

## 便携式点火电路测试仪设计

田书成<sup>1</sup>, 王 琰<sup>2</sup>

(1. 凯迈(洛阳)测控有限公司, 河南 洛阳 471000;

2. 西北工业大学 航海学院, 西安 710000)

**摘要:** 现阶段导弹点火电路的测试需配备专用测试设备, 设备种类多、操作方法复杂繁琐、测试精度低、测试效率低下, 已逐渐难以满足通用化、轻小型化和高精度的要求; 针对导弹点火电路的测试需求, 研制了一套涵盖七型导弹火工品测试的点火电路测试仪, 阐述了其系统组成及工作原理, 详细介绍了硬件设计、系统软件架构设计及测试流程设计; 实际应用结果表明: 点火电路测试仪满足测试性、稳定性、安全性和可扩展性等要求, 大大提高了火工品测试的自动化程度和精度, 且测试过程安全可靠。

**关键词:** 便携式; 点火电路; 自动; 测试仪

## Design of Portable Ignition Circuit Tester

TIAN Shucheng<sup>1</sup>, WANG Yan<sup>2</sup>

(1. CAMA (Luoyang) Measurement and Control Co., Ltd., Luoyang 471000, China;

2. School of Navigation, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710000, China)

**Abstract:** The testing of missile ignition circuits requires specialized testing equipment at present, but there are the shortages of multiple types of equipment, complicated and tedious operation methods, low test accuracy and efficiency. It is difficult to meet the requirements of generalization, miniaturization, and high precision; Aimed at the testing requirements of missile ignition circuits, an ignition circuit tester which tests seven types of missile ignition circuits is developed; The composition and working principle of the system elaborated, the hardware, software architecture, and test process of the system are introduced in detail; The actual application results show that the ignition circuit tester meets the requirements of testability, stability, safety and scalability, greatly improving the automation and accuracy of pyrotechnic testing, and it has a safe and reliable testing process.

**Keywords:** portable; ignition circuit; automatic; tester

## 0 引言

火工品起爆电路在一定时刻通过自身的引爆, 控制发动机点火。火工品起爆电路作为导弹控制系统电路的重要组成部分, 是影响导弹安全性及可靠性的重要电路。因此在导弹发射前必须进行点火电路测试, 以确保火工品控制通路性能指标正常<sup>[1-5]</sup>。

目前国内空空导弹点火电路的测试, 采用三型专用的点火电路测试仪完成对应型号导弹电爆电路的测试, 该三型专用测试仪为手动测试, 操作方法复杂繁琐、测试精度低、测试效率低下, 已逐渐难以满足现阶段对导弹测试设备通用化、轻小型化和高精度精度的需求。发展具有“三化”即“通用化、系列化、组化”和“三性”即“高可靠性、良好的可维护性、高使用性”的测试设备势在必行<sup>[6-11]</sup>。因此, 为减少保障设备种类, 提保障效率, 在尽可能便携的条件下研制了一台既满足七型导弹火工品测试需求, 又具备一定功能扩展及良好人机交互, 适用于基层级导弹维护保障的便携式点火电路测试仪。该测试仪采用自动测试, 在降低成本的同时大大提高了测试效率, 较好的满足了七

型导弹的火工品测试要求。

## 1 系统组成及原理

便携式点火电路测试仪采用主机通用、测试电缆专用的设计思想, 主机对外测试接口进行统型设计, 针对不同的测试对象设计专用的测试电缆, 电缆一端为统型接口对接插头, 另一端依据被测产品测试接口选用对应型号连接插头。

便携式点火电路测试仪由主机和针对每型导弹的专用火工品测试电缆组成。测试仪主机根据测试功能采用模块化电路设计, 主要由测量单元、高效电源电路、测量转换开关三部分组成。测试仪总体组成结构图如图 1 所示。

为保证测试仪的便携性, 依据测试仪及测试电缆种类设计专用包装箱, 测试仪及测试电缆在包装箱内合理布局, 电缆按照测试对象分类存放, 便于测试者快速展开测试。

## 1.1 测试仪主机原理

测试仪主机总体设计为控制模块、人机交互模块、电阻检测模块和电源模块等模块。控制模块是测试仪的核心处理单元, 协调各子系统的工作、实时监控各子系统运行

收稿日期: 2023-07-06; 修回日期: 2023-08-10。

作者简介: 田书成(1984-), 男, 工程师。

引用格式: 田书成, 王 琰. 便携式点火电路测试仪设计[J]. 计算机测量与控制, 2024, 32(7): 322-328.

