目前星上设备间的数据传输常用接口为 LVDS,瞬时最大速率不超过 200 Mbps.因此光纤网络完全可以满足现阶段以及未来一段时间内的综合电子系统联合测试需求.

3　结　语

传统的测试系统开发周期长、灵活性差，越来越不能够满足日益增多空间探测任务的研发需求.本文应用开放式柔性测试系统设计方法，提出一种集成丰富接口、可重构、兼容性强的分布式测试系统.硬件基础模块通过 PC/104 PLUS 总线或以太网，可组成三种本地测试节点模型，按需求灵活搭建测试系统；软件模块化、层次化设计，利用转换层降低模块间耦合性，可快速适应不同需求和硬件架构.特殊场景测试和联合测试表明本系统通用性、拓展性、可靠性强，实现了“一机多型”和“一机多用”，可应用于不同型号任务、不同阶段、不同测试场景的综合电子系统测试工作，有效减少开发周期，极大的节约人力物力成本.

随着航天事业的发展，空间探测技术不断革新，将会对测试系统提出更高的要求.本文的后续工作将致力于紧随空间探测技术的前沿研发更多的功能模块以支持更多的任务需求.

参考文献

[1] 徐福祥.卫星工程[M].北京：中国宇航出版社，2002：5-8.

[2] 张瀚英.卫星电测技术[M].北京：中国宇航出版社，1999：15-30.

[3] 王九龙. 卫星综合电子系统现状和发展建议[J]. 航天器工程，2007，16(5)：68-73.

[4] CLENDEN IN C K. Flexible test systems - an adaptive architecture to preserve existing investment and enable use of emerging technologies [C]//IEEE Autotestcon 2004. Piscataway：IEEE，2004：45-51.

[5] 范佳平. 测试领域新技术的发展[J]. 电子产品世界，2007(04)：117-119.

[6] SHANLEY T，ANDERSON D. PCI system architecture [M]. Boston：Adison-Wesley，1999：7-9.

[7] 曹忠良，徐详征. 计算机网络与 Internet 实用教程：技术基础与实践[M]. 北京：清华大学出版社，2005：1-21.

[8] 徐惠萍. 可重构技术综述[J]. 甘肃科技，2007，23(10)：158-160.

[9] JOHNSON R E，OPDYKE WLLIAM F. Refactoring and aggregation [C]//In Proceedings of International Symposium on Object Technologies for Advanced Software. Kanazawa：[s.n.]，1993：254-278.

[10] 杨芙清，梅宏，李克勤. 软件复用与软件构件技术[J]. 电子学报，1999，21(2)：68-75.

[11] RAMACHANDRAN N，OBLAD R P，NEAG I A，et al. The role of a signal interface in supporting instrument interchangeability [C]//IEEE Autotestcon Proceedings. Piscataway：IEEE，2000：403-416.

[12] MOFFETT J D，SLOMAN M S. Policy hierarchies for distributed systems management[J]. IEEE JSAC Special Issue on Network Management，1993，11 (9)：1404-1414.

[13] 何腾蛟. 分布式系统测试模型与框架的研究与应用[D]. 成都：电子科技大学，2009.

[14] COULOURIS G，DOLLIMORE J，KINDBERG T，et al. Distributed systems：concepts and design [M]. 5th Edition. Boston：Addison-Wesley，2011：1-25.

[15] SOMMERVILLE I. Software engineering [M]. 9th Edition. Boston：Addison-Wesley，2010：415-461.

（编辑　张　宏）