

# 基于 PXI 模块化仪器的载人航天器自动测试等效器系统设计

张福生, 陈莉欣, 景旭贞

(中国空间技术研究院 载人航天总体部, 北京 100094)

**摘要:** 随着载人航天器型号的不断增多, 对其等效器的测试效率和通用化程度提出了更高的要求; 为提高载人航天器等效器的自动化程度, 提出了一种基于 PXI 模块化仪器的设计方法; 系统核心为 PXI 控制单元, 使用 LabVIEW 对各功能模块进行控制, 可以模拟载人航天器下行火工状态量、模拟量以及地面控制指令的执行结果; 该系统可以与地面测试设备进行数据交互, 实现可自定义的“一键”自动测试, 测试效率从原来用时约 65 min 缩短至 6 min 以内, 人力从 4 人缩减至 2 人, 有效地提高了测试效率和系统的可配置性。

**关键词:** 载人航天器; 等效器; PXI; 自动测试; 可配置性

## Design of Manned Aircraft Automatic Testing Equivalent System Based on PXI Instrumentation

Zhang Fusheng, Chen Lixin, Jing Xuzhen

(Dept. of Manned Space System Engineering, Chinese Academy of Space Technology, Beijing 100094, China)

**Abstract:** Higher requirements of testing efficiency and currency of manned aircraft equivalent have been put forward as the kinds of manned aircraft increasing. An equivalent system has been designed based on PXI instrumentation in order to increase the system efficiency of manned aircraft equivalent. The system could simulate manned aircraft to pass initiating device state signal, analog signal, and execute the result of ground controlling order by using PXI and LabVIEW. The equivalent system could exchange testing data with ground testing equipments to realize the user-defined automatic test. The system achieves a big step forward in efficiency and system configurable, with efficiency increases from 65 minutes costing to less than 6 minutes costing and manpower saves from 4 to 2.

**Key words:** manned aircraft; equivalent system; PXI; automatic testing; configurable

## 0 引言

随着近年来航天科技的迅猛发展, 我国载人航天器无论是系统规模、还是系统复杂度都有了明显的提升。在航天领域, 测试技术水平很大程度上决定了型号的整体水平<sup>[1]</sup>, 测试的定量、定性验证对设计起到了很大的反促进作用。航天器技术的不断进步对其等效器的有效性、可靠性及自动化水平提出了更高的要求。航天器等效器一般为型号专用, 发表成果不多, 目前的成果主要集中在火工品、导弹、遥测设备等等效器设备上。国内成果主要有哈尔滨工业大学针对导弹上火工品测试的智能火工品等效器, 使用了基于 FPGA 和 LabVIEW 的设计方法<sup>[2]</sup>; 中北大学设计的航天遥测设备等效器、全弹模拟等效器, 使用了基于 USB 和 FPGA 的设计方法<sup>[3-4]</sup>。

本文提出了一种基于 PXI 模块化仪器的载人航天器等效器设计方法, 不但可以模拟航天器给出火工起爆状态以及模拟量、状态量的地控指令执行结果, 而且可以实现可自定义的一键自动化测试、测试报告生成, 有效地提高了测试效率和测试可靠性, 节省了人力资源。

## 1 航天器等效器

### 1.1 定义

载人航天器等效器是通过电路、仪器系统模拟航天器火工品起爆、指令执行等部分电性能的等效装置。一般在航天器电性能测试前模拟飞行器下行模拟量、状态量、火工品信号, 同时接收地面设备上行控制信号, 进行上、下行通路检查, 从而验证飞行器与地面设备状态量测量回路、模拟量测量回路、指令控制回路之间的正确性, 以及地面设备功能的正确性。

### 1.2 早期等效器组成及功能实现

早期的等效器一般由跳线箱、调理箱、电源箱以及机柜等辅助配件组成, 均为专用设备, 非通用货架产品。其中跳线箱连接脱插端进行信号的分类跳线; 信号调理箱用于信号处理, 主要由指令开入板、火工信号输出板、模拟量信号输出板组成; 电源箱作为模拟量输出源, 同时为调理箱板卡供电。

