

一体化小卫星综合测试系统的设计

何铭俊, 洪 雷, 曹丽君, 曾 鸿

(航天东方红卫星有限公司, 北京 100094)

摘要: 在卫星的研制测试过程中, 现有的测试设备通用性不强、开放性和灵活性不够、设备集成化程度低、自动化和智能化程度不高; 通过提出一种小型化、一体化的综合测试系统的设计方法, 并结合现有的资源进行了具体的项目开发, 为未来的小卫星提升测试效率, 降低系统成本, 缩减系统规模探索出一条新路; 实践表明, 该方案在满足现有测试要求的情况下, 在研制成本、系统体积、组建时间和无故障运行方面等均有较大改善。

关键词: 一体化; 小卫星; 测试系统

Design of Integrated Test System for Small Satellite

He Mingjun, Hong Lei, Cao Lijun, Zeng Hong

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

Abstract: During the development and testing process of satellite, the existing test equipments are not universal, lack of open and flexibility, low integration degree of equipment, not high in automation and intelligent level; This paper presents a method to design miniaturized, integrated test system, and developed by the specific project combined with the existing resources, exploring a new way with enhancing testing efficiency, reducing costs, reducing the system size for the future. Practice shows that the scheme to meet the test requirements, the development cost, the volume of the system, the formation of the time and trouble free operation and other aspects are greatly improved.

Keywords: integrated; small satellite; test system

0 引言

随着对航天产品需求的增加, 我国航天事业飞速发展, 小卫星已经成为了我国军用航天装备体系和民用航天服务体系的重要力量, 目前在小卫星综合测试方面, 已经形成了独具小卫星特色的自动化测试系统, 有力地支撑了目前各类卫星的研制测试任务。然而, 随着未来小卫星领域新型号的规划、新技术的应用、型号数量的急剧增加、任务复杂度的不断增长等, 给未来小卫星测试带来了任务数量和技术难度的双重挑战, 对综合电性能测试环节提出了更高的要求, 而目前小卫星测试在通用性、开放性和灵活性、集成化程度、自动化和智能化程度方面还远远不足。如何提高测试效率, 提高测试可靠性, 进一步提高测试智能化水平, 形成支持卫星全生命周期的测试技术, 成为影响和制约系统级测试乃至小卫星技术发展的突出问题^[1-4]。

为此, 开发小型化、一体化地面综合测试系统, 用于卫星单机及整星各个测试阶段, 为未来的小卫星提升测试效率、缩短测试时间与降低系统成本, 缩减系统规模探索出一条新路。

1 一体化综合测试系统的设计

小型化一体化地面测试系统的开发需要兼顾现有卫星测试需求和未来快速响应小卫星和批量生产小卫星的综合测试需求。以现有卫星测试需求为基础, 以快速响应小卫星的测试需求为阶段目标, 开发适用于平台测试的小型化、一体化地面测试系统。

PXI (PCI Extension for Instrumentation) 是由美国 NI 公司于 1997 年推出的测控仪器总线标准。它将 CompactPCI 规范定义的 PCI 总线技术发展成适合于试验、测量与数据采集场合应用的机械、电气和软件规范, 从而形成了新的虚拟仪器体系结构^[5]。而一体化综合测试系统正是采用 PXI 总线技术、虚拟仪器以及 NI 公司的 LabView 软件开发平台。

一体化综合测试系统总体架构图如图 1 所示, 一体化综合测试系统划分为硬件系统和软件系统两大部分, 其中硬件部分是以标准 PXI 机箱和机箱控制器为系统核心, 通过各类 PXI 板卡实现供电、测控通信、接口适配等各项功能, 各模块在电气、结构等方面符合 PXI 总线规范^[6]。该系统与常规综合测试系统最大的不同是采用工业级板卡替代现有大型测试设备, 广泛采用虚拟仪器技术, 使得系统中的各个模块能够实现自动化的集中控制。

一体化综合测试系统软件分为硬件控制相关软件和一体化综合测试集中控制软件两大类。其中硬件控制相关软件与各阶段功能模块密切相连, 一般选用 NI 公司的 LabVIEW 软件进行软件系统的开发。一体化综合测试集中控制软件主要为综合测试系统上层应用软件系统。

卫星与一体化综合测试系统通过星地接口适配器建立连接, 实现能源流和信息流的交互。

2 一体化综合测试系统的组成

2.1 硬件组成

典型的综合测试系统根据功能可以分为 4 个模块: 卫星供电控制模块, 星地测控通信模块, 星地接口适配器部分和其他扩展模块。为满足一体化测试系统高度集成、集中控制、小型化、可重构、可扩展、模块化备份等要求, 该系统采用统一 PXI 总线集成的方式^[7]。一体化综合测试系统同时支持数传、

