

国产直列式电源测试仪软件的开发及应用

彭晓飞¹, 陶俊苗², 魏 明¹, 赵方雷³, 孙 宁⁴, 王茜雅¹(1. 西安航天动力测控技术研究所, 西安 710000; 2. 西安康本材料有限公司, 西安 710000;
3. 燕山大学 建筑工程与力学学院, 河北 秦皇岛 066000; 4. 北京遥感设备研究所, 北京 100080)

摘要: 直列式电源测试仪作为导弹武器系统配套单元的重要测试设备, 其国产化研发对提升国防安全与技术自主可控具有重要意义; 针对当前测试仪依赖进口软硬件、实时性不足、测试精度低等问题, 在此提出基于国产 Linux 系统与 Qt 框架的国产化解决方案。通过多线程调度算法和动态资源分配策略, 解决了高并发数据采集与实时处理的性能瓶颈, 系统响应延迟小于 10 ms, 测试效率提升 20%; 结合时序参数动态校准技术, 测量误差 $\leq \pm 0.1$ V, 标准差由 0.8 ms 降至 0.15 ms, 实现时序参数的高精度测量。满足军方对导弹武器测试设备自主可控的需求, 为国产化测试设备的设计提供了理论和技术参考。

关键词: 国产 Linux 系统; Qt; 多线程技术; 动态校准; 自主可控

Software Development and Application of Domestic Inline Power Supply Testers

PENG Xiaofei¹, TAO Junmiao², WEI Ming¹, ZHAO Fanglei³, SUN Ning⁴, WANG Qianya¹(1. Xi'an Aerospace Propulsion Measurement and Control Technology Research Institute, Xi'an 710000, China;
2. Xi'an Kangben Materials Co., Ltd., Xi'an 710000, China;
3. School of Civil Engineering and Mechanics, Yanshan University, Qinhuangdao 066000, China;
4. Beijing Institute of Remote Sensing Equipment, Beijing 100080, China)

Abstract: An in-line power supply tester is an important test equipment for the supporting unit of the missile weapon system, and its domestic research and development is of great significance for improving national defense security and independent and controllable technology. Current testers have the shortages of imported software and hardware, insufficient real-time performance, and low test accuracy. To solve this issue, a localized solution based on the domestic Linux system and Qt framework is proposed, which achieves the performance bottleneck of high-concurrency data acquisition and real-time processing through multi-threaded scheduling algorithm and dynamic resource allocation strategy, with a response delay of less than 10 ms, and the test efficiency is increased by 20%. Combined with the timing parameter dynamic calibration technology, the measurement error is not exceeding ± 0.1 V, and the standard deviation is reduced by from 0.8 ms to 0.15 ms, so as to achieve high-precision measurement of timing parameters, which meets the military's demand for autonomous and controllable missile weapon testing equipment, thus providing a theoretical and technical reference for the design of localized testing equipment.

Keywords: domestic Linux system; Qt; multi-threading technology; dynamic calibration; autonomous and controllable

0 引言

近年来, 导弹武器系统正经历着颠覆性技术变革, 其发展呈现出 3 大显著趋势: 智能化协同作战、极限环境适应能力和多模异构集成化。以美国“爱国者-3 MSE”和俄罗斯“锆石”高超音速导弹为代表的尖端

装备, 已实现多弹头分导、全自主目标识别及 10 马赫以上机动突防能力。此类技术突破使导弹内部电子系统复杂度呈指数级增长: 新型相控阵雷达导引头瞬时功耗峰值达 5 kW, 多脉冲发动机点火时序误差需控制在 10 μ s 级。这些极端工况对直列式电源测试仪提出新挑战: 1) 微秒级实时响应: 针对多弹头分导系统的电源

收稿日期: 2025-04-19; 修回日期: 2025-05-09。

基金项目: 自然科学研究面上项目(202303021221114)。

作者简介: 彭晓飞(1997-), 男, 硕士, 助理工程师。

通讯作者: 魏 明(1990-), 男, 硕士, 工程师。

引用格式: 彭晓飞, 陶俊苗, 魏 明, 等. 国产直列式电源测试仪软件的开发及应用[J]. 计算机测量与控制, 2025, 33(7): 330-336.

