

一种火工品通用化自动化测试仪设计与实现

胡建秋¹, 钟成行¹, 任程², 侯宏康³

(1. 中国人民解放军 海军装备部, 北京 100073; 2. 北京振兴计量测试研究所, 北京 100074;
3. 北京航星机器制造有限公司, 北京 100074)

摘要: 随着飞行器各项性能的要求越来越高, 用于飞行器的火工品数量也在不断增加, 不同产品之间使用的火工品种类与数量不同, 需使用不同类型的火工品测试仪进行测试, 为解决火工品测试仪通用化、自动化程度不高、安全性低、精度低的问题, 进行了系统原理分析, 采用了通用平台自动测试扩展技术方法, 研制的一款通用化、系列化、可扩展化、产品化的火工品测试仪, 可以快速、准确、自动地完成多型火工品测试; 测试仪设计标准的接口、通用的测试流程, 在安全性、通用性、测试性及使用性等方面进行提升, 经实际系统测试应用可以快速、准确、自动地完成多型火工品的测试。

关键词: 火工品; 飞行器; 系统原理; 自动测试扩展; 火工品测试

Design and Implementation of a Generalized Automatic Tester for Pyrotechnics

HU Jianqiu¹, ZHONG Chenhong¹, REN Cheng², HOU Hongkang²

(1. Naval Equipment Department, PLA, Beijing 100073, China;
2. Beijing Zhenxing Metrology and Testing Institute, Beijing 100074, China;
3. Beijing Hangxing Machine Tool Co., Ltd., Beijing 100074, China)

Abstract: With the requirements of the performance of the bullet products are getting higher and higher, the number of pyrotechnics used for the bomb products is also increasing, the pyrotechnics varieties and quantities used between different products are different, and different types of pyrotechnics testers need to be used for testing, in order to solve the problems of generalization, low degree of automation, low safety and low precision of pyrotechnic testers, the system principle analysis is carried out, and the general platform automatic test extension technology method is adopted, and a general, serialized, scalable and productized pyrotechnics tester is developed. It can quickly, accurately and automatically complete the test of multiple types of pyrotechnics. The tester is designed with standard interfaces and general test processes, which improve safety, versatility, testing and usability, and can quickly, accurately and automatically complete the test of multiple types of pyrotechnics through actual system testing applications.

Keywords: pyrotechnics; aircraft; system principle; automated test extensions; pyrotechnics testing

0 引言

火工品是内部装有炸药的部件、装置和系统, 通过内部燃烧爆炸等化学反应产生能量, 达到引爆功能的总称, 较小初始脉冲能量触发条件下就能工作^[1]。火工品制造维护过程中需要频繁测试多种参数, 通过大量实际

测试数据来分析火工品功能性能是否合格, 保证火工品安全可靠使用^[2]。

测试火工品导通电阻是用来保证火工品爆炸的重要手段^[3]。导通电阻通常在零到十欧姆以上范围, 要求有较高测量精度。绝缘电阻是火工品点火电路间绝缘状态, 为脚至壳间电阻值, 是另一个重要参数, 需要准确

收稿日期:2025-07-17; 修回日期:2025-09-02。

作者简介:胡建秋(1999-),男,大学本科,助理工程师。

通讯作者:任程(1992-),男,硕士,高级工程师。

引用格式:胡建秋,钟成行,任程,等.一种火工品通用化自动化测试仪设计与实现[J].计算机测量与控制,2025,33(12):335-341.

