

# 一种点火控制系统自动测试设备设计与应用

梁 旗, 吴 伟, 张凯强, 王 鑫, 胡 阳

(上海机电工程研究所, 上海 201109)

**摘要:** 点火控制系统在地面测试阶段往往会进行多次重复性测试, 以便及时掌握点火控制系统在经历不同试验后的性能状态情况, 为了在保证测试精度和测试稳定性的同时提升测试效率, 设计研制了一种点火控制系统自动测试设备, 搭建出基于 PXI 总线的控制系统, 实现对点火控制系统的供电控制、数据采集和性能验证等功能, 以 LabVIEW 开发平台设计了对应的测试软件, 经实际试验验证, 所搭建的测试设备能够以较高的稳定性和精确度实现对点火控制系统的功能性能测试。

**关键词:** 航天装备; 自动测试设备; PXI 总线控制; 点火控制系统

## Design and Application of an Automatic Test Equipment for Ignition Control System

LIANG Qi, WU Wei, ZHANG Kaiqiang, WANG Xin, HU Yang

(Shanghai Electro-Mechanical Engineering Institute, Shanghai 201109, China)

**Abstract:** The ignition control system often undergoes multiple repetitive tests in the ground test phase, so as to grasp the performance status of the ignition control system after different tests in time. In order to improve the test efficiency while ensuring the test accuracy and stability, an automatic test equipment for the ignition control system is designed and developed, and a control system based on PXI bus is built to realize the functions of the power supply control, data acquisition, and performance verification of the ignition control system. The corresponding test software is designed on the LabVIEW development platform. The actual experiments are verified that the built test system has a high stability and accuracy, which can realize the functional performance test of the ignition control system.

**Keywords:** aerospace equipment; automation test equipment; PXI bus control; ignition control system

## 0 引言

当前, 随着航空航天领域的不断发展, 面向层出不穷的各类航天装备和复杂的环境试验, 其中的火工品状态控制的重要性不言而喻, 点火控制系统作为火工品的直接控制装置, 一旦控制失效或者产生点火误动作, 将会造成无法预估的严重后果<sup>[1-3]</sup>。因此, 随着点火控制系统的设计对点火时刻和点火输出的控制更加精确化和自动化, 控制范围和组成结构更加复杂化, 对于点火控制系统的测试提出了更高的要求, 尤其在稳定快速、安全可靠方面的测试性设计必须重点考虑<sup>[4-6]</sup>。传统的点火控制系统测试方法常采用手动或半自动测试模式对点火控制系统进行健康监测和功能测试, 由于点火控制回路的通道数日益增多, 点火控制事件数不断增加, 传统点火控制系统测试方法的测试精度和测试效率逐渐难以满足点火控制系统的测试要求<sup>[7]</sup>, 因此, 设计了一种满足当前航天装备中点火控制系统测试的自动化设备, 分别从点火控制系统测试总体方案和测试设备软硬件设计两方面, 论述了一种点火控制系统的自动测试设备设计及应用。

## 1 点火控制系统总体测试方案设计

在航天装备实际工作流程中, 点火控制系统以接收到发控系统给出的状态自检指令或者点火指令为控制输入, 输出接口连接真实火工品, 同时点火控制系统本身存在测试接口以将自身状态信号反馈回发控系统<sup>[8]</sup>。而在地面测试阶段, 需采用专用的测试设备对点火控制系统进行多阶段不同时期的反复测试, 以便可以及时确认点火控制系统的功能正常。

针对点火控制系统的地面测试要求, 所采用的点火控制系统自动测试方法的设计原理就是模拟地面发控系统, 通过自动测试设备实现对点火控制系统的逻辑控制和功能验证, 为点火控制系统提供模拟火工品信号, 进而验证点火控制系统的快速自检和特定时间范围内的充泻电功能, 并且自动测试设备具备设备自检功能, 以确保点火控制系统测试的正确性和稳定性<sup>[9]</sup>。对应不同工况分别设计了点火控制系统自动测试设备的两种工作模式, 即面向测试设备本身的自检测工作模式和面向产品对象的功能测试模式<sup>[10]</sup>。

收稿日期: 2023-10-05; 修回日期: 2023-10-10。

作者简介: 梁 旗(-), 男, 硕士, 高级工程师。

通讯作者: 吴 伟(-), 男, 硕士, 研究员。

引用格式: 梁 旗, 吴 伟, 张凯强, 等. 一种点火控制系统自动测试设备设计与应用[J]. 计算机测量与控制, 2023, 31(12): 64-68, 116.