模拟航天器下行模拟量信号是通过供电电源的输出电压分压后输出来实现; 模拟航天器开出状态信号是使用外置按钮控制调理箱开出板继电器, 对外输出状态信号; 模拟航天器的指令执行状态是通过使用继电器模拟地面供电测试设备指令执行状态, 并用发光二极管显示状态来实现; 模拟航天器火工品信号是使用外置按钮控制火工品信号输出板继电器, 对外输出火工品信号。

## 2 基于 PXI 的等效器系统硬件设计

基于 PXI 的等效器系统由 PXI 控制单元、通用电源模块、跳

收稿日期: 2014-02-12; 修回日期: 2014-04-01。

作者简介: 张福生(1983-), 男, 吉林通化人, 博士, 工程师, 主要从事载人航天器地面测试设备研制和综合测试工作。

线箱、调理箱、抽拉式显示器、机柜 6 部分组成。系统在早期等效器结构的基础上，引入了 PXI 控制模块及功能板卡，使用主控器与上位机建立通信实现了主动式测试与数据交互；使用货架产品 PXI 板卡取代了早期等效器的部分专用板卡，用户可根据不同航天器的模拟量、指令、火工等参数配置要求对板卡类型与数量进行灵活配置，实现系统功能的扩展和通用化设置。

### 2.1 PXI 控制单元

PXI 控制单元是自动测试等效器的核心部分，选用 NI 公司 PXI 体系结构的模块化仪器来实现，由嵌入式控制器，PXI 机箱和 PXI 功能板卡三部分构成<sup>[5]</sup>。综合考虑产品在型号间的通用和功能扩展需求，机箱选用了 18 槽 3U PXI 标准机箱 PXI-1045，槽位留有一定扩展余量；控制器选用了 PXI-8108 零槽嵌入式控制器，配合一体化显示器键鼠，提高了系统仪器化程度；编程语言选择了 LabVIEW 进行功能板卡程序控制，程序设计使用模块化封装 VI 子设计，用户可进行自定义配置。系统各功能板卡配置如下：

1) 选用 PXI-2569 开关板卡模拟航天器火工品的起爆过程，即 PXI-2569 一路开关的闭合表征航天器一个火工品的引爆，通过判断地面设备对等效器开出指令的相应情况来验证其火工状态量采集通路及功能的正确性。PXI-2569 为磁保持继电器卡，具有 100 个通路，开关闭合间隔仅 50  $\mu$ s，且在 LabVIEW 软件重启过程继电器状态不会发生变化，能够对火工品起爆状态进行有效模拟。

2) 选用 PXI-4224 采集板卡模拟航天器对地面上行的稳压供电参数、指令母线供电等参数的采集功能。PXI-4224 为 8 通道高速模拟量采集卡，测量精度优于 0.3%，采集速度为 200 k/s，量程为  $\pm 10$  V。

3) 选用 PXI-6 528 数字 I/O 卡模拟航天器进行状态量的采集、显示、数据存储。当地面控制指令发出后，PXI-6 528 进行对相应通路参数采集，并驱动软件与硬件显示结果，表征地控指令的执行效果。PXI-6 528 为单板通道隔离，拥有 24 路数字量开入、24 路数字量输出通路。

### 2.2 信号调理箱

模拟量、火工量信号在输入 PXI 控制单元前需要经过调理，以满足各功能板卡的输入需求。系统设计了专用调理板卡，通过分压电路设计实现模拟量输入信号至  $\pm 10$  V 变换，以满足 PXI-4224 输入需求；通过状态量调理板卡实现火工品输入状态量信号调整以满足对应器地接口的要求。

调理箱的功能板卡采用统一规格设计集成在信号调理箱，功能相互独立。机箱采用背插式机箱结构，背板各插槽接点定义相同，即不同功能板卡可以在任意插槽上安放，这种实现方式具有安装方便、固定可靠的特点。

### 2.3 跳线箱

等效器系统以设计相同的脱插接口形式来模拟航天器通过脱插电缆与地面设备之间进行连接关系。航天器脱插端与地面设备的接口形式不同，系统设计跳线箱实现对脱插信号进行跳线、分类与归并，即将脱插端输入信号转换成与调理箱接口匹配的接口形式；将输出转换成与脱插端匹配的接口形式送至地面设备端。