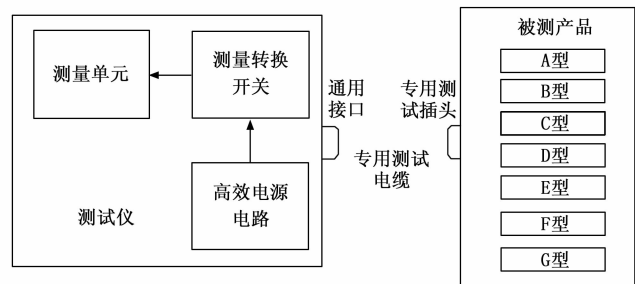


图 1 测试仪总体组成结构框图

状态、实现各种测试功能和测试算法；电阻检测模块是整个系统的主体，是实现技术指标的关键部分，针对测量专用电路小电阻的安全要求，选用小电流恒流法测量，对绝缘电阻等大电阻使用分压法测量；人机交互模块主要包括 OLED 屏显示界面和面板按键输入两部分，向用户提供友好的操作界面；电源模块主要为各子系统提供正常工作所需的供电电压。测试仪主机原理框图如图 2 所示。

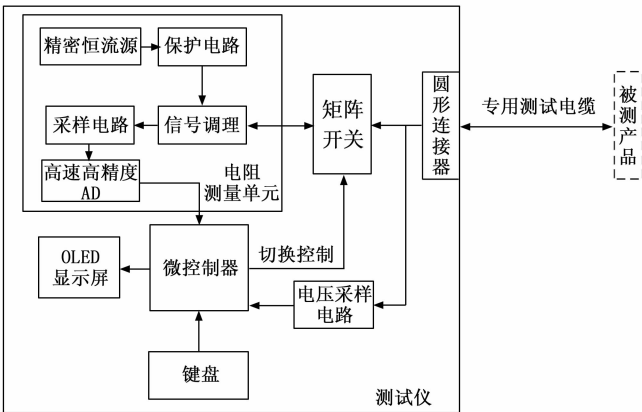


图 2 测试仪主机电路原理框图

电阻测量单元采用恒流源方式来取样，主要由前端信号采样电路和后端信号处理电路部分组成。前端电路由恒流源提供一个可调节大小的稳定电流，通过信号调理电路后变换为一个电压信号提供给 A/D 转换器，然后由后端电路测试出电路阻值。由于系统测试电流要求很小，产生的电压信号也很小，为了满足 A/D 转换器的输入要求，所以在进入 A/D 转换器之前要通过放大电路使信号稳定在 0~+2.5 V 之间，同时根据信号大小自动切换量程。

电压测量单元主要由电压采样电路和 A/D 转换器组成。电压采样电路对被测目标电压信号进行滤波、整形和采样保持，将处理后的电压信号送入 A/D 转换器进行采样，最终测量出电压值。

测试仪采用的 A/D 转换器具有 24 位 ±1/2 LSB 的精度，内部集成自校准和系统校准电路，对转换结果进行修正，以确保采样的准确。考虑到手持测试仪低功耗、环境适应性等要求，电子元器件采用低工耗、工作温度范围宽的高性能集成芯片。考虑到系统可靠性的要求，测试仪设

计保护电路对系统的运行实时进行监控，同时实时监控测试仪电源系统，并为用户提供电量指示。

测试仪采用军温级 OLED 显示屏，确保显示部分在低温状态下的正常运行，户外工作时在阳光下可清晰显示。留有供用户使用的键盘接口，方便使用。总体来说，在保证系统的高精度和低功耗的前提下，选用集成度很高的集成电路，尽量减少外围电路的复杂程度，以确保系统的可靠性，同时也可以有效的缩小测试仪的体积。

测试仪采用 6 节 5 号碱性电池供电，设计有电池电量监测功能，当电池电压下降至预设阈值时，测试仪显示电池电量不足，提示用户及时更换电池。

1.2 点火电阻测试原理

为消除接触电阻及测试电缆测试回路电阻的影响，能精确测试点火回路电阻，点火电阻测试采用恒流“四线制”测量方法，该方法设计原理为：给被测对象一个恒定的电流，然后检测被测对象两端的电压，根据欧姆定律，再用电压除以电流，从而求出被测对象的电阻，该方法可以有效避免测试接触电阻和测量线缆电阻引入的测量误差。点火电阻测试原理如图 3 所示。

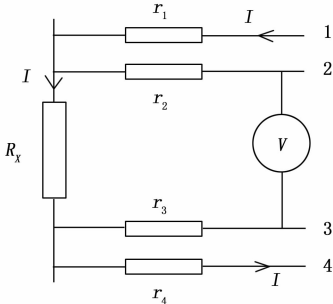


图 3 “四线制”测试原理图

图 3 中， $r_1 \sim r_4$  为测量线缆自身电阻和测量时与被测对象连接时的接触电阻； $I$  为恒定电流，测试时测试仪根据测试电阻范围自动选择不同的恒流档位； $R_x$  为被测火工品电阻。由于电压测试的输入阻抗很高（至少在几十  $K\Omega$  以上），所以给  $R_x$  提供的电流  $I$  几乎不会被分流，因此根据欧姆定律  $R_x = V/I$  可知， $R_x$  与  $r_1 \sim r_4$  无关。

1.3 弹上多路火工品电阻的测试原理

进行弹上多路火工品测试时，通过外接的专用测试电缆测试插头与弹上被测插座接口对接，根据被测产品测试接口测试点统一规划硬件接口资源，从被测产品测试点开始到测试仪通用接口，测试电缆回路全部采取四线制接线，与被测产品对接的测试电缆的测试插头内每个插针引出两路测试线以实现“四线制”测试原理。测试仪内提供一组四线制测试信号，通过内部电子转换开关电路来实现对被测插头不同位置的各路点火电阻的轮流测试。