测量^[4]。

传统测量方法包括修改量程、校准、测试、记录和其他相关过程,过程繁琐,易出现误操作,缺乏高可靠性且易使用的自动化测试设备^[5]。本项目的目的是开发一种具有多通道自动测试功能、测量准确、操作简便的火工品测试仪器。20 世纪 60 年代,文献 [6] 提出使用瞬态脉冲测试方法无损检测火工品的概念。文献 [7] 设计出 605B 型瞬态脉冲测试仪,可应用于火工品的筛选。随着科学技术发展,测量小型雷管输出性能的压电聚合物薄膜(PVDF)传感器方法、火工品起爆系统的电磁安全测试技术等新的测试方法出现^[8]。20 世纪 80 年代,我国在 605B 型瞬态脉冲测试仪基础上开发了我国新一代瞬态脉冲测试仪^[9]。赵秀超^[10]设计出使用瞬态脉冲测试技术的火工品测试系统,可判断火工品是否安全可靠。吕明召^[11]设计可用于测量火工品参数的火工品测试仪器。低电阻测量仪器主要是磁电仪器,代表产品是 MT 以及 QJ 系列电雷管测试仪,但是测量精度和分辨率都很低。国内科研院所和企业开发可测多种火工品电阻的仪器^[12]。文献 [13] 开发出低电阻测量仪,采用双向四线方法,可去除定向电位带来的干扰,提高测量精度;文献 [14] 开发以 STM32 微控制器为核心的火工品测试仪,通过继电器切换不同的测量电路,继而达到测量火工品导通电阻和绝缘电阻的目的。文献 [15] 使用基于 LabView 开发的 PXI 数据采集系统和综合火工品试验箱,能够测量多种火工品桥电阻;采用恒流四线制方法,通过开关矩阵切换不同的测量通道,大大提高了火工品测试仪测量的通用性和自动化程度;孙明庆^[16]开发通用火工品测试仪,使用 LabWindows/CVI 开发软件,使用 PCI 总线的方法来达到切换控制、数据采集以及对测量数据的计算分析,其测量原理为恒流四线法和恒压多量程法。

火工品及相应的供电通路的可靠性非常重要,在交付前必须保证这些火工品及相应的供电通路满足设计要求,所以应对其进行测试检查。另外交付装备部队后贮存时间较长,部队维护和售后保障对火工品性能检测也有需求。

目前,对于火工品的电阻测量一般手动采用电雷管测试仪和绝缘表的测量方式,容易产生错测、漏测问题,且测试安全性较差,测试效率低;测试采用专用的火工品检查台,但不同类型,检查台通用性较差,一台火工品检查台不能适应多个产品的测试需求,不符合产品化、通用化要求,同时对于器件的温漂特性难以满足高低温环境下的电阻测量精度^[17]。

为适应型号火工品测试通用化、系列化、产品化、模块化的要求,满足现代火工品的测试测量需求,新型火工品测试平台已成为火工品测试保障的发展趋势。目

前国内外设计的专用火工品检查台,系统扩展性,软件升级较差,不适用产品系列化、通用化发展需要。本文研究设计的火工品通用测试平台与国内外已有的火工品通用测试平台相比,本系统硬件创新采用底层通道接口,可以实现一百多通路的电阻测量,同时也可以通过更换板卡来扩展通道;在测试软件中,通过模块化程序编制和调用,将不同产品的测试流程加入整机测试流程中,实现多种产品火工品测试的需求;增加测试系统自检技术和测试过程中的在线监控技术,确保测试过程中火工品安全,提高火工品测试仪测试安全性。

1 系统结构及原理

火工品电阻测量包括绝缘电阻测量与桥路电阻测量,其中桥路电阻测量采用四线法、绝缘电阻测量采用对比法,在火工品测试时安全性测量要求高,桥路电阻测量安全电流不能超过 10 mA,绝缘电阻测量安全电流不能超过 2 mA,同时导通时间要求短,因此在系统设计时应充分考虑测量链路安全性^[18];在系统设计时,为解决多种类型火工品需配备专用火工品测试仪的问题,考虑后续测试测量扩展性和平台化,火工品测试仪系统组成如图 1 所示。

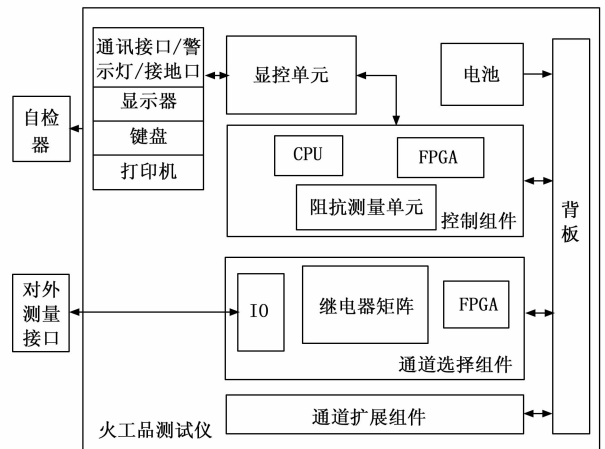


图 1 火工品测试仪系统组成框图

1) 自检仪:用于对火工品测试仪进行自我检测,检查仪器各部分功能是否正常,为测试的准确性和安全性提供前期保障。

2) 对外测量接口:是测试仪与被测火工品或外部测试对象连接的端口,负责接收外部信号输入或输出测试信号到外部。

3) 通讯接口/警示灯/接地口:通讯接口实现测试仪与外部设备(如计算机等)的数据传输与交互;警示灯用于显示仪器的工作状态或故障等警示信息;接地口用于仪器的接地操作,保障测试安全。