时序控制，测试仪需在 300 μ s 内完成多通道电压/电流同步切换，现有国产设备 50 ms 的响应延迟直接导致制导算法时序失配；2) 微米伏级检测精度：为满足新一代氮化镓功率器件 0.1 V 栅极电压容差，测试仪测量精度需从 ± 0.2 V 提升至 ± 0.05 V 量级。

美军 2023 年测试的“风暴使者”智能弹药群，其测试系统采用量子电压基准技术，在 $-55\sim 125$ $^{\circ}\text{C}$ 温域内仍保持 0.15% 的精度稳定性。反观国内，某型反舰导弹 2023 年试验中曾因电源测试仪瞬态响应不足，导致相控阵雷达开机时序偏差 0.5 s，严重削弱战场生存能力。

针对上述问题，国内外学者在国产化测试技术领域开展了部分研究。例如，文献 [1] 提出基于 FPGA 的多通道采集方案，但未解决多线程资源竞争问题；文献 [2] 采用 Qt 开发交互界面，但缺乏动态校准机制。本文基于国产 Linux 系统与 Qt 框架，提出一种自主可控的直列式电源测试仪设计方案，通过多线程优化与动态校准技术，突破实时性与精度瓶颈。实际应用表明，该方案可为导弹武器系统的可靠测试与维护提供技术保障，并推动国产化测试设备的生态建设。

1 技术要求

直列式电源测试仪采用标准化流程：首先执行开机自检，完成硬件通道通断检测与软件系统完整性校验；随后通过型号识别加载预设参数或人工配置测试阈值；依次开展高压输出、多通道时序同步精度测试；最终自动生成测试报告，包含电压波动曲线、电源工作时序图，全过程严格遵循 GJB-181B 军用电源特性标准。

1.1 上电自检

测试仪开机后首先自动进行自检，自检内容包括内部单元状态、二次电源电压、I/O 状态等项目，自检结束后显示自检结果。

上电自检项目见表 1。

表 1 上电自检项目			
序号	自检项目	判断正常条件	备注
1	解保电源 PZ1	26 V $\pm$ 0.5 V	均为 AC/DC 变换后默认空载电压 直列式电源输出特性
2	解保控制 PZ2	26 V $\pm$ 0.5 V	
3	高压检测电压 1 零点	≤ 0.05 V	
4	高压检测电压 2 零点	≤ 0.05 V	
5	状态反馈 1 初始状态	断路	
6	状态反馈 2 初始状态	断路	

1.2 参数检测

测试仪自检正常后，自动进入监测主界面，等待用户操作。

1.2.1 高压检测电压

高压检测电压分为以下情况：

- 1) 解保电源给定后的一级解保高压检测输出电压；
- 2) 解保电源和解保控制都给定后的二级解保高压检测输出电压；
- 3) 点火触发给定后，高压检测电压类型仍需根据 1)、2) 加电状况，判断此时高压检测电压为一解高压还是二解高压状态显示；
- 4) 当在一级解保转换至断电状态时，使用一解换算系数显示残余电压；
- 5) 当在二级解保状态恢复至一级解保安全状态时，使用一级解保换算系数显示内部电压；
- 6) 当在二级解保状态转换至断电状态时，使用二级解保换算系数显示内部电压。

高压检测电压工作时序如图 1 所示。

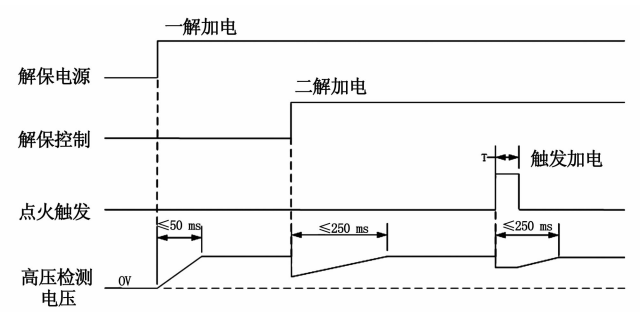


图 1 高压检测电压特征

当高压检测电压参考地为高压地时，高压检测注意事项：

- 1) 高压检测电压上可能会叠加幅值 0.5 V_p，频率范围 30 kHz $\sim$ 70 kHz 内某种定频纹波信号，需要滤波处理；
- 2) 在触发供电时，高压地上会产生的约 +87 V_p 和 -70 V_p，约 300 ns 的高频正弦衰减振荡干扰，测试仪需要采取必要的措施抑制保护。