1.4 引信起爆电容寄生电压的测试原理

测试仪具备两路电压测试通道，用于引信起爆电容寄生电压测试功能，电压测试范围为 0~5 V，最高耐受电压为 30 V。电压采样电路对被测目标电压信号进行滤波、整

形和采样保持, 将处理后的电压信号送入 A/D 转换器进行采样, 最终测量出电压值。

## 2 详细设计

### 2.1 测试仪结构设计

为保证测试仪的电磁兼容性, 机壳采用航空铝件加工, 全密封处理, 可有效抗电磁干扰。为适应外场环境条件, 显示屏选用附加防眩光保护玻璃的 OLED 屏, 在阳光下可清晰显示, 方便户外工作测量; 测试仪按键采用机载屏显周边键技术, 按键触感清晰、防水密封性好。

在测试仪盒体下端内嵌有 1 个 J599 系列圆形航空电连接器插座, 能与所有测试电缆的配套插头对接, 而且拧上插头时, 手持部分不与设备结构干涉, 使用方便。盒体的下盖板设计有密封槽, 用于安装硅胶密封圈。电池舱位于下盖板上, 电池盖板通过 M3 螺钉固定, 更换电池时拧下螺钉, 然后取下盖板即可快速更换。

为保证测试仪的便携性, 在保证测试仪功能和性能的前提下, 测试仪小型化和轻量化为设计的中中之重, 通过对内部功能分区、优化布局、电路板设计及材料选型等设计工作, 最终设计主机机壳尺寸为 220 mm (高) × 120 mm (宽) × 60 mm (厚), 整机重量预估小于 3 kg。

测试仪面板设计 4 个按键和 1 个指示灯, 功能如下所述:

- 1) “开/关”键: 控制测试仪开机和关机功能;
- 2) “测量”键: 启动测试功能;
- 3) “确定”键: 用户确认当前选择;
- 4) “保存”键: 保存当前测试数据;
- 5) 工作状态指示灯: 表示测试仪工作状态。绿灯亮代表“测试仪正在测试中”; 绿灯灭代表“测试仪当前没有测试任务, 处于待机状态”。

### 2.2 恒流源及保护电路设计

为保证对点火电路的测试安全, 测试仪通过测试回路的电流有一定规定, 按照军用安全标准的规定, 测试电流应尽可能小, 最大不大于 10 mA。因此测试仪设计采用硬件恒流源, 加入了限流保护电路, 基准稳压源短路电流较小, 从而保证测试对象安全。恒流源及保护电路原理图如图 4 所示。

### 2.3 控制电路设计

根据系统的实际需求, 选用 ST 公司生产的基于 Cortex-M3 内核的 ARM 处理器 STM32F4xx 作为整个系统的核心控制器。它具有丰富的 I/O 资源, 大容量 FLASH、SRAM 存储器, 高性能的标准通信接口, 如 IIC、USART、SPI、SDIO、CAN、USB 等, 以及 12 位 ADC 和 DAC 模块, 可配置的静态存储器控制器 FSMC。STM32 片内集成的 2 个 SPI 接口最高通信速率可达 18 Mbit/s, 满足系统的设计目标。采用高精度定时器, 时间测量精度不低于 1 ms。考虑到系统可靠性的要求, 使用片内 12 位 ADC 模块实时监控系统电源电压, 为用户提供电量指示。控制电路原理框图如图 5 所示。

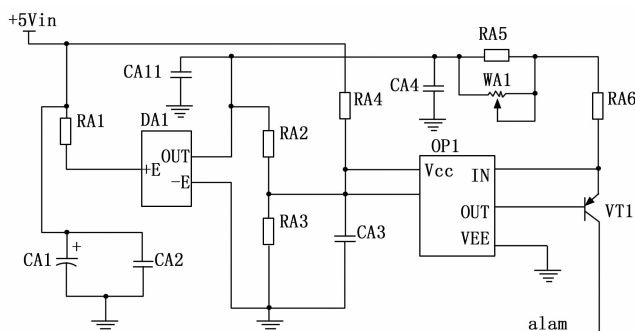


图 4 恒流源及保护电路设计

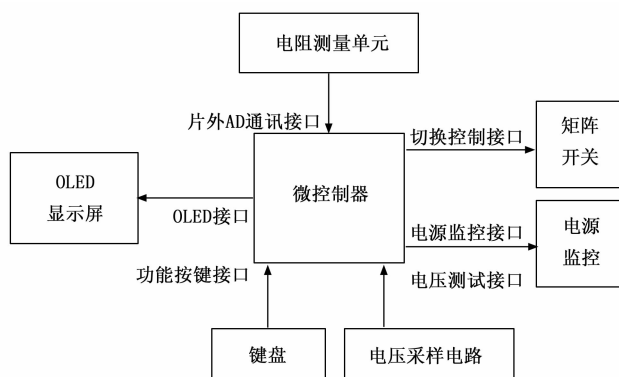


图 5 控制电路原理框图

### 2.4 高速高精度 AD 采集电路设计

根据设计精度要求, 选用 24 位 A/D 转换器, 按 20 位为其实际处理效果, 满量程为 5 V, 则分辨率约为 0.004 7 mV; 若恒流源为 9 mA, 则 0.01 Ω 的压降为 0.09 mV, 假设经过外部 10 倍放大, 压降为 0.9 mV, 精度值约为最小分辨率的 190 倍, 满足设计要求。若采用 A/D 内部放大电路, 可以进一步提高其 LSB 表达数。