4) 显示器:直观展示测试过程中的各种数据、参数以及测试结果等信息,方便操作人员查看。

5) 键盘: 供操作人员输入指令、设置参数等, 实现对测试仪的人工操作与控制。

6) 打印机: 可将测试结果等数据打印出来, 形成纸质记录。

7) 显控单元: 整合显示与控制功能, 协调显示器、键盘等部件, 对测试仪的整体操作进行管控。

8) 电池: 为火工品测试仪提供电力支持, 采用三元锂电池, 通过电源转换模块产生测试仪所需的各类电源。

9) 控制组件 (含 CPU、FPGA、阻抗测量单元): CPU 作为核心处理单元, 负责整个测试仪的运算、控制等核心逻辑; FPGA (现场可编程门阵列) 可实现灵活的逻辑控制与数据处理, 适应不同的测试需求; 阻抗测量单元专门用于测量火工品等对象的阻抗相关参数。

10) 通道选择组件 (含 IO、继电器矩阵、FPGA): IO (输入/输出) 模块负责信号的输入与输出处理; 继电器矩阵用于切换不同的测试通道, 实现对多个测试对象或不同测试路径的选择; FPGA 在此组件中同样承担逻辑控制等任务, 保障通道选择的准确性与及时性。

11) 通道扩展组件: 用于扩展测试仪的测试通道数量, 使仪器能够同时或依次对更多的火工品进行测试, 提升测试效率。

12) 背板: 作为内部各组件之间信号传输的枢纽, 为不同组件间的连接提供物理支撑和信号传导路径, 确保各部分能有效通信与协作。

从对外测量接口输入的外部信号, 会传输到通道选择组件的 IO 模块, 经继电器矩阵切换通道后, 在 FPGA 的控制下, 将信号传递到控制组件的阻抗测量单元进行测量, 同时相关信号也会通过背板与显控单元等进行交互。操作人员通过键盘输入的指令, 经显控单元处理后, 传递给控制组件的 CPU 和 FPGA, 进而控制通道选择组件、阻抗测量单元等工作, 同时控制信号也会通过背板与其他组件 (如通道扩展组件等) 交互。电池的电力经电源转换后, 通过背板为控制组件、通道选择组件、通道扩展组件等各部分供电。自检器的自检信号会输入到控制组件等部分, 对各模块进行检测, 检测结果经处理后, 通过显控单元在显示器上显示, 或通过通讯接口传输到外部, 也可由打印机打印。通道扩展组件的信号与通道选择组件等通过背板进行交互, 以实现通道扩展后的信号传导与控制。为考虑安全性, 火工品测试仪的电源部分采用三元锂电池, 通过电源转换模块产生需要的电源为测试仪供电, 控制系统完成电阻测量功能, 通道选择组件实现控制任意测量链路选通至测量模块; 打印机可根据需求选择打印; 通道扩展组件可实现火工品测试平台扩展化, 通过加装通道选择组件实现更多通道的测量功能。

1.1 桥路电阻测量原理

开展桥路电阻测量技术研究, 电阻测量流程主要包含小电阻测量单元、开关选通及放大电路, 其原理如图 2 所示。

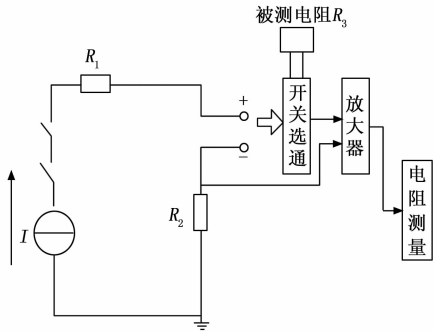


图 2 火工品测试仪桥路电阻测量原理框图

小电阻测量单元中测试电源选择可编程恒流芯片作为恒流源输出, 通过实时电流采样+PID (比例-积分-微分) 调节算法, 持续检测恒流源输出电流。若电流因温度、电源波动等出现偏差, PID 算法会根据偏差大小快速计算调节量, 反馈控制运算放大器的输出, 动态补偿电流波动, 使输出电流稳定在设定值, 经过限流电阻 R_1 后, 通过开关选通选择被测电阻, 经过标准电阻 R_2 完成回路。 R_2 两端经过放大后的电压为 V_2 , 放大倍数为 K_2 , 被测电阻两端电压经过放大后电压为 V_1 , 放大倍数为 K_1 , 根据欧姆定律, 被测电阻如公式 (1) 所示:

$$R_3 = \frac{V_1 \times K_2 \times R_2}{K_1 \times V_2} \tag{1}$$

1.2 绝缘电阻测量原理

绝缘电阻测量是针对火工品线路对壳体之间的电阻测量, 因此, 图 2 中被测电阻两端“+”和“-”两个被测点分别对应系统测试电源经过限流电阻之后的“+”点和设备机壳两个点。设备机壳和大地相连, 因此测试系统电源的正负极与大地之间需隔离, 即电源地和大地 (壳体) 之间隔离^[19]。

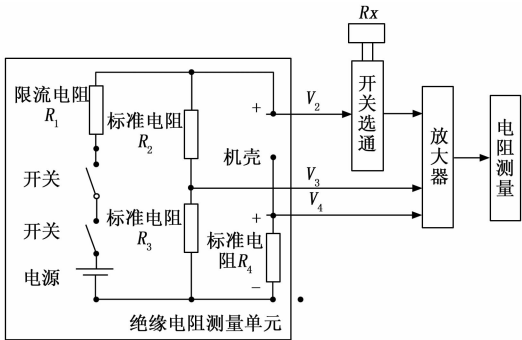


图 3 火工品测试仪绝缘电阻测量原理框图

系统电源提供 50 V 高压, 在测试回路中设计两级安

全开关,用于当测试电流超出安全限流时(2 mA),切断测试回路以保护被测对象。第一级安全开关:采用高速电磁继电器,额定电压匹配测试系统(如DC 300 V),接触电阻小于50 mΩ,确保导通时损耗低。其核心作用是快速切断主测试回路,响应时间设计为≤5 ms,能在常规测试异常(如电流略超安全阈值)时迅速动作。第二级安全开关:选用固态继电器(SSR),具备无触点、开关速度快的特点,响应时间控制在≤1 ms内。当第一级开关未能及时切断(如遇突发大电流、绝缘击穿等极端情况),第二级开关作为“最后一道防线”,凭借更快的响应速度,瞬间切断回路,保障测试系统与被测火工品的安全。且两级开关在逻辑上为“串联冗余”,通过硬件电路与软件时序协同控制,确保动作的可靠性与时效性。之后经过限流电阻(R_1)将测试电流限制在安全电流(2 mA)范围内,之后电路分为两路并联,一路由两只标准电阻(R_2 和 R_3)组成,另一路由被测电阻和标准电阻(R_4)组成。系统先对 R_3 两端电压进行测量得到 V_3 ,然后通过继电器切换至 R_4 ,对 R_4 两端电压进行测量得到 V_4 ,最后通过公式 $R_x = (V_3 \times R_2 / R_3 + V_3 - V_4) \times (R_4 / V_4)$ 计算得到被测电阻阻值。

2 通用平台自动测试扩展技术

火工品由于被测通路多,手动测量效率低、安全性差。因此迫切需要自动化测量火工品技术,火工品测量主要包含桥接电阻测量和绝缘电阻测量。自动化测试流程通过分析火工品的种类、型号、电连接器类型以及存在的电气接线原理,研究并制定测试方案和测试流程,并根据制定的标准流程,完成多路被测对象的参数测试和数据判定工作,达到比手动测试更为快捷、准确、一致性、稳定性和重复性良好的目的^[20]。

目前配置的专用火工品检查台,系统扩展性,软件升级较差,不适用产品系列化、通用化发展需要。本系统硬件采用底层通道接口,可以实现一百多通路的电阻测量,同时也可以通过更换板卡来扩展通道;在测试软件中,通过模块化程序编制和调用,将不同产品的测试流程加入整机测试流程中,实现多种产品火工品测试的需求。