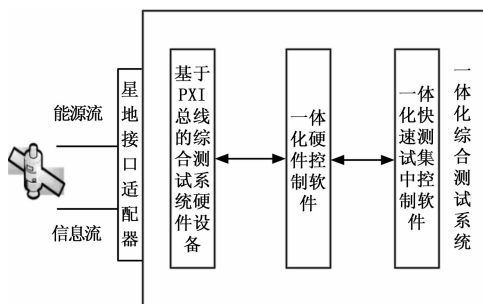


图 1 一体化综合测试系统总体架构图

姿控和载荷等设备的扩展，与其他分系统设备一样，统一采用 PXI/PXI-e 体系结构。对于个别分系统设备要求板卡较多的情况，该系统可以支持使用多个 PXI 机箱，从而适应了更好的扩展需求及系统的灵活性。

综合测试系统硬件总体结构设计如图 2 所示。

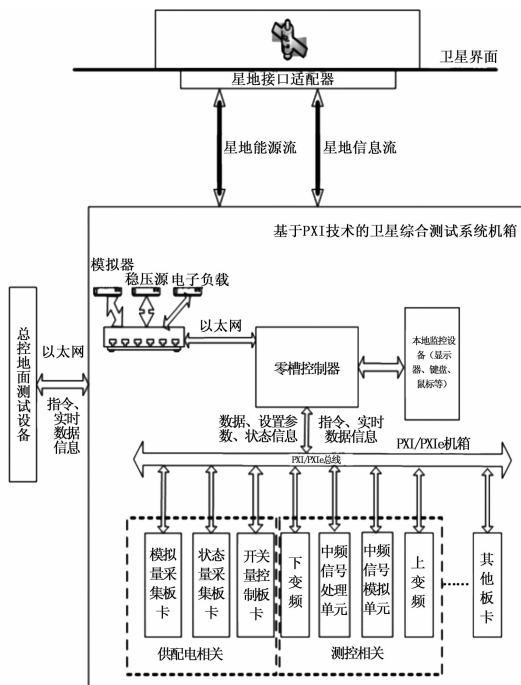


图 2 一体化综合测试系统硬件组成图

该系统是以标准 PXI 机箱和机箱控制器为系统核心，通过各类 PXI 板卡实现供电电、测控通信、接口适配等各项功能。该系统与现有系统最大的不同是采用工业级板卡替代现有大型测试设备，广泛采用虚拟仪器技术，使得系统中的各个模块能够实现自动化的集中控制。

系统机箱采用 PXIe-1065，标准机柜宽度，与 PXI、PXI Express、CompactPCI 和 Compact PCI Express 模块兼容。该机箱具有较高性能，每插槽高达 1GB/s 的专用带宽和超过 3GB/s 的系统带宽。零槽控制器采用 NI PXI-8133 嵌入式控制器，其具有 Intel core i7-820QM 四核处理器，时钟频率达到 1.73GHz，可以选用 Windows XP 系统或者 Windows 7 32 位操作系统，支持 Labview、Labwindows CVI、C/C++ 和 microsoft Visual studio、NET 等产品，可用于测试测量和控制应用。

2.1.1 供电电控制模块

一体化综合测试系统供电电分系统采用 MAC Panel 公司

生产 SCOUT 大规模互联机构来实现星地接口适配器以及设备内部信号的自由分配，最终完成整体的供电电系统的内部结构和软硬件功能。供电电模块主要由模拟量采集卡、数字量采集卡、数字量控制卡、太阳能分阵模拟器、稳压源、电子负载等设备构成，可以实现供电电模拟量和数字量的采集、控制量的输出、完成模拟器和稳压源实时工作电压电流的采集、分阵自检等功能。

PXI 继电器模块根据接收到控制器发送的控制输出指令，将控制电信号通过星地连接电缆发送至卫星，进而控制卫星上蓄电池的通断以及控制分系统的加断电。PXI 采集模块根据接收到的模拟量和状态量采集指令，对卫星上单机设备输出的模拟量和状态量进行采集，并将状态量根据高低电压处理成 1 或 0 以及将模拟量根据卫星上单机设备物理量的处理方式进行处理。

2.1.2 测控模块

一体化综合测试系统测控模块主要由变频器插卡、基于 FPGA 的中频信号处理单元及中频信号模拟单元构成，分别对应上变频模块、下变频模块、解调基带处理模块、调制基带处理模块。可以实现测控上下行链路，完成遥测信号的下变频、解扩、解调、解码，遥控数据的编码、调制、扩频、上变频，实现对卫星的遥控调制和遥测解调功能。