为消除温度漂移对测试结果的影响, 测试仪硬件设计均选用高精度、高稳定度、低温漂的器件, 保证系统在一 10 ℃ ~ +40 ℃ 环境下工作稳定可靠。同时, A/D 转换电路采用差分通道式采集, 消除了 A/D 通道单端的温度漂移误差。AD 采集电路原理图如图 6 所示。

### 2.5 电源电路设计

测试仪中控制系统和测量电路需要 5 V, 3.3 V, 2.5 V 等多路电压, 因此需要设计高效率的降压电路为测试仪的控制系统和测量电路供电。

电源降压电路设计原理图如图 7 所示。5 V 电源电路设计原理图如图 8 所示。3.3 V 电源电路设计原理图如图 9 所示。

测试仪的电源可分为模拟电源和数字电源两种, 为了消除模拟电源和数字电源之间的干扰, 在硬件设计上采用多重措施降低干扰<sup>[12-14]</sup>。

- 1) 采用了模拟地与数字地隔离的方式, 同时增强模拟电路性能, 有效降低数字干扰;

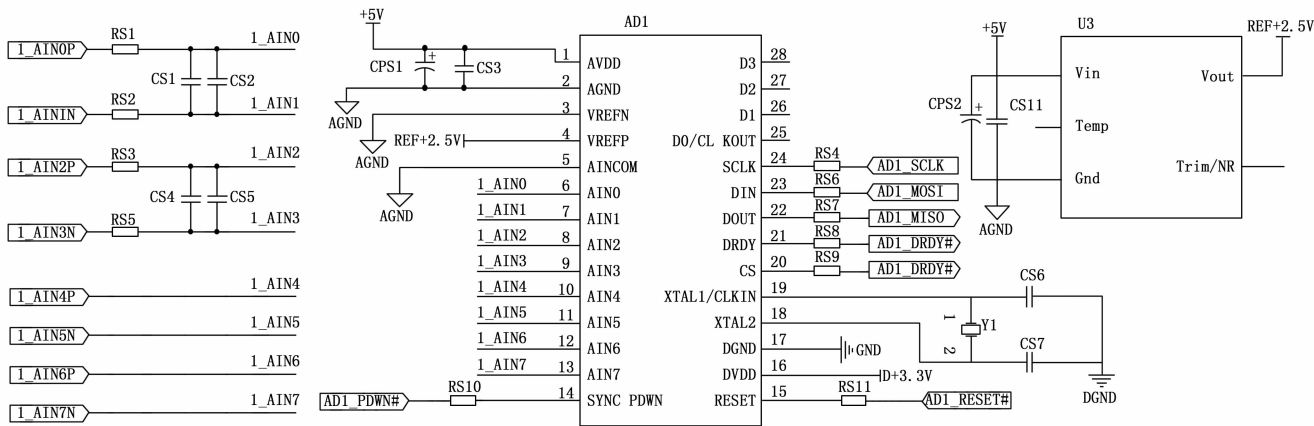


图 6 AD 电路原理图

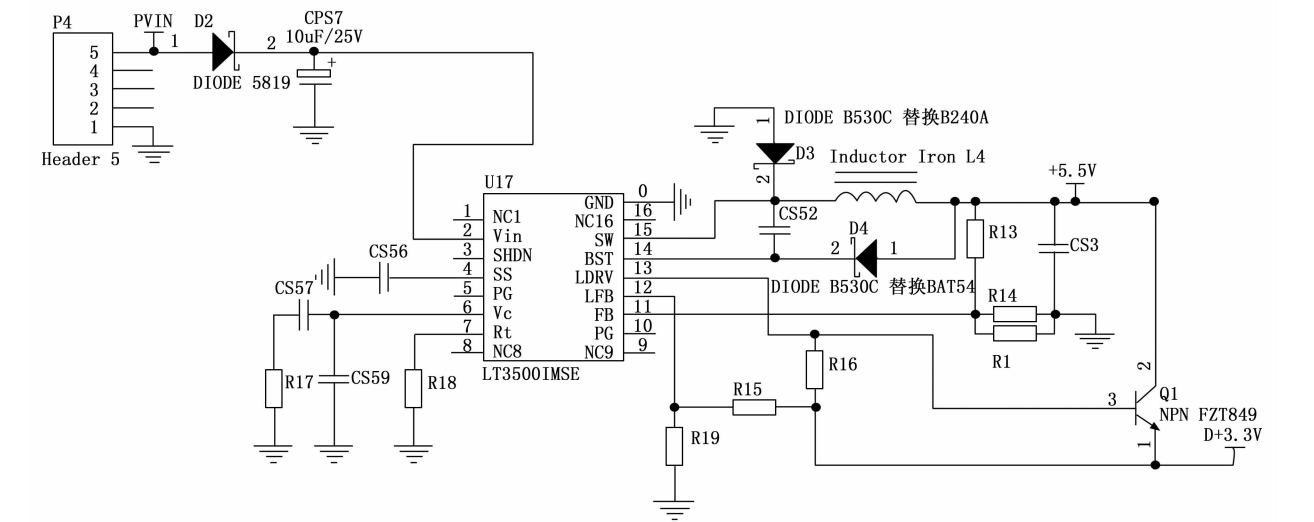


图 7 主降压电路设计原理图

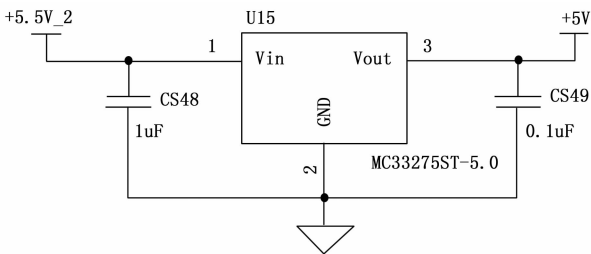


图 8 5 V 电源电路

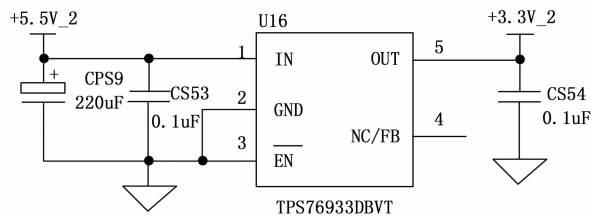


图 9 3.3 V 电源电路

- 2) 在电源输入电路中加入磁珠抑制高频脉冲;
- 3) 在电源输入电路中加入 TVS 二极管吸收尖峰脉冲;
- 4) 每个芯片的电源均加入了独立的滤波旁路电容, 有效保护每个芯片。