为解决不同产品配置不同专用型号火工品测试仪的问题,解决火工品测试仪不通用的问题,文中提供了一种通用火工品测试仪平台方法,如图4所示。

在硬件设计时,采用通道扩展的方式,采用背板总线的方式,通过加装开关矩阵通道,从而扩展测量通道,在本方案中,单个开关矩阵组件能够选择上百路火工品电阻,在测量原理设计上,采用流水线式的方法,首先通过开关矩阵选择上百路电阻中任意的一个十端与一端,再通过统一的放大电路,对采集信号进行放大,

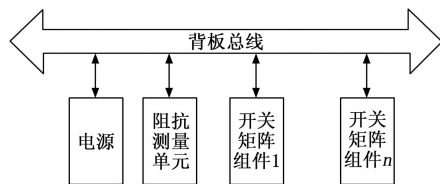


图4 硬件扩展框图

最后通过采集测量电路对信号进行测量。

为适配不同产品的火工品测试电缆,在通用的测试平台硬件基础上,可通过软件系统,将流程分解,包含型号选择、状态选择、等级选择,测量流程可编程化。测试流程:1)启动到初始化:软件启动后,先完成硬件(CPU、FPGA、测量单元等)和默认参数的初始化,为测试做准备;2)模式与对象选择:用户选择“自动”模式,再指定待测火工品、测试等级(如一级)和具体项目(如小电阻/绝缘电阻测量);3)参数与启动:设置好测量范围、合格阈值等参数后,点击“开始”,触发测试流程;4)测量与数据流转:控制组件(CPU+FPGA)驱动通道切换,阻抗测量单元采集数据,实时在界面表格/区域显示,并与阈值比对判断合格性;5)结束与后续:测试完成后,可执行打印、查历史记录,或进行自检/校准;若过程中出现异常(数据超范围、硬件故障),会弹窗/界面标红提示,同时采取停测、引导排障等措施;无异常则可结束或重复测试。如需兼容更多平台不需更改硬件,只需在软件后台加入对应测试流程即可,从而实现通用平台型号测试可扩展化,如图5所示。



图5 软件测量页面

在自动化测试技术研究中,上下位机采用灵活的通信协议,在下位机中,独立完成小电阻测量、绝缘电阻测量、温度采集、安全电压采集、电流超范围状态,安全保护等功能。上位机根据,型号测量表格,发送测量电阻的位置以及测量电阻种类,来进行测量。自动测试技术,根据用户提供的型号测量表格,来进行自动测量

同时可在设置页面中设置测量前等待时间。可实现一键式测量。

3 火工品电性能检测安全性技术

为保证火工品安全，需进行火工品测试静电防护和电磁屏蔽技术研究，采用良好的静电防护和电磁兼容性设计方案，测试流程和测试时间严格遵守火工品测试要求，研究测试系统自检技术和测试过程中的在线监控技术，确保测试过程中火工品安全^[21]。

测试电路具有防静电和一定的抗电磁干扰能力。火工品测量回路与其它电路之间有电磁隔离措施。电气线路直流供电电源正负线与测试仪壳体绝缘。每一项火工品测试连续通电时间小于 2 s。测试开始应首先自检，如果自检出现问题应自动禁止后续测试操作，并给出提示。本文火工品通用测试平台采用的自检功能设置为开机自动触发、人工手动触发双模式。开机自动触发：每次设备开机完成初始化后，系统会自动启动自检程序，无需人工操作，确保每次使用前设备核心功能处于正常状态。人工手动触发：在设备运行过程中，用户可通过操作界面（如按下“自检”按钮）主动发起自检，便于在长时间连续测试或关键测试前，再次确认设备性能。测试工作时，会实时监测安全电流值，当安全电流值超过设定阈值，或者电阻测量超差时，系统可以根据安全设置，选择是继续测量还是报警停止。来确保火工品的安全。可以设定人员撤退时间并自动进行测试流程，实现无人值守操作，极大提高了测试安全性。

在硬件系统设计中，为充分保障系统测量通路电流值不超过要求，在桥路电路设计中采用恒流源的方式，使链路电流维持在 10 mA 以内，在标准电路两侧设计一款监控电路，实时监测通路工作电流，若电流大于阈值，则关闭串联开关，在开关设计时，采用两级串联开关，防止因为开关失效导致无法正常断开链路；在绝缘电阻设计中，为确保电流值，设计的电源模块提供 50 V 电压，最大供电能力小于 100 mA，同时在电路设计中串联两路的限流电阻，用于防止电流超范围；同时设计监视电路，实时采集测量电路中的工作电流。