### 1.1 面向产品对象的功能测试方案设计

为保证测试的安全性, 通常会以外接短路盖的形式将真实火工品信号短路封闭, 在实际测试时, 将点火控制系统输出端外接测试设备所提供的火工品模拟模块, 用以模拟真实的火工品信号<sup>[11]</sup>。为实现对点火控制系统的全流程自动测试, 测试设备给出点火控制系统的状态自检指令并接收判定状态自检回告, 给出充泻电指令后测试多个点火通路的充泻电时间、状态稳定时间和点火通路端电压, 快速测试并判别是否满足点火控制系统指标要求, 在测试设备上位机软件界面进行状态实时显示<sup>[12]</sup>。

测试设备面向点火控制系统测试原理方案如图 1 所示, 测试设备自动测试设备通过内部开关电源实现对点火控制系统的需求供电, 内嵌基于 PXI 总线的控制系统作为测试设备的主体控制中心, 搭建基于 LabVIEW 开发平台的上位机测试软件, 控制系统通过上位机软件操作命令, 采用串口通讯方式与点火控制系统内部下位机控制软件进行通讯交互, 通过数据采集模块从点火控制系统中读取测试数据并送入上位机中进行处理判别, 进而完成点火控制系统的全测试流程, 达到实时状态监测、测试结果显示的目的。

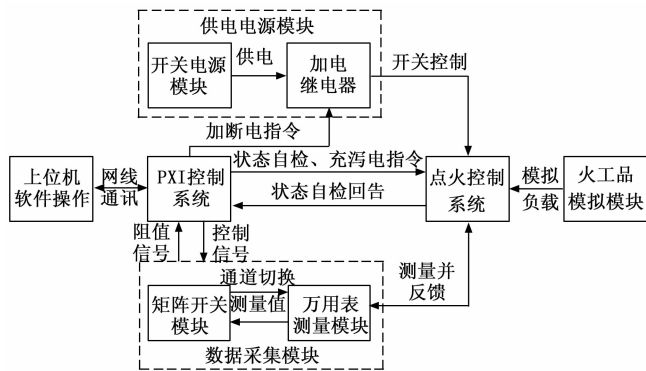


图 1 面向点火控制系统测试原理方案图

自动测试设备进行点火控制系统进行测试的连接如图 2 所示, 上位机显控组合中搭载有基于 LabVIEW 平台开发的专用测试软件, 通过网线通讯连接基于 PXI 总线的控制系统<sup>[13]</sup>。设备通过模块化设计内置三类功能模块, 供电电源模块采用可控开关电源和继电器板卡组成, 用以接收加断电指令实现对点火控制系统的电源供电功能; 数据采集模块采用多路选通的矩阵开关板卡和万用表板卡组成, 用以实现对多路火工品信号的切换选通作用; 火工品模拟模块则通过内置的模拟负载电阻去模拟真实火工品信号。

通过测试设备对点火控制系统的功能测试, 可以得到各点火通路的点火指令信号、点火输出信号的信号质量, 采用判断各信号的幅值、脉宽以及点火指令与输出信号之间的控制延时等, 实现了在地面测试阶段对点火控制系统各项功能性能指标的深度检查。