直列式电源高压检测输出电路接口图，如图 2 所示。

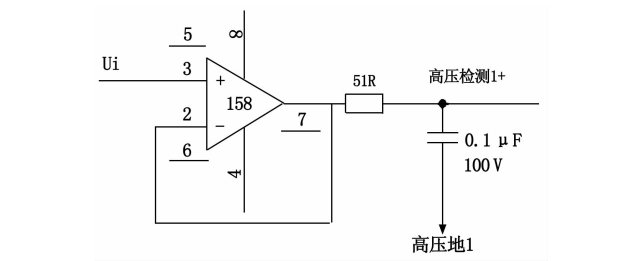


图 2 高压检测电气接口

1.2.2 状态反馈检测

直列式电源状态反馈信号为高阻或低阻值，为光耦 OC 门的通断状态。设计上拉电源，转化为电平检测信号。

根据直列式电源工作时光耦工作点特性，输出电流不超过 10 mA，此时集-射饱和电压约为 1 V；检测电

路状态翻转上升或下降时间小于 0.1 ms。

直列式电源状态反馈电路接口图,如图 3 所示。

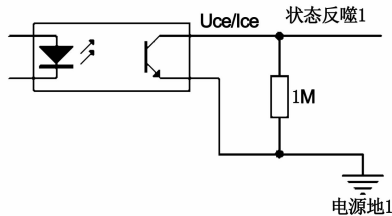


图 3 状态反馈电路接口形式

状态反馈检测分为以下情况：

- 1) 直列式电源解保电源给定后的一级解保加电后高压建立状态反馈输出；
- 2) 直列式电源解保电源和解保控制都给定后的二级解保加电后高压建立状态反馈输出；
- 3) 点火触发后时, 状态反馈输出。

状态反馈检测工作时序如图 4 所示。

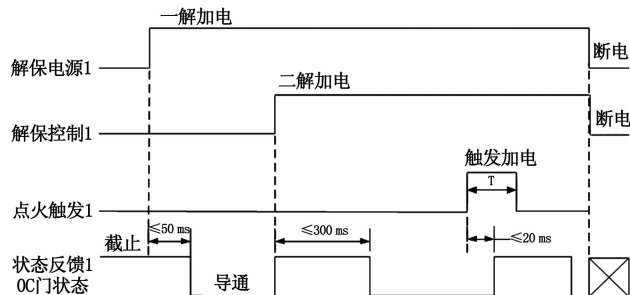


图 4 状态反馈检测工作时序图

测试仪检测时, 根据时序图给定的跳变时间范围设置最大检测时间, 如果超时, 则该通道电源故障, 不再进行后续加电。

1.3 时序测试

工作时序测试包括时序波形显示和时序参数处理。时序参数包括一解高压建立时间、二解高压建立时间和触发滤波时间。

直列式电源两路工作时序测试单独进行, 分别采集显示, 完成后, 立刻自动处理完成时序特征数据。

1.3.1 时序波形

直列式电源单路工作时工作时序波形, 见图 5。自动测试时显示时序图形, 手动测试时用指示灯、文字、数据描述时序测试过程。

1.3.2 时序参数处理

一解高压建立时间 t_1 : 定义为从解保电源上电上升沿高电平时刻到状态反馈导通下降沿时刻之间的时间。

二解高压建立时间 t_2 : 定义为从解保控制上电上升沿高电平时刻到第二次状态反馈导通下降沿时刻之间的时间。

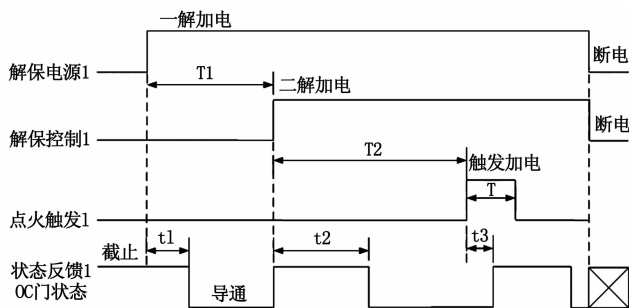


图 5 工作时序波形

触发滤波时间 t_3 : 定义为从点火触发上电上升沿高电平时刻到第三次状态反馈上升沿截止时刻之间的时间。

1.4 打印功能

可通过 USB 口方便打印当前测试报表结果。

1.5 复位功能

测试仪具有对测试过程中的报警禁止功能, 在按下复位按钮后可全部解禁, 以不影响其它功能的正常使用。

测试仪复位或重新上电后, 各设置电压均恢复至标称值, 显示图形坐标恢复至原始原点位置。

2 总体设计方案

2.1 硬件方案

在保证可靠性的前提下, 采用模块化设计思想。在此选用一款基于龙芯 3A3000 的嵌入式操作系统, 模块总体设计采用了开放的 COM Express 嵌入式计算机模块标准, 总线定义符合 Type6 标准, 尺寸为标准 Basic 尺寸。

处理器模块可对外提供调试串口, 通过该接口外接终端设备, 终端设备会打印处理器模块的上电自检信息和调试信息, 也可以通过终端键盘键入调试指令进行调试等。COMe 总线对外引出 TTL 电平的串口, 通过接口收发器 MAX3222ESE+ 转化为标准 RS222 接口电平。设计 8 路 AD 的采集通过 FPGA 实现, FPGA 通过 AD 芯片的并口或串口采集到 16 bit 的二进制码并放到相应寄存器, 软件通过读取相应寄存器计算出具体 AD 电压值。