为提高系统的可靠性，在跳线箱前面板设置了控制按钮，通过将按键与 PXI-2569 通路并联的形式实现控制指令外置，在软件故障下可代替 PXI-2569 进行手动测试。此外，在跳

线箱前面板设置了状态量显示灯，在 PXI-6528 采集有效时与软件进行同步显示结果，在软件故障下可替代软件界面进行结果显示。

### 2.4 辅助设计

机柜为标准通用机柜，材质轻且坚固，安装有接地柱，空余处设有盲板，侧板有网孔设计，便于空气流通散热，机柜采用卡锁轮式设计，便于搬运且有减震功能。

## 3 系统软件设计

### 3.1 功能与特点

基于 PXI 的等效器控制软件使用图形化语言 LabVIEW 进行开发<sup>[6]</sup>，具备控制功能板卡进行指令开出、状态量采集以及模拟量采集的功能，此外，等效器软件还具备一键测试功能，能够与前端地面设备通讯，主动发起前端地面设备的指令开出、火工品状态量采集及模拟量遥测等功能检测，进行逐条指令、逐个参数的自动测试，并存储本地及前端设备测试数据。

### 3.2 操作界面

操作界面对检测功能进行了分区，划分为网络连接指示、指令发出按键、发出时序显示、模拟量示值、火工显示，自动化测试按键、报表生成等功能操作区域，操作界面如图 1 所示。



图 1 测试软件功能示意图

### 3.3 软件结构

等效器软件在结构上划分为初始化层、功能实现层和系统资源释放层。在功能模块上主要可划分自动化测试模块、网络通讯模块、火工量模块、指令模块、模拟量模块、报表生成及打印模块。软件结构如图 2 所示。

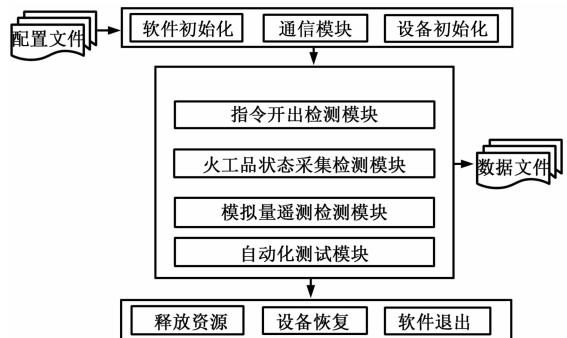


图 2 测试软件功能示意图

各功能模块在设计执行上是相互独立的，可以避免程序运

行过程中各模块之间的干扰, 一旦某一环节发生问题, 可以直接在相应处理模块中进行处理, 便于测试人员的维护; 当需要增加功能时, 只需在相关模块中进行完善即可, 无需对程序整体结构进行修改, 缩短了软件重新开发的周期。

### 3.4 功能模块

各功能模块主结构均为 While 循环结构, 现以模拟量模块和自动化测试模块为例分别说明程序设计和执行情况。

模拟量模块采用了 500 ms 的主循环结构, 包含采集、变换、存储 3 个子 VI, 子 VI 采用了通用化设计及封装式库管理方式, 可被其他程序直接调用。采集子 VI 多次测量取其均值作为输出结果 ( $\pm 10\text{ V}$  范围内), 变换子 VI 调用调理电路的变换系数数组进行反算得出真实模拟量结果送存储子 VI, 存储在设定目录下。模拟量模块程序实现如图 3 所示。

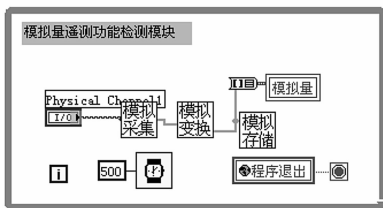


图 3 模拟量模块程序图

自动化测试通过前面板按键形式发起, 按照配置的脚本文件, 逐条指令发送进行测试, 并将结果保存到指令目录下。脚本配置功能是为提高自动化测试水平设计的, 实现检测项目的可配置。配置内容在软件启动时自动加载, 主要包括检测项目、指令代号和预期结果, 提高了检测模块的通用性和适应性。