下变频模块接收输入的 S 频段射频信号，下变频到中频信号。解调基带处理模块对中频信号进行采样，在数字域完成扩频捕获跟踪、载波同步、帧同步、解码等工作。调制基带处理模块，对输入的遥控数据，进行加扰、编码、码型变化、扩频等运算，在数字域实现载波调制，然后送给 DAC，完成数模转换，输出中频信号送给上变频模块或直接输出待测设备。上变频模块接收调制基带处理模块输出的中频信号，上变频到对应的 S 频段射频信号。

2.1.3 接口适配器

接口适配器采用 Mac Panel 公司生产的 SCOUT 家族的 SCOUTxt 系列来完成通用平台接口方案，包含了数字、模拟、功率、射频、功率等信号。系统信号路由结构图如下图 3 所示。



图 3 系统信号路由结构图

适配器包括板卡适配器和机箱适配器，板卡适配器根据 PXI 板卡型号进行选择，机箱适配器根据机箱尺寸选择，主要完成 PXI 各类接口板与卫星所需要的后面板航空插头之间的转接。

2.2 软件组成

一体化综合测试系统软件的主要任务是实现对被测对象的快速自动化测试能力，因此系统软件应该具备对各硬件模块的集中监控能力，提供测试数据服务，同时进行测试数据的深度挖掘分析利用，完成测试流程的自动执行等功能。系统软件分为硬件控制相关软件和一体化综合测试集中控制软件两部分。

硬件控制相关软件主要负责设备硬件相关模拟量、状态量的采集和开关量的控制。用户在界面上实时的监视各模块功能的当前数据，以曲线的方式显示数据趋势并保存到数据库。同时用户在软件界面上完成对综合测试系统硬件设备的控制以及

各设备参数的设置。用户还可以查询已经保存到数据库中的历史数据并以表格或曲线的方式呈现。采集到的实时数据通过广播的方式发送给总控地面测试设备。

一体化综合测试集中控制软件按照功能模块划分，实现了通用化的测试程序^[8]，随着不同卫星任务的开发，当可调用的模块化程序逐渐丰富后，新的测试程序的开发相当于不同功能模块的组合和调用，只需为某些特定的功能单独开发专用程序，可通过更换功能模块达到通用化的效果^[9]，并且这些专用程序也可以打包被后续项目使用。目前一体化综合测试集中控制软件主要分为数据通信模块、数据管理模块、数据应用模块和任务调度模块。一体化综合测试系统的软件架构如图 4 所示。

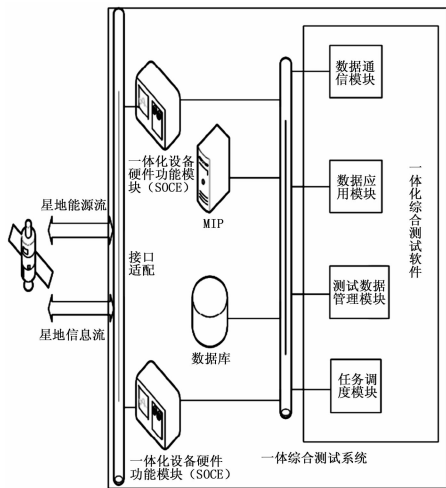


图 4 一体化综合测试系统软件组成图

- 1) 数据通信模块。主要负责综合测试软件和星载测试单元、一体化设备硬件功能模块 SCOPE、MTP 和数据库之间的通信。例如接收星上或 SCOPE 传递的符合某种通信协议格式的测试数据流，解析出参数数据，将这些数据传递给数据管理模块进行存储，完成测试数据的接收等。
- 2) 数据管理模块。本模块采用一体化的实时—关系数据库来管理两类不同的数据：星上传遥测参数等以实时数据进行存储，而卫星基础信息、参数描述信息、判据信息等信息以关系数据进行存储。数据管理模块与功能及与其他模块的交互见如图 5 所示。

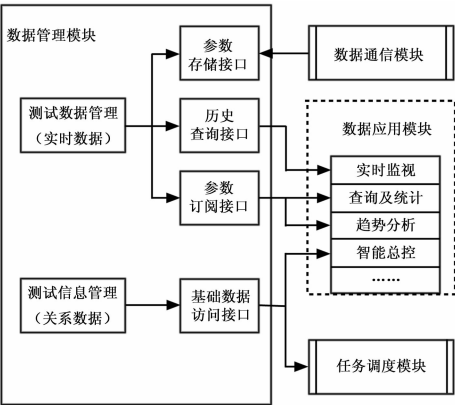


图 5 数据管理模块交互图

- 3) 数据应用模块。数据应用模块是一体化综合测试系统

面向测试过程中的主要软件部分，具体可以分为实时监控软件、查询统计分析软件、趋势分析软件及智能总控等部分。实时监控软件主要是对数据管理模块的数据进行监控，查询统计分析软件主要是存储、管理、查询和统计数据点的历史数据，趋势分析软件主要是以图形化的界面对测试数据管理数据进行分析处理，智能总控主要完成星地之间的上行通道的交互。