为了保证被测火工品在测试中的安全, 在电源系统设计中加入了安全保护电路, 控制供电安全, 且在软件设计中也实时监测系统总电流, 出现异常情况立即关闭电源系统, 确保测试对象的测试安全。

2.6 专用测试电缆设计

测试电缆对火工品测试的安全性及测量精度影响较大, 因此对电缆设计提出明确要求, 电缆设计遵循以下原则:

- 1) 测试电缆所用的连接器均采用军品级航空电连接器, 并配备尾部附件;
- 2) 电缆设计电缆名称、代号及插头标牌, 标识明晰;
- 3) 电缆芯线根部涂覆绝缘固定胶, 防止导线脱落导致与其他测试信号线搭接, 从而保证测试对象安全;
- 4) 电缆采用军温级镀银导线制作, 插头接缝处做封胶处理, 电缆外加金属屏蔽层和绿色尼龙护套, 从而有效屏

蔽电磁干扰并保护线缆，延长使用寿命；

5) 将线缆的屏蔽层与插头外壳连接，使得线缆有效接地，从而增强线缆的抗干扰能力。

测试仪对外通用接口选用圆形航空电连接器插座，专用测试电缆一端采用圆形航空插头与测试仪主机插座连接，另一端根据不同型号导弹及测试项目采用与接口对应的连接器。专用测试电缆根据每型被测产品的测试需求，每根电缆设计专门的名称及识别编码，如表 1 所示。测试电缆分为 6 类：分别为 1 号测试电缆（A、B 型产品测试电缆）、2 号测试电缆（C、D 型产品测试电缆）、3 号测试电缆（E、F 型产品测试电缆）、4 号测试电缆（G 型产品测试电缆）、通用电阻测试电缆及通信电缆。

测试仪能够实现“一键式自动测量”，通过表 1 的识别码自动识别测试电缆，然后根据电缆型号自动判断被测导弹型号和相应的测试项目，并提示用户进行确认。当用户确认导弹型号、测试项目都正确后，测试仪开启自动测试流程，待测量完毕后，显示测试结果，用户可根据需要决定是否存储测试数据。