2.2 软件需求

根据软件设计流程, 在此采用结构化、模块化的方式, 主要包含登录模块、初始化模块、手动测试模块、自动测试模块、测试数据管理模块、参数设置模块和校准模块等^[3-4]。直列式电源测试仪测试软件分为手动和自动切换测试功能, 单测试可根据手动/自动测试方式设置选项, 完成直列式电源单步功能测试和综合功能测试。软件标识及安全按照 GB 4025—2010《人机界面标志标识的基本和安全规则》规定。测试仪软件功能组成如图 6 所示。

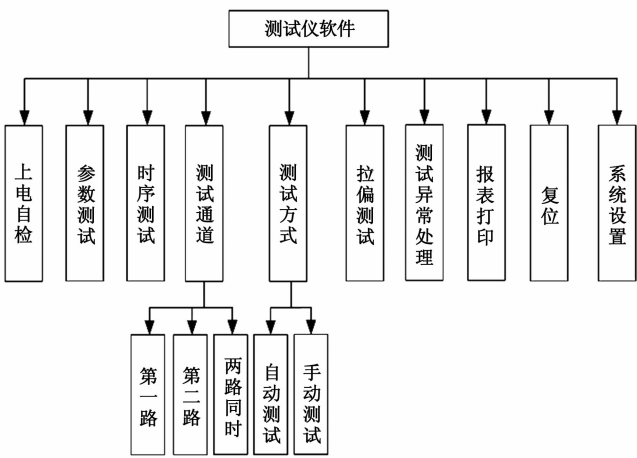


图 6 测试仪软件功能

2.3 操作系统与开发环境

国产操作系统主要以开源的 Linux 为基础进行的二次开发，目前主要有：银河麒麟、中标麒麟、红旗 Linux、华为鸿蒙等，都在各自的领域内发挥着重要作用^[5-7]。

银河麒麟为国防科技大学研制的开源服务器操作系统，提供多种版本适应不同的使用场景，支持多种 CPU，具有良好的软硬件兼容性；中标麒麟为上海中标软件有限公司研制的桌面操作系统，为 Windows 用户迁移到该操作系统提供了方便，但与其他软件兼容性差，响应速度慢；华为鸿蒙为基于微内核的模块化操作系统，采用分布式架构和微内核设计，提供了多设备之间的互联互通能力，适用于智能手机、物联网等终端设备，主要面向华为设备和生态系统，对于其他品牌设备的兼容性不高^[8]。

综合比对，银河麒麟在生态建设方面相对较为完善，提供丰富的应用软件和开发工具，能够满足用户多样化的需求。该系统支持高度的定制和配置，可以根据自己的需求对系统进行个性化设置^[9-10]。因此选用银河麒麟操作系统进行开发。

文档软件主要为金山 WPS、永中 Office、中标普华 Office、红旗 RedOffice。

软件开发环境目前主流的以 VB、VC、LabVIEW、Qt 为主^[11-12]。它们各具有独特的优缺点，适用于不同的开发场景和需求。

VB 的语法相对简单，提供了可视化的开发环境，适用于 Window 平台，采用 basic 编程语言，在处理复杂逻辑或大型项目时其扩展能力和灵活性不强，不适合开发对性能要求高的应用；VC 由微软公司开发，构架比较精简，对于初学者理解软件开发构架有很大帮助，但这也导致使用 MFC 开发软件效率相对很低，开发出来的软件界面比较简陋；LabVIEW 由美国 NI 公司研制，其他计算机语言都是采用基于文本的语言产生代

码，而 LabVIEW 使用的是图形化编程语言编写程序，产生的程序是框图的形式，定制功能较为复杂。

Qt 是一个跨平台应用程序开发框架，面向对象语言 C++，提供丰富的界面库和组件，使得开发的应用程序具有良好的用户体验，Qt 允许真正的组件编程，运行效率高，开发者可以根据需求扩展其功能，适用于开发一些需要大量运算的应用程序^[13-15]。综上所述，在此采用 Qt 作为开发环境。

3 软件设计

3.1 软件设计功能

在此采用国产 Linux 操作系统、以 Qt 作为开发环境进行软件开发。用户通过操作界面控件，向下位机发送各种测试指令，测试完成后，上位机接收来自下位机的各项检测及测试数据，通过窗口界面呈现及报表存储、打印，实现与用户的人机交互，测试流程如图 7 所示。各模块主要功能如下：