火工品测试的安全性设计是火工品测试仪的设计核心，为充分考虑测试仪应用场景安全测试要求，系统提供自检功能，检测电阻测量精度，分别提供 20 Ω 标准电阻和 10 MΩ 标准电阻用来测量，同时监测 50 V 的电压值、桥路电阻测量和绝缘电阻测量的安全电流值、当前系统温度，以及串口通信是否正常^[22]。

基础硬件检测：

1) 检测电源模块：测量各电源输出电压（如 ±5 V、±12 V 等），与额定值对比，判断电源稳定性。检测核心芯片：通过向 CPU、FPGA 等关键芯片发送测

试指令，验证芯片串口通信与基本运算功能是否正常。

2) 电阻测量精度检测：使用内置高精度标准电阻（精度达 0.01%），模拟不同阻值（供 20 Ω 标准电阻和 10 MΩ 标准电阻），启动电阻测量功能，将测量值与标准值对比，计算测量误差。

3) 电压监测功能检测：输入标准电压信号（50 V），验证电压监测模块的采样精度与响应速度。为各检测项设定量化阈值范围，作为是否合格的判断依据：电源模块：输出电压与额定值偏差 ≤ ±1% 为合格。电阻测量精度：测量误差 ≤ ±0.5% 为合格。电压监测：采样值与标准值偏差 ≤ ±0.2% 为合格。若某检测项结果超出对应阈值范围，则判定为该项目“自检异常”。依据异常严重程度，采用分级报警与差异化处理策略：（1）一级异常（轻微偏差，不影响基础测试）报警方式：操作界面弹出黄色警告提示框，显示异常项目及偏差值。处理方式：给予警告提示，允许用户选择“继续测试”（需人工确认风险并承担责任）或“终止测试，排查故障”。例如，某电源输出电压偏差为 +0.8%（阈值为 ±1%），属于轻微偏差，不影响核心功能，可提示用户允许继续。（2）二级异常（明显偏差，影响测试精度）报警方式：操作界面弹出橙色报警窗口，伴随蜂鸣器短响（如持续 2 s），强制暂停测试流程。处理方式：禁止继续测试，提示用户“请检查设备相关模块（如指出异常的电阻测量模块或电压监测模块），排除故障后重试”。如电阻测量误差达 +1.2%（阈值为 ±0.5%），会严重影响测试结果准确性，需排查修复。（3）三级异常（严重故障，存在安全风险）报警方式：操作界面弹出红色报警窗口，蜂鸣器持续长响，同时触发设备安全保护机制（如切断关键电源、锁死测试通道）。处理方式：强制终止所有测试操作，显示“设备存在严重故障，请勿使用，联系专业人员检修”，确保设备与人员安全。

自检成功后，系统会对桥路电阻测量以及绝缘电阻测量，实时监测当前工作电流。

根据系统指标要求，在桥路电阻测量过程中，安全电流小于 10 mA，绝缘电阻测量过程中，安全电流小于 2 mA。针对此在电路设计过程中，加入安全电流监测功能，当测量电流值超过安全电流值时，立刻断开通路，并反馈给用户报警提示，分别通过警示灯以及软件界面同时提示，其流程如图 6 和 7 所示。

4 实验结果分析

为充分验证测试仪的通用性和准确性，参数范围：其中低阻值样本（1~10 Ω）5 发、中阻值样本（10~200 Ω）5 发、高阻值样本（200~1 kΩ）5 发，确保不同参数区间的测试性能均能被验证。对所有火工品样本进行外观检查，剔除破损、引脚氧化的样本，确保实验