表 1 电缆识别码设计表

序号	识别码 (ID4、ID3、ID2、ID1)	短接工艺	备注
1	0000	ID4、ID3、ID2、ID1 与 GND 短接	通用开尔文电缆
2	0001	ID4、ID3、ID2 与 GND 短接，ID1 为空	1 号电缆-1
3	0010	ID4、ID3、ID1 与 GND 短接，ID2 为空	1 号电缆-2
4	0011	ID4、ID3 与 GND 短接，ID2、ID1 为空	1 号电缆-3
5	0100	ID4、ID2、ID1 与 GND 短接，ID3 为空	2 号电缆-1
6	0101	ID4、ID2 与 GND 短接，ID3、ID1 为空	2 号电缆-2
7	0110	ID4、ID1 与 GND 短接，ID3、ID2 为空	2 号电缆-3
8	0111	ID4 与 GND 短接，ID3、ID2、ID1 为空	2 号电缆-4
9	1000	ID3、ID2、ID1 与 GND 短接，ID4 为空	2 号电缆-5
10	1001	ID3、ID2 与 GND 短接，ID4、ID1 为空	3 号电缆-1
11	1010	ID3、ID1 与 GND 短接，ID4、ID2 为空	3 号电缆-2
12	1011	ID3 与 GND 短接，ID4、ID2、ID1 为空	3 号电缆-3
13	1100	ID4、ID3 与 GND 短接，ID2、ID1 为空	4 号电缆-1
14	1101	ID2 与 GND 短接，ID4、ID3、ID1 为空	4 号电缆-2
15	1110	ID1 与 GND 短接，ID4、ID3、ID2 为空	通信电缆

3 测试软件设计

3.1 软件层次设计

嵌入式软件采用模块化分层设计方式，分为硬件驱动层、中间接口层和应用层，方便移植和升级维护<sup>[15-18]</sup>。硬件驱动层主要完成设备驱动、AD 驱动、OLED 显示屏驱动、串行通信驱动、存储器驱动等；中间接口层主要完成测试算法函数封装以及各个软件功能模块之间的数据交换；应用层主要完成测试功能项的选择和实现，以及与用户的人机交互功能。软件层次图如图 10 所示。

软件主要功能模块有：设备自检、键盘管理、OLED

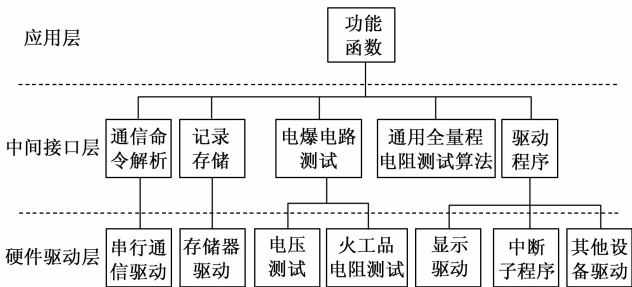


图 10 软件层次图

屏显示、全量程电阻自动测量、电缆识别、测试通道切换、电压测试、数据存储、串行通信、实时电源监控、实时测试电流监控及预警。

3.2 软件测试流程

软件测试流程如图 11 所示。

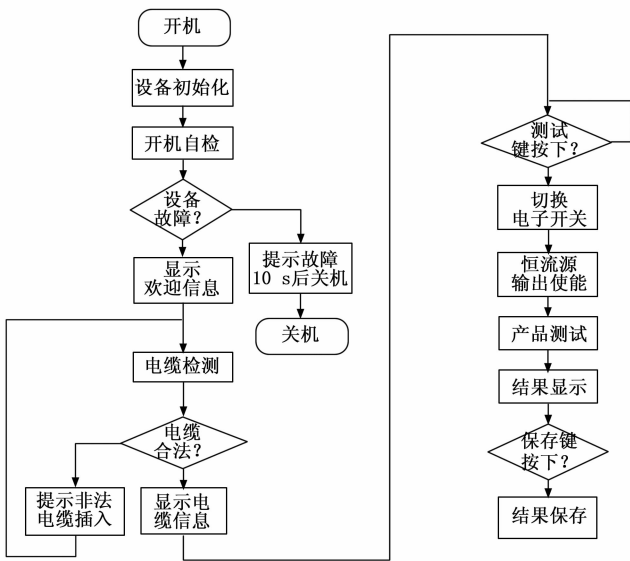


图 11 软件测试流程图

测试流程描述如下：

- 1) 测试仪开机后，首先进行设备初始化，主要包括：显示屏、通信接口、存储器和其他功能外设的初始化；
- 2) 初始化完成后进入开机自检流程。如果开机自检失败，说明测试仪有故障，显示屏显示故障信息，禁止用户继续使用；
- 3) 测试仪开机自检成功后，显示屏显示欢迎信息，提示用户可以连接电缆进行测试，此时测试仪将实时监测电缆 ID 鉴别信号线的状态，一旦检测到有电缆接入，将显示电缆名称以及对应的测试项，提示用户进行测试操作。如果检测到不合理的电缆 ID 号，将提示用户电缆错误，不能进行测试操作；
- 4) 当用户连接好测试电缆，按【测试】键即可开始测试流程，此时只需等待自动测试流程完毕，显示屏显示测试结果，用户可根据需要保存测试结果；

5) 如果需要保存测试结果, 用户按【保存】键即可, 根据显示屏提示输入产品编号, 再按【确定】键即可将当前测试结果保存至测试仪内部存储器中。

4 测试仪安全性设计

由于被测对象为导弹火工品, 因此, 保证导弹及测试人员的安全是测试仪设计的重中之重。火工品电阻测试采用硬件设计恒流源的方法保证了恒流源工作稳定可靠, 电流恒定, 测试电流限制在 10 mA 以下。