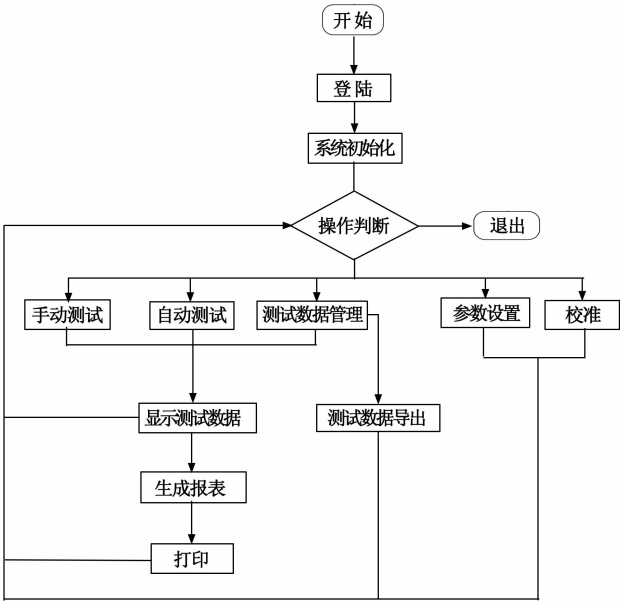


图 7 软件流程图

- 1) 登录模块主要对用户名和密码验证，防止未授权用户使用测试仪；
- 2) 初始化模块主要根据预设值参数对软件进行初始化，并在软件主界面进行显示；
- 3) 手动测试模块主要实现单项测试参数可通过预定按键操作顺序，测试过程中，并对测试原始数据进行后台日志存储；
- 4) 自动测试模块主要完成按照规定测试流程连续进行测试和转换，测试过程中，对测试原始数据进行后台日志存储；
- 5) 测试数据管理模块主要完成测试数据的查询查看及数据导出等功能；

6) 参数设置模块主要进行安全机构基本信息、测试人员信息、测试环境信息等设置;

7) 校准模块主要进行测试仪器定期校准, 确保测试数据有效;

8) 显示测试数据模块是对当前已测试的数据显示功能单元;

9) 生成报表模块根据预设的测试报告模板文件, 填入测试数据和设置的参数, 生成测试报告文件;

10) 打印模块主要对测试报告进行打印。各种类型的打印机只要安装相应驱动程序和进行正确配置, 即可进行打印;

11) 测试数据导出模块实现对原始格式的历史测试数据进行导出存储操作, 便于进行大数据跟踪监测。

3.1.1 手动测试

手动测试为单步测试, 测试项目包括: 一解加电、二解加电、点火触发加电、解保电源二解稳态电流、一解高压、二解高压、一解高压建立时间、二解高压建立时间和触发延时时间。

3.1.2 自动测试

自动测试为综合测试, 需按照自动测试流程进行。测试项目同手动测试。流程图如图 8 所示。

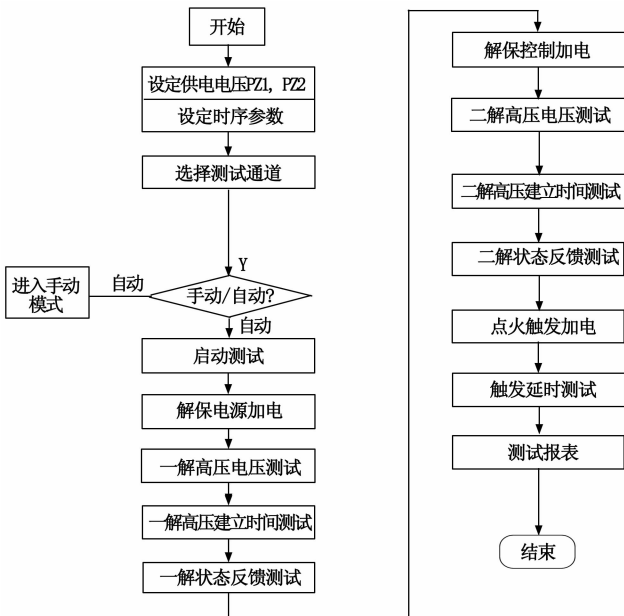


图 8 测试仪自动测试流程

3.2 Qt 的多线程技术

3.2.1 多线程任务划分与动态调度

直列式电源测试仪需在高并发数据采集与实时处理的场景下快速响应, 传统单线程架构因资源竞争导致延迟显著。为此, 系统采用多线程动态调度模型, 将任务划分为主线程、采集线程与处理线程^[16]。主线程负责 UI 事件响应与图形渲染, 通过设置实时级优先级