### 1.2 面向测试设备本身的自检方案设计

由于自动测试设备用于点火控制系统的测试工作中, 存在大量测试使用次数和测试精确度的需求, 因此测试设

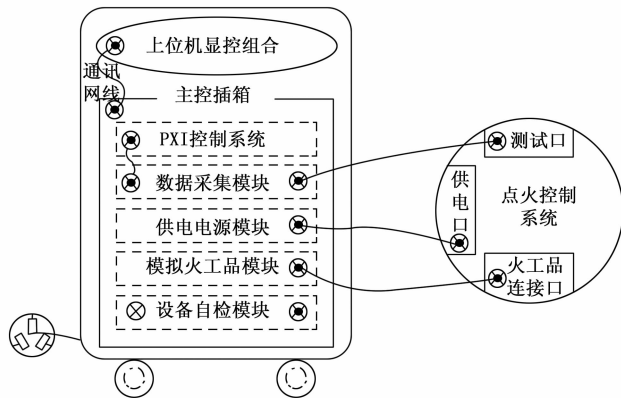


图 2 点火控制系统测试连接图

备本身也有着定期状态自检的需求, 需定期进行设备自检, 对各项测试通道的功能和检测能力进行评估, 确保设备本身测试状态处于正常状态, 在自检测试检查无误后, 方可用于后续的点火控制系统的功能性能测试中。

自动测试设备自检工作模式的系统测试原理如图 3 所示, 进行测试设备自检时, 通过上位机测试软件给出设备自检命令, 测试设备内置自检模块响应自检命令并将结果回馈至控制系统, 发出自检命令后, 控制系统自动切换矩阵开关选通多路阻值信号, 万用表测量模块每一路阻值并回传给控制系统, 在上位机软件界面进行显示判定, 判断测试设备本身的测试结果是否在测量精度和测量误差允许范围内。

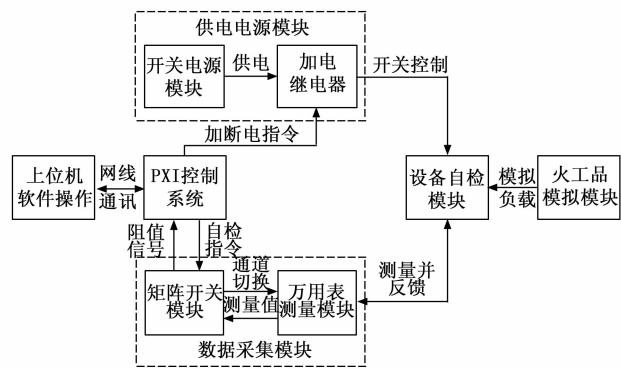


图 3 测试设备自检原理方案图

## 2 测试设备硬件设计

### 2.1 数据采集模块设计

基于 NI 系统数据采集板卡测试平台, 点火控制系统测试设备采用多路选通矩阵开关板卡搭配高精度万用表测量板卡的组合, 实现对多路信号的通道自动切换选择并测量实时阻抗并反馈给控制系统<sup>[14-16]</sup>。数据采集模块以 PXI 总线为架构, 实现对多通道模拟信号的测量、处理和保持, 转换为数字信号后通过总线发送至上位机, 其中, 可根据测试对象的特性不同, 对应调节采样速率、采样通道数和采样数量等特征量, 实现对不同特性产品的数据采集的特性匹配, 保证所采集回的数据的不失真和准确度<sup>[17]</sup>。

数据采集模块设计原理如图 4 所示,针对不同特性信号种类分别选取对于采集特性的资源板卡,用以对各通道信号的全面采集。对于单端信号即信号负端与模拟地相通,通常信号形式为连续稳定的模拟电压或电阻信号,通过多路选通开关信号流入至单端信号采集板卡,该板卡所测量信号具有相同的公共端,实现对各通道模拟量的具体电压或电阻数值的采集。对于信号质量要求较高的测量信号,一般采样差分测量板卡,具有较强的抗干扰能力,从而保证了信号的质量。同时识别测量信号的幅值脉宽若较高,则选择对应的高电压测量板卡,尤其面向周期性单峰值模拟电压信号,选择具有高采样率和耐压上限的数据采集板卡。