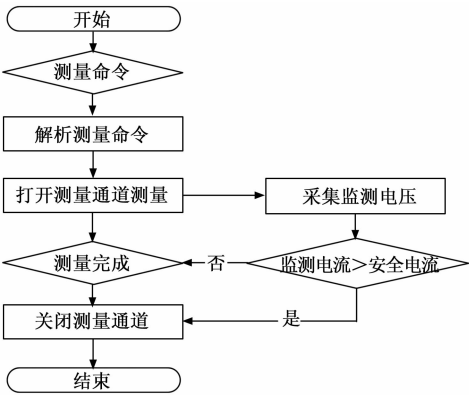


图 6 下位机安全电流测量流程

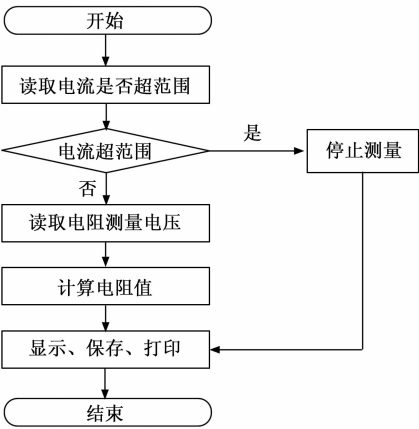


图 7 上位机安全电流测量流程

样本的初始状态合格。选取 3 种典型火工品（涵盖不同阻值范围的火工品，记为火工品 1—3），分别使用本测试仪与传统测试方法（以常用的手动台式电阻测试仪为例）进行电阻测量，每种火工品重复测量 5 次，结果如表 1 所示。

表 1 测量平均值及误差对比

类型	本测试仪测量 平均值/ Ω	传统方法测量 平均值/ Ω	本测试仪测量 误差/%	传统方法测量 误差/%
火工品 1	10.02	10.15	0.2	1.5
火工品 2	150.5	152.8	0.3	1.8
火工品 3	500.1	505.3	0.1	1.1

从表中可见，本测试仪对各类火工品的测量误差均远小于传统测试方法，在测量精度上具有显著优势，能更精准地反映火工品的真实电阻特性。

针对上述 3 种火工品，统计本测试仪与传统测试方法完成单型火工品单次测试的时间，结果如表 2 所示。

表 2 测量时间对比

类型	本测试仪测试 时间/s	传统方法测试 时间/s	时间节省 比例/%
火工品 1	10	45	77.8
火工品 2	8	40	80.0
火工品 3	12	50	76.0

本测试仪借助自动化的通道切换、数据采集与处理功能，大幅缩短了测试时间，相较于传统手动测试方法，时间节省比例均在 75% 以上，极大提升了火工品测试的效率。

对火工品 2（具有一定代表性，阻值适中）使用本测试仪进行 10 次重复测量，计算测量结果的标准差，同时与传统方法对火工品 2 进行 10 次重复测量的标准差对比，如表 3 所示。

表 3 测量标准差对比

测试方法	重复测量次数	测量值标准差/ Ω
本测试仪	10	0.05
传统方法	10	0.8

5 结束语

随着飞行器各项性能的要求越来越高，用于飞行器的火工品数量也在不断增加，不同产品之间使用的火工品种类与数量不同，需使用不同类型的火工品测试仪进行测试，为解决火工品测试仪通用化、自动化程度不高、安全性低、精度低的问题，进行了系统原理分析，采用了通用平台自动测试扩展技术方法，研制的一款通用化、系列化、可扩展化、产品化的火工品测试仪，可以快速、准确、自动地完成多型火工品测试。测试仪设计标准的接口、通用的测试流程，在安全性、通用性、测试性、使用性进行提升，经实际系统测试应用可以快速、准确、自动地完成多型火工品的测试。

参考文献：

[1] CAMILLERI R, VELLA A J. Emission factors for aerial pyrotechnics and use in assessing environmental impact of firework displays: case study from Malta [J]. Propellants Explosives Pyrotechnics, 2016, 41 (2): 273–280.

[2] 叶迎华. 火工品技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2014.

[3] 张胜伍. 电控点火装置系统集成设计 [D]. 西安: 电子科技大学, 2016.

[4] ARENY R P. Tetrapolar bioimpedance measurements compared to four-wire resistance measurements [J]. Journal of Electrical Bioimpedance, 2018, 9 (1): 1–2.

[5] LI C H, TSAI M J. 3D laser trimming technology for regulating embedded thick-film carbon resistors on a random access memory module [J]. Journal of Materials Processing Tech., 2008, 209 (4): 2057–2067.

[6] 徐文文. 基于在线参数辨识的火工品起爆控制研究 [D]. 西安: 西安工业大学, 2020.

[7] 赵志伟. 多功能电火工品无损检测仪的研制 [D]. 北京: 北京理工大学, 2016.