(SCHED_FIFO) 确保界面操作的流畅性; 采集线程通过 FPGA 直接读取 AD 数据, 采样率 1 MHz, 并采用滑动窗口滤波算法实时抑制高频噪声。

滑动窗口的数学模型为:

$$y(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x(n-k) \quad (1)$$

其中窗口长度 N 根据噪声频率动态调整, 以平衡滤波效果。处理线程处理时序参数计算与异常检测, 通过互斥锁 (QMutex) 保护共享变量, 避免多线程数据竞争^[17]。测试仪采集直列式电源工作时序如下图 9 所示。数据采集延迟时间为指令发出时刻 (T_0) 与执行反馈信号时刻 (T_1) 的差值, $\Delta t = T_1 - T_0$, 取 1 000 次连续测量的算术平均值。

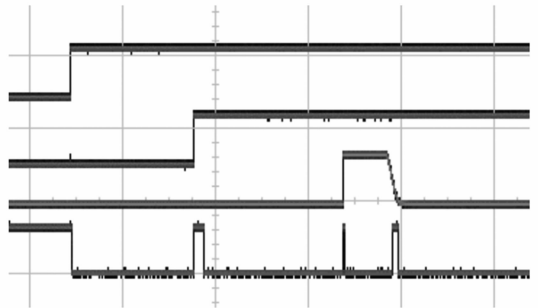


图 9 直列式电源工作时序图

动态调度模型使线程并发效率提升, 数据采集延迟由 30 ms 降低至 9 ms 以下, 显著优化了系统实时性。

3.2.2 线程同步与资源管理

在多线程环境中, 数据同步与资源竞争是影响系统稳定性的关键问题^[18-19]。系统设计了三层同步机制: 首先, 采用互斥锁对共享资源 (如状态标志、电压缓存区) 进行访问控制, 确保数据一致性; 其次, 通过 Qt 信号槽机制实现跨线程异步通信, 采集线程通过 Q_SIGNAL 发送数据包, 主线程通过 Q_SLOT 异步接收并更新界面, 避免因阻塞导致的界面卡顿; 最后, 引入动态优先级调整策略, 针对高压检测等关键任务, 实时提升其线程优先级, 确保响应时间 ≤ 10 ms。此外, 资源管理模块通过监控线程负载动态分配 CPU 资源, 例如在高压检测阶段临时增加采集线程的计算配额。实验数据显示, 上述机制使系统在满负荷运行时 CPU 占用率稳定在 65% 以下, 有效保障了复杂工况下的可靠性。

3.3 时序参数动态校准技术

直列式电源测试仪的高压检测电压易受高频噪声 (幅值 0.5 Vp, 频率 30 ~ 70 kHz) 与瞬态脉冲干扰 (± 80 Vp, 300 ns) 影响, 导致建立时间测量误差超过 2 ms, 严重制约测试精度。为抑制干扰信号并提升时序参数测量可靠性, 在此提出基于小波变换的自适应滤波算法与动态阈值调整机制。首先, 采用 Daubechies 小

波基函数对原始信号进行多尺度分解, 通过小波系数分离高频噪声与有效信号成分。小波分解公式可表示为:

$$W_f(a,b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi^* \left(\frac{t-b}{a} \right) dt \tag{2}$$

其中: a 为尺度因子, b 为平移因子, $\psi(t)$ 为小波基函数。分解后, 对高频系数进行软阈值处理以消除噪声:

$$\hat{c}_j = \begin{cases} \text{sign}(c_j)(|c_j| - \lambda) & |c_j| \geq \lambda \\ 0 & |c_j| < \lambda \end{cases} \tag{3}$$

式中, $\lambda = \sigma \sqrt{2 \ln N}$ 为自适应阈值, σ 为噪声标准差, N 为信号长度。重构后的信号信噪比提升约 15 dB, 有效保留高压建立阶段的跳变特征。

针对传统固定阈值法在瞬态干扰下易误触发的问题, 提出动态阈值调整算法。该算法基于历史数据统计特性动态修正触发阈值: 记录前 $M=50$ 个周期内高压建立时间的均值 μ 与标准差 σ , 阈值计算为:

$$Threshold = \mu + k\sigma \tag{4}$$

其中: 经验系数 $k=2.5$ 通过实验优化确定。对 20 组样本测试表明, 一解高压建立时间标准差由 0.8 ms 降至 0.15 ms。

表 2 动态校准效果对比

样本组	传统方法误差/ms	动态校准误差/ms
1~5	0.75±0.12	0.14±0.03
6~10	0.82±0.15	0.16±0.02
11~15	0.79±0.13	0.15±0.04
16~20	0.81±0.14	0.13±0.03

实验验证表明, 通过小波滤波与动态阈值调整, 不仅有效抑制了瞬态干扰, 还提升了时序参数测量的鲁棒性。在 240 小时连续运行测试中, 系统高压检测稳定性达 99.8%, 为导弹武器系统的可靠测试提供了技术保障。