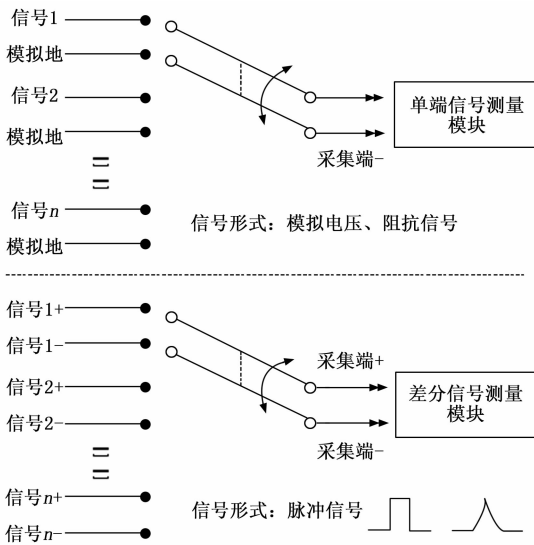


图 4 数据采集模块原理框图

### 2.2 供电电源模块设计

测试设备内置供电电源模块,地面测试阶段模拟地面发控系统为点火控制系统提供基本供电电源和点火充电所需电压,模块内部采用开关电源组件搭配继电器控制板卡作系统供电开关控制作用。

根据点火控制系统的输出特性选择测试设备供电电源型号,其中所选择供电电源的最大输出电压和最大输出电流应满足点火控制系统的额定电压输入要求和瞬时最大启动电流要求。同时,电源模块内置电流实时监测功能,可实时监测当前工作电流值并进行数据存储,若工作电流超过设定阈值则立即进行断电保护,通过电源模块内置串口将电流监测值的过程量发送至上位机,同时接受上位机的电源控制指令,完成对电源输出能力的控制调整<sup>[18]</sup>。

### 2.3 模拟火工品模块设计

在点火控制系统地面测试阶段,采用模拟火工品模块模拟真实火工品信号,在点火控制系统硬件设计上,通常通过短路盖的形式将真实火工品短接,将点火控制系统输出和真实火工品断开,在进行点火控制系统测试时,输出端外接与真实火工品阻抗值相同的模拟负载,以此测试点

火控制系统的点火功能逻辑是否满足要求<sup>[19-20]</sup>。

根据实际的火工品点火通道数目,设计相应的模拟负载测试通道,各负载通道串接对应的阻抗模拟元件,各通道相互独立,在实际测试工况下分别代替各个火工品点火通道,采集各通道模拟火工品负载两端的实时电压值和静态阻抗,进而判断点火控制系统的各通道点火输出能力是否满足测试指标要求。

### 2.4 PXI 控制系统设计

基于 PXI 总线搭建出测试设备主控制系统,根据测试设备所需功能要求,在零槽控制器的基础上增加各项测控板卡,系统内嵌 LabVIEW 软件开发平台,设计点火控制系统测试软件,搭建出人机交互界面,并且,通过完成一系列功能逻辑执行流程,实现板卡功能模块的调用。

PXI 控制系统基于零槽控制器进行集成化设计,其组成结构如图 5 所示,其中所选零槽控制器型号具备 18 个控制槽位,零槽控制器为每个槽位分配物理地址,上位机控制系统通过访问对于的特定物理地址实现对各个驱动板卡的控制调用<sup>[21]</sup>。零槽控制器的槽位分配为冗余设计,根据点火控制系统的测试需求选择配套功能的组成板卡,为实现测试设备与点火控制系统之间的控制通讯、数字量回传、开关控制、多路选通和信号测量采集等功能,依次选择了对于的通讯板卡、继电器控制板卡、矩阵开关板卡、万用表测量板卡和各类信号采集板卡,共占用了 9 个槽位,其余槽位可根据测试对象的资源数目和功能要求不同对应新增,具备控制器的灵活性集成化设计的特点。

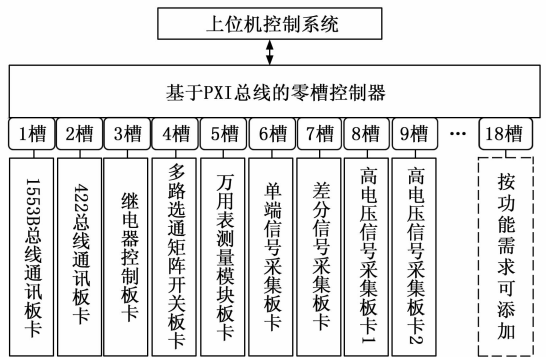


图 5 PXI 控制系统结构图

### 2.5 设备自检模块设计

测试设备自检模块主要用以点火控制系统测试前的设备检查,检测测试设备本身测试功能是否正常。设备自检模块本身主要是测试接口的模拟,自检模块输入接口包括供电功能输入接口、数据采集输入输出接口和模拟负载输入接口,采用设备自检模块模拟了点火控制系统各电气接口和硬件通路,实现了测试前的设备自检硬件闭环功能。