- 4) 任务调度模块。任务调度模块主要负责维护基础测试信息，将指令序列和各遥测参数的判据准则打包成上注数据块。同时该模块也负责测试序列调度。

3 试验结果与分析

小型化一体化综合测试设备完成之后，对其进行了验收试验，试验结果见表 1。

表 1 一体化综合测试设备验收结果简表

序号	项目类别	项目名称	实测结果
1	测控功能测试	扩频遥测信号接收	正常
		遥测信号监视	正常
		遥测数据网络交换	正常
		遥控信号处理监视	正常
2	下行解调测试	PN 码型测试	平衡 GOLD 码/m 序列正常
		PN 码速率测试	1.023×n Mcps 正常
		遥测码型测试	NRZ—L,M,S 三种码型正常
		遥测数据率测试	1 000~64 kbps 正常
		遥测解码方式测试	卷积编码,编码方式(2,1,7)正常
		载波多普勒频偏测试	0~±180 kHz 正常
		载波多普勒变化率测试	0~±15 kHz/s 正常
		输入电平测试	0~-60 dBm 正常
3	上行调制测试	PN 码型测试	平衡 GOLD 码/m 序列正常
		PN 码速率测试	1.023×n Mcps 正常
		遥测码型测试	NRZ—L,M,S 三种码型正常
		遥控数据率测试	1000~64kbps 正常
		遥控编码方式测试	卷积编码,编码方式(2,1,7)正常
		载波多普勒频偏测试	0~±180kHz 正常
		载波多普勒变化率测试	0~±15kHz/s 正常
		输出电平测试	0~-60dBm 正常
4	上变频器板卡测试	频率准确度测试	2.0GHz~2.4GHz 正常
		信号增益准确度测试	0dBm~30dBm 正常
5	下变频器板卡测试	频率准确度测试	2.0GHz~2.4GHz 正常
		信号增益准确度测试	0dBm~30dBm 正常
6	电气硬件检验	硬件设备齐套性检查	元器件、板卡齐套
		检查硬件设备结构	设备机械结构完好
		板卡电气指标检查	满足要求
		系统通电检查	系统加电后软硬件运行正常
7	软件检验	供电电软件	有线指令、状态量监测、模拟量监测正常
		模拟器软件	模拟器控制、监视功能正常
		稳压源软件	稳压源控制、监视功能正常

序号	项目类别	项目名称	实测结果
8	硬件软件联试	脱离卫星等效器情况下的测试	控制量、模拟量、状态量、手动控制功能均正常
		接入卫星等效器情况下的测试	控制量、模拟量、状态量、手动控制功能均正常
		与总控软件远程通讯监测	通讯正常
9	电缆导通绝缘检查	对模块间连接电缆和系统间电缆进行导通绝缘检查	指标正常
10	连接卫星等效器检查	连接卫星等效器之后对软硬件复测	指标正常

在对小型化一体化综合测试设备验收试验后，进行了桌面联试试验，通过联试，对上行遥控链路，下行遥测链路，设备监视状态，CAN 总线数据接收，CAN 总线数据的解析等项目进行了验证，试验结果均满足设计要求。

在后续的卫星型号测试过程中，通过对关键遥测/通道测量统计、比对，应答机 AGC 曲线标定，多普勒频偏，指令连发、遥测误码判读等测试结果表明测控分系统性能稳定、功能完备，与整星接口匹配。通过对供电电模拟量、状态量采集验证、控制量输出验证、归档数据查询、报警记录查询、系统设置、参数设置等测试，结果表明供电分系统性能稳定、功能完备，与整星接口匹配。在整星测试过程中，系统各项功能正常，各项性能指标符合整星测试要求。

4 结论

通过采用一体化卫星综合测试系统，测试过程中系统除了具备现有卫星地面测试系统的功能和性能特点之外，与传统的测试系统相比，在研制成本、系统体积、组建时间和无故障运行方面均有较大改善，比较结果如图 6 所示。