3.4 UI 界面开发

根据软件模块化设计 UI 界面, 该界面设计按照实际操作习惯、视觉习惯, 做到醒目、明了、布局合理、操作简单、防误操作或误操作下人性化提示, 防止误操作带来的软件异常死机、异常崩溃、异常触发等行为。

4 实际应用

通过 Linux+Qt 的研究, 可实现测试仪和军方关于实现导弹武器配套单元测试产品全国产化的要求, 未来可承担更多型号的全国产化测试仪的软件研制工作, 实现多任务、多线程嵌入式控制系统, 应用领域将覆盖机载、舰载及车载等不同系统需求。

4.1 可靠性验证

软件设计坚持工程化应用要求, 采用模块化、冗余度、人机友好性设计。按照 GJB/Z102A-2012《军用软件安全性设计指南》进行软件可靠性设计, 对控制策

略、判据、边界条件等的设定应充分测试和验证, 确保可靠。

1) 高低温试验验证:

依据 GJB150.3A-2009 标准, 测试仪在 $-40 \sim +60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的极限温度环境下进行了 72 小时温变循环试验。试验中, 响应延迟在 $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时由常温 8 ms 增至 13 ms; 电压检测精度在高温下最大偏差为 $\pm 0.08\text{ V}$, 满足 $\pm 0.1\text{ V}$ 的容差要求。针对 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时出现的配置芯片时序失锁问题, 通过优化电源轨低温纹波抑制电路(增加钽电容阵列与低温补偿算法), 使失锁率降至零, 最终实现全温域内控制指令无异常。

2) 运输振动环境考核:

测试仪在 $20 \sim 2\,000\text{ Hz}$ 宽频随机振动(功率谱密度 $0.04\text{ g}^2/\text{Hz}$) 与 50 g 机械冲击的复合载荷下, 持续经受 6 小时考核, 模拟车载机动运输环境。经激光测振仪监测, 主控板经结构拓扑优化后谐振频率从 450 Hz 提升至 1 280 Hz, 有效避开了车载典型振动频段。软件层面, 通过动态阈值滤波算法对振动引发的信号毛刺进行抑制, 验证了软硬件协同抗振能力。

3) 240 小时持续通电考核:

对测试仪进行不间断通电测试。多通道同步时序误差在该工况下 $\leq 1.5\text{ ms}$ 。故障树分析(FTA)发现 DC/DC 模块热耦合引发的时钟漂移问题后, 通过增加热隔离槽与自适应锁相环(PLL)技术, 消除时序累积误差风险。

4) 电磁兼容强化测试:

依据 GJB151B-2013 标准, 在 10 V/m 场强的 $1.2 \sim 2.4\text{ GHz}$ 扫频干扰环境下, 测试仪 AD 采样系统信噪比(SNR)经电磁屏蔽优化后, 从 41 dB 显著提升至 60 dB, 满足军用装备抗强电磁脉冲要求。此外, 注入 $10\text{ kV}/8\text{ }\mu\text{s}$ 浪涌时, TVS 限幅电路与软件过载保护的协同机制可在 $200\text{ }\mu\text{s}$ 内触发熔断, 保障核心电路安全。

4.2 经济效益

1) 开发成本:

表 3 进口测试仪全生命周期成本(以 NI PXIe-8840 为例)

成本项	单价/费率	计算依据	5 年总成本
硬件采购	48 万元/台	含 PXIe-8840 控制器(22 万) + 高压采集模块(NI PXIe-4304×3, 8 万/个)	48 万元
软件授权费	12 万元/台	LabVIEW RT 模块(5 万) + FPGA 开发套件(7 万)	12 万元
年度维护费	硬件采购价的 15%	NI 官方维护合同(含硬件延保 + 软件升级)	$48 \times 15\% \times 5 = 36\text{ 万元}$
进口关税及物流	CIF 价格的 20%	关税(10%) + 增值税(13%) + 国际物流(货值 3%)	$(48 + 12) \times 20\% = 12\text{ 万元}$
合计	—	—	108 万元

表 4 国产化方案成本构成

成本项	单价/费率	技术实现	5 年总成本
硬件开发	15 万元 (一次性)	含高速 ADC 芯片+ 国产 FPGA(复旦微)	15 万元
软件研发	8 万元 (一次性)	基于 Qt 框架的测试软件 + 实时内核定制开发	8 万元
生产制造成本	7.8 万元/台	SMT 贴片(3.2 万)+ 精 密机加工(2.1 万)+ 线 束总成(2.5 万)	7.8 万元
年度维 护费	硬件成 本的 8%	国产供应链本地化服务	3 万元
合计	—	—	34 万元 (含 5 年维护)