设备自检时的硬件接线状态如图 6 所示,采用设备自检模块用以模拟点火控制系统的电气性能和电气接口结构,将模拟火工品模块连接至自检模块中,模拟真实点火控制系统测试工况,供电电源模块对设备自检模块进行加断电

控制,同时数据采集模块对自检模块内部的电气性能信号进行采集,上位机则根据固定的自检性能要求参数进行数据判定,从而完成对测试设备本身性能的健康评估<sup>[22]</sup>,自检模块内部采用固定的高精度元件产生用以测量的各类模拟信号,在设计基准已知的情况下,与控制系统判定结果进行误差比对,作为测试设备性能状态评估的一种重要手段<sup>[23]</sup>。

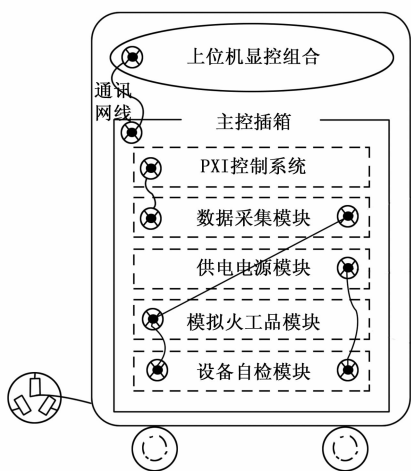


图 6 设备自检模式接线图

### 3 系统软件设计

#### 3.1 软件方案设计

基于 LabVIEW 开发平台进行点火控制系统自动测试软件的开发设计,设计上位机人机交互主界面,通过测试软件实现对点火控制系统的加断电控制、数据处理、状态快速检测和自动充泻电功能,完成对点火控制系统功能性能的测试验证工作。测试软件功能层级示意如图 7 所示,软件整体架构采用生产者-消费者软件架构,设定测试自检、系统状态检测和充放电测试子项目为生产者触发事件并进入队列,根据队列选项进行消费者响应,进入对应测试子项目中,执行对应测试子程序。

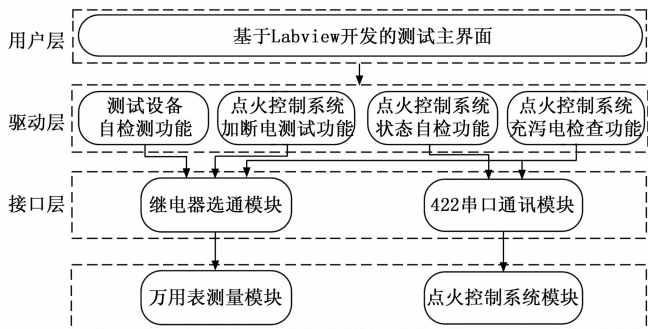


图 7 测试软件层级功能分布图

测试软件根据点火控制系统的电气接口和通信协议制定软件专用接口程序,实现底层接口协议的封装应用;驱动层软件根据各项测试功能模块的划分进行封装,一种驱动对应一种测试功能,主要包含自检功能驱动、硬件控制

驱动和通信控制驱动;用户层则搭建清晰友好的人机交互界面,完成整个测试流程的人机交互操作,完成点火控制系统的各项功能测试。

#### 3.2 软件实现流程

点火控制系统测试软件实现流程如图 8 所示,全自动流程完成点火控制系统状态自检和充泻电功能测试,各项目之间设计软件互锁保护,保证测试结果清晰、测试安全和故障处理。