用户可根据测试需求, 对参量进行选取写入脚本文件, 系统按脚本文件执行实现自定义功能。如通过鼠标发送有线指令开出功能自动检测后, 软件将通过网络与供电设备通信, 驱动供电设备软件依次发送有线指令, 同时等效器软件进行相应状态量的采集, 并将本地及远端测试记录保存到指定目录下, 用于报告生成和输出打印。自动化测试模块设计的程序设计如图 4 所示。

### 4 系统应用效果

基于 PXI 的等效器系统不再需要测试人员在等效器端进行面板操作, 同时克服了早期等效器需人工读数, 人工记录的主观性, 提高了测试效率。系统具有远端控制功能, 解放了人力, 其与上一代等效器的应用效果对比情况见表 1。

表 1 应用效果对比

项目	上一代	基于 PXI 等效器
指令发送	等效器面板按键发送	软件发送、硬件发送、自动发送三种形式
模拟量读取	人工读取具有主观性	模拟量判读模块多次测量求平均值
数据记录	人工记录具有主观性	自动存储, 精度高, 自动生成报告
远程控制	不支持	支持
测试时间	约 65 min	不多于 6 min
人力资源	4 人	2 人

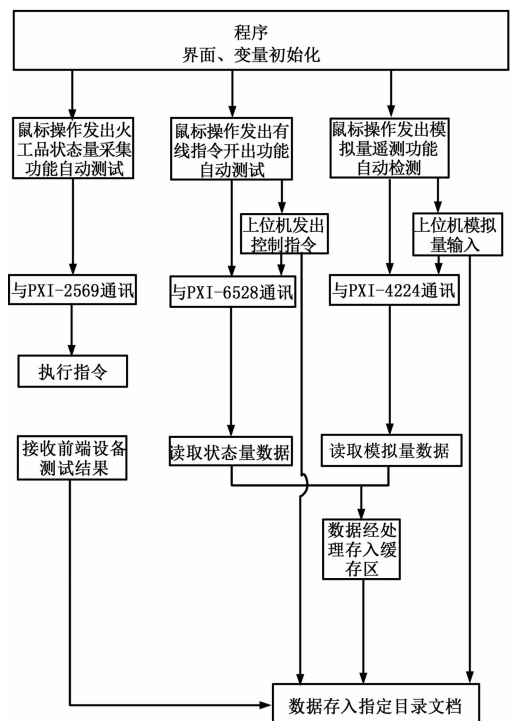


图 4 自动测试功能流程图

### 5 结论

基于 PXI 的等效器设计通过模块化的系统设计、自动化检测程序设计结合友好的人机交互界面, 提高了系统的可配置型, 实现了自动发送指令、自动记录与存储、自动报表生成等功能, 此外用户可以通过自定义配置文件实现“一键测试”。目前设备已投入某航天器型号测试使用, 将测试效率从约 65 min 提高到不多于 6 min, 人力由 4 人缩减至 2 人, 最大程度地降低人工操作。

自动化检测方法适用于综合测试设备准备期间的检测, 进行推广可以大大提高整个综合测试设备的检测效率, 从整体上优化载人航天器的综合测试流程, 缩短整个测试周期。同时为载人航天器自动化测试提供了一定的技术储备。

模块化通用化平台, 系统可配置性好, 可根据后续型号进行适应性板卡及功能扩展, 通过软件进行配置, 适应后续载人航天器系统规模、功能的不断扩展的需求。

#### 参考文献:

- [1] 张黎明, 孙宁, 于慧亮, 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.
- [2] 刘小龙, 王牧丁, 姜海坚, 等. 基于 FPGA 的智能火工品等效器设计实现 [J]. 电子测量技术, 2012, 35 (5): 78-82.
- [3] 苏虎平, 沈三民, 刘文怡, 等. 基于 USB 和 FPGA 的多功能等效器设计 [J]. 电视技术, 2012, 36 (23): 50-54.
- [4] 陈海洲, 叶勇, 沈三民. 一种测量系统等效器设计 [J]. 计算机测量与控制, 2012, 20 (5): 1414-1419.
- [5] 张洪光. 航天器供电测试设备硬件模块化、软件配置化设计思路 [J]. 航天器工程, 2010, 19 (1): 72-76.
- [6] 陈锡辉, 张银鸿. LabVIEW8.2 程序设计从入门到精通 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2007: 56-80.