2) 测试效率提升收益：

表 5 测试周期优化量化分析

测试阶段	原耗时 (进口设备)	优化后耗时 (国产设备)	技术措施
电源时序加载	2.1 小时	0.8 小时	多线程并行技术同步 速率从 1 kHz 提升至 5 kHz)
单次测试时常	0.4 小时	0.1 小时	引入多线程技术
数据回传	2.4 小时	0.3 小时	国产模组替代进口， 传输速率从 100 Mb- ps 提升至 1.2 Gbps

4.3 社会效益

1) 自主可控：

通过适配银河麒麟操作系统与国产龙芯处理器，形成了一套自主可控的技术体系，有助于保护国家信息安全，减少外部的技术封锁风险^[20]。

国产化进程推动了国内外软件生态的发展，促进了技术创新和产业升级。

2) 环保节能：

高效的多线程技术减少了系统资源的浪费，间接降低了能源消耗，符合绿色发展的理念。

5 结束语

综上所述，通过多线程动态调度与时序参数动态校准技术，解决了直列式电源测试仪的实时性、精度与自主可控难题，实现了国产化测试设备的工程化应用。实验数据表明，系统响应延迟<10 ms，测量误差≤±0.1 V，连续运行稳定性达 99.7%，显著优于传统方案。这一举措推动了国产操作系统与处理器的生态适配，提升国家安全信息水平，促进技术创新和产业升级。

参考文献：

[1] 王宽敏, 刘文怡. 基于 FPGA 的多通道高速信号同步采集系统 [J]. 仪表技术与传感器, 2025 (1): 79-84.

[2] 向明尚, 张志华, 潘丽艳. 基于 Qt 的多线程嵌入式系统设计与实现 [J]. 科技与创新, 2017 (4): 11-13.

[3] 彭晓飞, 李 杰, 张德彪, 等. 高精度国产 ADC 测试平台的设计与实现 [J]. 中国测试, 2022, 48 (8): 136-143.

[4] 宁金叶, 徐 谦, 罗小丽, 等. 基于国产化软硬件计算机的高可用集群软件设计 [J]. 电脑与信息技术, 2021, 29 (6): 37-40.

[5] 付志鹏, 冯 丹, 陈 红, 等. 基于国产服务器的国产 Linux 操作系统适配研究 [J]. 计算机技术与发展, 2022, 33 (4): 89-95.

[6] 罗吉瑛. 基于 Linux 的 PXIe 数字示波器软件设计 [D]. 成都: 电子科技大学, 2023.

[7] 刘丽霞, 刘志鹏, 张 力, 等. 银河麒麟系统下基于缓存队列的 CAN 驱动设计与实现 [J]. 计算机工程与设计, 2024, 45 (10): 3170-3176.

[8] 夏启兵, 李建平, 刘 鹏, 等. 国产操作系统航保应用软件开发实践 [C] //中国卫星导航定位协会, 2021: 129-131.

[9] 王浩宇. Linux 系统进程运行轨迹跟踪与性能统计程序设计 [J]. 科技与创新, 2023 (13): 66-68.

[10] 刘安战, 贾晓辉. 国产操作系统发展研究 [J]. 电脑知识与技术, 2024, 20 (35): 53-55.

[11] 孙好婕, 赵利强, 郑惠泽, 等. 基于 Qt 的集成电路测试软件设计与实现 [J]. 计算机测量与控制, 2021, 29 (5): 150-153.

[12] 陈兵兵. 国产平台嵌入式图形系统关键技术研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2022.

[13] 周志增, 宋林涛, 顾荣军, 等. 基于 Qt 的雷达数据处理软件开发与应用 [J]. 火控雷达技术, 2024, 53 (1): 87-91.

[14] 钟建华. 基于 Qt 的电路仿真软件开发 [D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2021.

[15] 向明尚, 张志华, 潘丽艳. 基于 Qt 的多线程嵌入式系统设计与实现 [J]. 科技与创新, 2017, (4): 11-13.

[16] 薛登峰. 基于多线程技术的综合指令系统的设计与实现 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2018.

[17] 赵静文, 付 岩, 吴 艳, 等. 多线程数据竞争检测技术研究综述 [J]. 计算机科学, 2022, 49 (6): 89-98.

[18] 金 昊. 仪器控制系统中多线程技术与应用 [J]. 机电国际市场, 2002, (3): 31-33.

[19] 杨 琪. 基于 QT 的超声波数据采集与成像系统的设计与实现 [D]. 武汉: 华中师范大学, 2019.

[20] 彭晓飞, 李 杰, 刘路扬, 等. 国产航天元器件自主可控应用验证方法研究 [J]. 计算机测量与控制, 2022, 30 (5): 268-273.