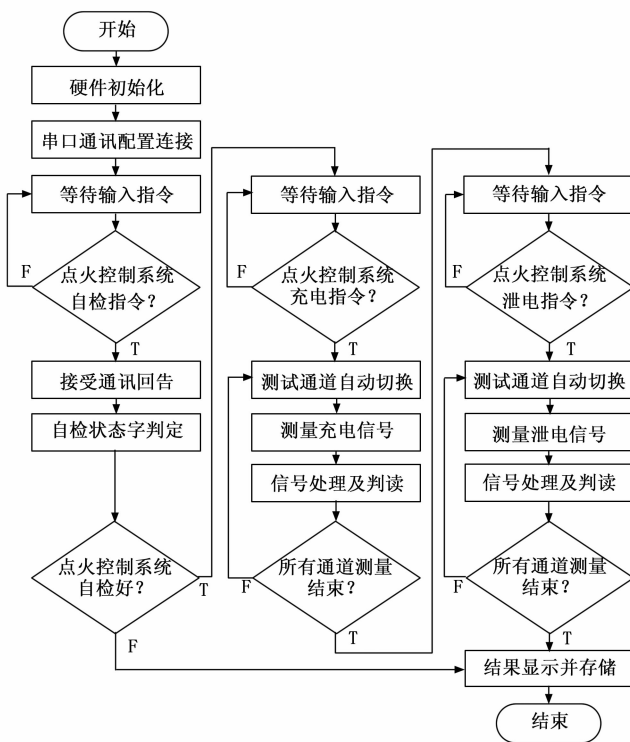


图 8 测试软件实现流程图

测试设备采用全流程自动化软件设计流程,在设备硬件初始状态下打开运行测试软件,软件首先完成测试设备各硬件驱动模块的初始化控制和串口通信测试,之后测试人员则通过上位机人机交互界面进行点火控制系统的测试操作。在上位机选择测试设备自检功能按钮,测试软件则向各功能模块发送自检指令,各功能模块则以自检模块为测试对象自动进行全通道资源板卡自检操作,自检完成后则向上位机控制系统回告自检状态标志,软件对自检标志字进行判定后确定设备自检状态。在点火控制系统测试模式下,测试软件首先给点火控制系统单机发送 BIT 自检指令,点火控制系统回告自检好后,测试软件则依次发送点火控制系统各输出通道的充电指令,同时回采各通道的输出信号,并依据幅值、脉宽和延时时间对各信号状态进行判定,依次确认点火控制系统的输出状态是否满足要求,完成依次点火充电后应下达各通道泻电指令,确保各通道点火输出不在点火输出,恢复点火通道的初始状态,保证测试流程不影响测试产品状态的要求。

## 4 测试设备功能性能试验

### 4.1 设备自检功能

测试设备进入设备自检接线状态,由上位机测试主界面通过人机交互作用发送设备自检测试命令,在规定时间内接收到自检模块发送的自检回告后,测试软件进入设备自检检测子程序继续执行,分别测试设备加电功能和矩阵开关卡多通道巡检功能。

多测试通道巡检程序内部调用矩阵开关板卡和万用表测量板卡功能模块,以 30 路点火通路的测试为例,设定自动测试的循环数,规定每一路通道的测试延时和测试精度,调用 NI 系统平台封装集成度较高的功能模块,实现矩阵开关从调用初始化到特定通道选通,消抖延时,万用表测量,数据判别,通道关闭的流程化测试。

测试设备自检时,上位机测试界面如图 9 所示,从测试界面可以看出多路选通通道的测试过程和测试结果,当测试结果满足指标要求时自检正常,完成设备自检功能测试。

序号	信号单通	2550通道	信号名称	指标范围	检测结果	结论
1	测试口	CH0	信号1	20-R-50	3.070	通过
2	测试口	CH1	信号2	20-R-50	3.070	通过
3	测试口	CH2	信号3	20-R-50	3.150	通过
4	测试口	CH3	信号4	20-R-50	3.090	通过
5	测试口	CH4	信号5	20-R-50	3.090	通过
6	测试口	CH5	信号6	20-R-50	3.050	通过
7	测试口	CH6	信号7	20-R-50	3.060	通过
8	测试口	CH7	信号8	20-R-50	3.030	通过
9	测试口	CH8	信号9	20-R-50	3.040	通过
10	测试口	CH9	信号10	20-R-50	3.010	通过
11	测试口	CH10	信号11	20-R-50	2.980	通过
12	测试口	CH11	信号12	20-R-50	2.960	通过
13	测试口	CH12	信号13	20-R-50	3.020	通过
14	测试口	CH13	信号14	20-R-50	3.010	通过
15	测试口	CH14	信号15	20-R-50	3.010	通过
16	测试口	CH15	信号16	20-R-50	2.990	通过
17	测试口	CH16	信号17	20-R-50	3.510	通过
18	测试口	CH17	信号18	20-R-50	3.420	通过
19	测试口	CH18	信号19	20-R-50	3.520	通过
20	测试口	CH19	信号20	20-R-50	3.440	通过
21	测试口	CH20	信号21	20-R-50	3.540	通过
22	测试口	CH21	信号22	20-R-50	3.480	通过
23	测试口	CH22	信号23	20-R-50	3.460	通过
24	测试口	CH23	信号24	20-R-50	3.530	通过