小卫星小型化、一体化地面测试设备所代表的技术路线符合小卫星技术发展对卫星测试的技术需求，对于后续卫星测试

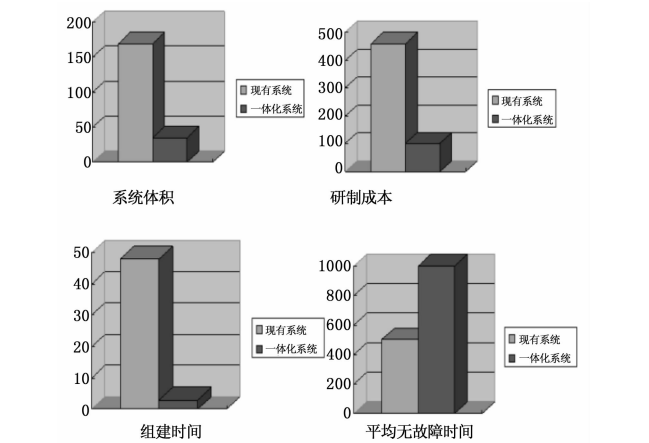


图 6 一体化测试设备与现有设备比较示意图

技术的发展具有非常重要的意义。

参考文献：

[1] 李培华, 陈逢田, 等. 小卫星测试技术发展展望 [A]. 航天东方红卫星有限公司. 小卫星技术交流会优秀论文集 [C]. 北京: 航天东方红卫星有限公司, 2011: 100-107.

[2] 赵光权, 徐 辑, 张毅刚, 等. 小卫星测试系统设计与实现 [J]. 计算机测量与控制, 2011, 19 (3): 503-505.

[3] 曹 晖, 毕建峰. 基于 PXI 总线的实时综合测试系统研究 [J]. 上海航天, 2011, 03: 64-68.

[4] 林言, 刘文定, 岳世锋, 等. 基于 PXI 的多功能卡在卫星测试系统中的研究 [J]. 测控技术, 2012, 31 (7): 54-57.

[5] 杨乐平, 李海涛, 肖 凯, 等. 虚拟仪器技术概论 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2003.

[6] 张黎明, 孙 宁, 等. 基于 PXI 的卫星综合测试系统的设计与实现 [J]. 计算机测量与控制, 2008, 16 (1): 27-29.

[7] 王庆成, 主编. 航天器电测技术 [M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2007.

[8] 刘 洋, 李家琦, 李宗德, 等. 基于数据格式库的卫星通用测试软件设计 [J]. 计算机测量与控制, 2014, 22 (8): 2680-2683.

[9] 赵光权, 徐 彝, 张毅刚, 等. 小卫星测试系统设计与实现 [J]. 计算机测量与控制, 2011, 19 (3): 503-505.

(上接第 14 页)

反汇编结果显示如下：
33f80000 <_boot_size>:
33f80000: 00000730 andeq r0, r0, r0, lsr r7
则代码大小为_boot_size 地址处值:0x0000730=1.79 KB,所以远远小于 u-boot.bin 的 432 KB,节省大量的存储空间,说明设计的 Bootloader 具有精简性。

4.2 Bootloader 稳定和可靠性分析

把编译后的 Bootloader 下载到 nandflash 中，经过多次按下复位键后都能成功启动 linux 内核。图 6 显示启动结果：

5 结束语

通过实验可知，编写的 Bootloader 比 u-boot 源码简洁，代码量小，并且成功加载 linux 内核，通过借鉴 u-boot 源代码的流程，以 S3C2440 为平台，设计出了精简，稳定的 Bootloader。该设计方法具有一定通用性，对于其他不同平台，具

```
Set boot params
Boot kernel
Uncompressing Linux.....
... done, booting the kernel.
Linux version 2.6.22.6 (book@book-desktop) (gcc version 3.4.5) #1 Sat May 11 15:09:41 CST 2013
CPU: ARM920T [411232001 revision 0 (ARMv4T), cr=0007177
Machine: SMDK2440
Memory policy: ECC disabled, Data cache writeback
CPU S3C2440A (id 0x32440001)
```

图 6 启动结果

有很强借鉴性。

参考文献：

[1] 刘 坤, 韩朝智. 浅析基于 ARM 嵌入式开发的 BootLoader 设计及其实现 [J]. 电子技术与软件工程, 2016 (2): 203-204.

[2] 范展源, 六 韬. 深度实践嵌入式 Linux 系统移植 [M] 北京: 机械工业出版社, 2015.

[3] 韦东山. 嵌入式 linux 应用开发 [M], 北京: 人民邮电出版社, 2008.

[4] 戚长城, 等. 总线式 ECU 两级 Bootloader 的设计与实现 [J]. 计算机工程, 2015 (7): 95-99.