测试仪电源系统设计中加入了安全保护电路, 控制供电安全, 且软件实时监测系统总电流、电池电压和恒流源电流, 发现系统总电流或恒流源电流异常即时切断测试回路, 确保测试对象的测试安全。

测试仪对外通用接口均接入了限流电阻, 保证在最极端的情况下, 对外输出限流在安全电流范围内; 专用测试电缆结构设计中, 将电源信号线与测试信号线分开布线, 并在芯线根部涂覆绝缘固定胶, 防止电源线直接搭接在测试信号线上, 最大限度保证人员及测试产品的安全。

测试仪加强三防设计, 内部电路板进行涂覆处理, 主机外壳采用全金属屏蔽设计, 壳体盖板及通用接口插座采用密封圈进行密封, 专用测试电缆插头处进行灌封处理, 保证测试仪在严苛环境条件下的正常使用

5 实验结果与分析

测试仪生产试制完成后, 进行测控软件编制及软硬件协同调试验证, 以 C 型产品测试为例说明如下。

1) 开机: 按下【开/关】键, 测试仪在开机后进行自检, 若自检正常, 工作状态指示灯点亮, 显示欢迎界面, 然后进入 2) 步骤; 若电池电压低, 测试仪显示“电池电量不足, 请尽快更换电池”, 测试仪等待 10 s 后自动关机; 若自检失败, 显示故障原因, 测试仪等待 10 s 后自动关机;

2) 用户使用 C 型产品测试电缆连接测试仪和被测产品;

3) 测试仪自动识别测试电缆, 显示屏显示“C 产品 W1 脐带插头测试电缆, 按【测量】键开始测试”;

4) 用户按【测量】键后测试仪进入测试流程并依次自动完成该产品所有项目测试;

5) 等待测试仪测试完毕后, 显示屏显示测试结果;

6) 如果需要存储此次测试结果, 用户按下【保存】键。根据屏幕提示信息, 按【确定】键即可完成数据存储, 显示屏显示“存储成功”;

7) 如果不需要存储此次的数据, 用户可返回 1) 步骤进行下一次测试。

软件测试界面如图 12 所示。  
待机界面 C、D 型产品测试界面  
测试仪在完成功能和性能联调后, 需要与被测产品进行连续工作、高低温及电磁兼容等各种实验验证<sup>[19-20]</sup>。测试仪的测量精度及火工品测试的安全性设计为测试仪设计的关键技术, 在实验验证过程中, 测试仪选取 C、D 两型产

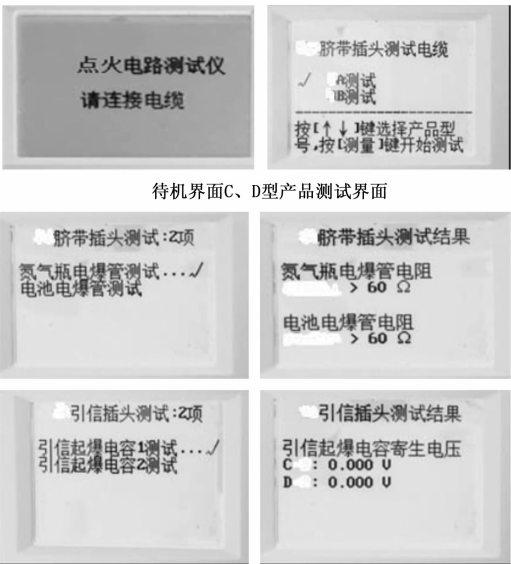


图 12 C、D 型产品测试界面

品进行了功能和性能的测试验证, 对测试仪的关键技术指标进行重点考察, 在高低温实验环境条件下, 测试仪电阻测量精度稳定在±10 mΩ 以内, 最大测试电流为 9.96 mA, 满足军用安全标准不大于 10 mA 要求。实验结果表明: 测试仪小巧轻便、转场移动方便, 满足便携性要求; 在各种型号火工品测试时仅需连接对应型号测试电缆便可实现一键自动测试, 极大提高了测试效率; 测试仪测试程序界面友好、功能强大, 能够满足极端环境下的测试需求; 测试仪自投入使用以来, 系统性能稳定可靠, 测试精度高, 测试使用方便快捷, 测试仪达到的性能指标如表 2 所示。

表 2 测试仪达到的性能指标

序号	电阻测量范围	工作温度	电阻测量精度	备注
1	0~1 Ω	-10~+40 ℃	±10 mΩ	
2	1~20 Ω	-10~+40 ℃	±1.5 %	
3	20~20 M Ω	-10~+40 ℃	±5 %	
序号	电压测量范围	工作温度	电压测量精度	备注
1	0~100 mV	-10~+40 ℃	±5 mV	
2	100 mV~5 V	-10~+40 ℃	±2 %	