图 9 测试设备自检测试界面

### 4.2 点火控制系统测试功能试验

点火控制系统功能测试界面如图 10 所示,点击自检按钮则上位机开始向点火控制系统发送状态自检命令,点火控制系统本身收到状态检测指令后开始进行状态快速检测并发送状态检测回告给上位机,点火控制系统回告结果在自检值和自检数据中显示,通过判读点火控制系统返回状态检测回告值可以实现故障的准确定位,状态快检结果直观显示在界面指示灯。

完成点火控制系统状态自检是进行点火控制系统充泻电功能测试的前提条件,上位机接收到系统自检正常的回告后,点击软件界面上的充放电按钮给出系统充电指令,同时顺序接通各个点火通路,设定规定的充电时间,检测每一路通道充电后的存储电压是否满足指标要求,充电时间是否在要求范围内。所有点火通路充电结束后,发送系统泻电指令,检测各通道放电时长和放电后的端电压,并且充电测试后充分的泻电操作也是对点火控制系统的安全性测试要求。



图 10 点火控制系统功能测试软件界面

## 5 结束语

针对点火控制系统在不同装备种类下的测试有效性和测试快捷性要求,提出了一种用于点火控制系统功能状态测试流程自动化的专用测试设备,以一定的测试精度和测试速率,实现了对点火控制系统的状态快速检测和点火功能验证,在全测试过程中测试软件具备互锁安全保护和故障处理机制,测试设备集成度高,测试软件人机交互功能良好,测试数据精确度和重复一致性在试验中得到充分验证,该专用测试设备可以稳定且快速地完成点火控制系统的性能验证工作。

### 参考文献:

- [1] 杜志,甄国涌,董小娜. 点火控制器的安全性及可靠性设计[J]. 计算机测量与控制, 2013, 21 (1): 168-170.
- [2] 韩克华,刘举鹏,任西,等. 脉冲推冲器阵列数字点火控制系统研究[J]. 火工品, 2005 (4): 37-40.
- [3] 史洪亮,杨登仿,谭勇,等. 新型安全的点火控制系统的设计和实现[J]. 计算机测量与控制, 2006, 14 (10): 1343-1345.
- [4] 李士刚,王坤云,袁焯,等. 复杂装备系统任务可靠性在役考核评估方法[J]. 空天防御, 2023, 6 (1): 23-38.
- [5] 关凯元,陆波. 应用于导弹存储环境监测的数据采集系统设计[J]. 空天防御, 2019 (3): 12-18.
- [6] 成凤敏. 虚拟仪器在点火控制器检测系统中的应用[J]. 唐山学院学报, 2010, 23 (3): 49-66.
- [7] 管再升,阮文华,刘伟,等. 轨控推力矢量技术在防空导弹上的应用研究[J]. 空天防御, 2020, 3 (2): 1-7.
- [8] 张雄星,王伟,王可宁. 弹载测量系统中数据存储的设计[J]. 西安工业大学学报, 2009, 29 (1): 71-73.
- [9] 殷睿,沈方,陈伟康,等. 基于反馈数据分析的某火工品可靠性提升研究与验证[J]. 质量与可靠性, 2018 (1): 17-20.
- [10] 王晓晖,陈纲. 固体火箭发动机电容充电式点火控制系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2020, 28 (1): 95-99.
- [11] 张烈刚,郭勇. 基于 VXI 总线的飞机军械设备自动测试系统[J]. 计算机自动测量与控制, 2002, 10 (5): 324-326.

(下转第 116 页)