[8] 赵金芳, 程耀瑜. 火工品测试电路的设计 [J]. 电子测

- 试, 2010 (10): 72-75.
- [9] 葛德学, 谢兴华. 灼热桥式电火工品瞬态脉冲试验的现状和趋势 [J]. 工程爆破, 2004 (2): 24-26.
- [10] 赵秀超. 桥丝式电火工品无损检测研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2002.
- [11] 吕明召. 电火工品检测仪的研制 [D]. 北京: 北京理工大学, 2016.
- [12] 王鸣远. 多功能火工品性能测试系统的研究与应用 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2018.
- [13] 孟翔宇, 戴宜霖, 徐超, 等. 一种火工品自动测试仪的设计 [J]. 宇航计测技术, 2016, 36 (6): 77-81.
- [14] 雷峰成, 程鹏, 邵云峰. 可配置高精度火工装置测试仪的设计与实现 [J]. 现代防御技术, 2017, 45 (3): 167-171.
- [15] HUANG F. An automated vehicle license plate identification system based on LabVIEW [C] //International Conference on Computer Engineering, Information Science & Application Technology, 2017.
- [16] 孙明庆, 曹萌, 黄笑宇. 火工品多参数测试系统设计 [J]. 中国机械, 2014 (19): 254-256.
- [17] LI S, LIU J, LIU J. Design on the central air-conditioning controller based on LabVIEW [C] //International Conference on Computer Application and System Modeling, IEEE, 2010: 318-322.
- [18] 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): 88-90.
- [19] 胡娟. 某火工品短路环在线检测技术的研究 [D]. 西安: 西安工业大学, 2012.
- [20] ERKAN K, AKKOYUNLU B, BALKAN E, et al. A portable borehole temperature logging system using the four-wire resistance method [J]. Journal of Geophysics and Engineering, 2017, 14 (6): 1413-1419.
- [21] MURATA M, YAMAMOTO H, TSUNEMI F, et al. Four-wire resistance measurements of a bismuth nanowire encased in a quartz template utilizing focused ion beam processing [J]. Journal of Electronic Materials, 2012, 41 (6): 1442-1449.
- [22] 尚国庆, 陈机林, 侯远龙, 等. 一种高精度电缆绝缘电阻测量电路 [J]. 自动化技术与应用, 2020, 39 (5): 120-123.
- ~~~~~
- (上接第 269 页)
- [12] REDMON J, DIVVALA S, GIRSHICK R, et al. You only look once: unified, real-time object detection [C] // Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2016.
- [13] REDMON J, FARHADI A. YOLO9000: better, faster, stronger [C] // Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2017: 7263-7271.
- [14] FARHADI A, REDMON J. Yolov3: an incremental improvement [C] //Computer Vision and Pattern Recognition. Berlin/Heidelberg, Germany: Springer, 2018, 1804: 1-6.
- [15] BOCHKOVSKIY A, WANG C Y, LIAO H Y M. YOLOv4: optimal speed and accuracy of object detection [J]. ArXiv Preprint ArXiv: 2004.10934, 2020.
- [16] ULTRALYTICS. YOLOv5 [EB/OL]. (2020-06-09) [2024-12-13]. <https://github.com/ultralytics/yolov5>.
- [17] LI C, LI L, JIANG H, et al. YOLOv6: A single-stage object detection framework for industrial applications [J]. Arxiv Preprint Arxiv: 2209.02976, 2022.
- [18] WANG C Y, BOCHKOVSKIY A, LIAO H-Y M. YOLOv7: trainable bag-of-freebies sets new state-of-the-art for real-time object detectors [C] // Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2023: 7464-7475.
- [19] ULTRALYTICS. YOLOv8 [EB/OL]. (2023-01-10) [2024-12-13]. <https://github.com/ultralytics>.
- [20] HU J, SHEN L, SUN G. Squeeze-and-excitation networks [C] // Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2018: 7132-7141.
- [21] WANG A, CHEN H, LIU L, et al. YOLOv10: real-time end-to-end object detection [J]. Arxiv Preprint Arxiv: 2405.14458, 2024.
- [22] TAN M, PANG R, LE Q V. EfficientDet: scalable and efficient object detection [C] //Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2020: 10781-10790.
- [23] TONG Z, CHEN Y, XU Z, et al. Wise-IoU: bounding box regression loss with dynamic focusing mechanism [J]. Arxiv Preprint Arxiv: 2301.10051, 2023.
- [24] REN S, HE K, GIRSHICK R, et al. Faster R-CNN: towards real-time object detection with region proposal networks [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2017, 39 (6): 1137-1149.
- [25] SELVARAJU R R, COGSWELL M, DAS A, et al. Grad-CAM: visual explanations from deep networks via gradient-based localization [C] // Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision, 2017: 618-626.