6 结束语

本文针对目前火工品测试设备种类多、操作复杂及效率低下等现状, 基于测试仪主机通用、测试电缆专用的设计思想, 研制了一套便携式点火电路测试仪。测试仪通过外部电缆的连接便可快速展开测试, 体积小、重量轻、操作简单, 便于携带。目前, 该设备已完成多种型号导弹的火工品测试。使用结果表明: 测试仪测试精度高, 火工品测试安全性满足军标要求; 体积小、重量轻, 满足用户便携性使用需求, 能够有效提高作训人员快速机动反应能力; 测试仪在-10℃~+40℃稳定可靠工作, 外场环境适应性强; 同时测试仪实现一键自动测试, 在降低对操作者操作要求的前提下极大的提高了测试效率。该测试仪的成功应

用,对实现导弹的快速测试,缩短导弹发射前准备时间具有重要意义,为后续研制便携性更高、通用性更强、适用范围更广、具备火工品测试及一定故障诊断能力的便携式点火电路测试仪奠定了基础。

#### 参考文献:

- [1] 尹波,张奇锋,李卫军等.火工品电阻测量仪器的发展趋势[J].兵工自动化,2009,28(4):86-91.
- [2] 丁兰芳.飞航导弹电气系统设计[M].北京:宇航出版社,1994.
- [3] 顾炳永,李玉洁.飞航导弹上火工品测试方案及实现方法研究[J].飞航导弹,2005(7):49-51.
- [4] 郑士汉.导弹综合保障系统研制[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2011.
- [5] 张驰,史震,丁军辉.飞航导弹动态性能检测技术的研究与实现[J].计算机测量与控制,2009,17(4):699-702.
- [6] 李永军,胡昌林,赵广宁,刘博.某电子装备的机内测试系统设计[J].计算机测量与控制,2005,13(8):761-762.
- [7] 薛艳,赵利军,江浩,顾欣.基于BIT的PXI总线导弹测试系统设计[J].计算机测量与控制,2010,18(6).
- [8] 张磊,肖凡,刘丙杰.导弹平台测试系统设计方法研究[J].计算机测量与控制,2017,25(5):126-128.
- [9] 朱旂,杜建军.国外军用电子自动测试系统发展综述[J].电子测量技术,2008,31(8):1-3.
- [10] 白修宇,高志远,潘安宝等.便携式监测仪在某型导弹上的应用研究[J].国防技术基础,2009,(9):49-51.
- [11] 倪春雷.海防战术导弹测试设备发展面临的问题及对策探讨[J].飞航导弹,2001,(9):36-44.
- [12] 吴茂成,许宜申,顾济华,陶智,卜树坡.高精度数控可调直流稳压电源设计[J].微型机与应用,2013,32(14):28-31.
- [13] 刘星桥,陆秀银,唐碧强,黄振跃.基于单片机的高精度数字直流电流源设计[J].微计算机信息,2006,22(32):99-102.
- [14] 吕栋腾.一种过流保护直流稳压电源设计[J].自动化技术与应用,2016(4):145-147.
- [15] 李宝安,李行善.自动测试系统(ATS)软件的发展及关键技术[J].测控技术,2003,22(1):1-4.
- [16] 涂刚,阳富民,胡贯荣.嵌入式操作系统综述[J].计算机应用研究,2000,(11):4-11.
- [17] 葛保建.基于SOPC的软硬件协同设计平台的研究与实现[D].武汉:武汉科技大学,2008.
- [18] 王田苗.嵌入式系统设计与实例开发[M].北京:清华大学出版社,2002.
- [19] 杨克俊.电磁兼容原理与设计技术[M].北京:人民邮电出版社,2004.
- [20] 李国新,程国元,焦清介.火工品实验与测试技术[M].北京:北京理工大学出版社,1997.
- [15] 陆天泽,李宁,黄孝龙,等.基于幅度调制激光干涉技术的水下声信号测量研究[J].激光与光电子学进展,2021,58(9):233-243.
- [16] 严涛,田野,李天,等.CSK调制信号的跟踪方法[J].中国空间科学技术,2023,43(2):117-127.
- [17] 龚佩,李天昀,章听亮,等.利用联合特征参数的卫星单混信号调制识别[J].系统工程与电子技术,2023,45(2):589-596.
- [18] 王杰,马海兰,梁兴东,等.基于时延-多普勒联合调制的雷达通信一体化技术研究[J].信号处理,2023,39(6):1047-1059.
- [19] 倪育德,邹玲,刘瑞华,等.北斗系统C波段导航信号调制方式及性能评估[J].系统工程与电子技术,2022,44(12):3800-3810.
- [20] 苏琮智,王美玲,杨承志,等.基于改进EfficientNet的雷达信号调制方式识别[J].电讯技术,2023,63(1):93-100.
- [21] 秦博伟,蒋磊,许华,等.基于RE-GAN的调制信号开集识别算法[J].系统工程与电子技术,2023,45(10):3321-3328.
- [22] 杨大伟,王红星,张磊,等.多载波PSWFs-CPM联合调制信号设计与分析[J].系统工程与电子技术,2021,43(10):3000-3007.
- [23] 富炜皓,苟晓鸣,武者东.低数据量下的雷达信号脉内调制识别方法[J].现代电子技术,2023,46(3):57-61.