

# 高压开关电源自动测试系统设计

党世武, 童云, 李旭东, 宋哲, 唐煜,  
马培, 阮勇, 许林更

(中国工程物理研究院 电子工程研究所, 四川 绵阳 621999)

**摘要:** 针对当前高压开关电源电性能指标测试繁多、测试流程复杂、测试方法自动化程度低等问题, 采用分层次、模块化的设计方法, 设计了一款具有一体化、高效率、自检、自动测试、自动记录、统计分析和自动输出报表及超限报警等功能的高压开关电源自动测试平台; 该平台可以通过具有人机交互功能的软件测试界面配置测试参数和流程, 实现对多型号高压开关电源的一键式多流程测试; 实验证明, 该高压开关电源自动化测试平台满足三款高压开关电源产品规范所有的测试指标要求, 且测试平台可靠性高, 准确度好, 安全性高, 测试数据一致性高, 测试效率高, 相较于手动测试, 该高压开关电源自动测试平台将测试效率提高 42.4%。

**关键词:** 高压开关电源; 自动测试; 数据; 系统; 效率

## Automatic Testing System for High-Voltage Switching Power Supply

DANG Shiwu, TONG Yun, LI Xudong, SONG Zhe, TANG Yu,  
MA Pei, RUAN Yong, XU Lingeng

(Institute of Electronic Engineering, Chinese Academy of Engineering Physics, Mianyang 621999, China)

**Abstract:** The testing of high-voltage switching power supplies has shortages such as numerous electrical performance indicators tests, complex testing processes, and low level of testing automation. To address the above problems, a high-voltage switch power supply automatic testing platform is designed by using a hierarchical and modular approach. The platform has the functions of integration, high efficiency, self inspection, automatic testing, automatic recording, statistical analysis, automatic output of reports, and over limit alarm. This platform can configure testing parameters and processes through a software testing interface with human-computer interaction function, achieving one click multi process testing of multiple high-voltage switching power supplies. Experimental results show that the automatic testing platform for high-voltage switching power supplies meets all the testing requirements of three high-voltage switching power supply product specifications. The testing platform has the characteristics of high reliability, accuracy, safety, consistent testing data, and high testing efficiency. Compared with manual testing, the automatic testing platform for high-voltage switching power supplies improves the testing efficiency by 42.4%.

**Keywords:** high-voltage switching power supply; automatic testing; data; system; efficiency

## 0 引言

高压开关电源广泛应用于电力系统输配电、交流变频调速、供电电源、照明、电能质量的治理和控制、新能源发电技术、医疗、武器装备等领域<sup>[1-2]</sup>。随着电子信息技术的高速发展和高压电源技术的不断进步, 高压开关电源的种类越来越多、功能也越来越强大、集成化

程度也越来越高, 市场的需求量也持续增大<sup>[3-8]</sup>, 这对于高压开关电源的测试技术和测试效率提出了更高的要求<sup>[9]</sup>。

高压开关电源性能检测是高压开关电源研发、试验和生产过程中的重要环节, 为了准确高效地评价每个高压开关电源的性能, 确保其测试精度、稳定性及测试效率, 完善的测试方法和高精度、高效率的自动化测试系

收稿日期: 2024-09-03; 修回日期: 2024-11-11。

基金项目: 国家自然科学基金(12205263)。

作者简介: 党世武(1996-), 男, 助理工程师。

引用格式: 党世武, 童云, 李旭东, 等. 高压开关电源自动测试系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2025, 33(7): 64-71.

统是至关重要的<sup>[10]</sup>。文献 [11] 设计了一款适应于多品种小规模模式的开关电源自动测试系统,该测试系统基于 labview 设计,采用模块化、层次化设计方法,测试系统具有数据存储、查询、报表生成的功能<sup>[11]</sup>;文献 [12] 采用虚拟仪器技术,设计了一款可以实现对开关电源输入输出电压、稳定性能、保护性能等指标进行测试的自动测试系统<sup>[12]</sup>;文献 [13] 研究了针对不同特征参数的数字信号处理算法,设计了一款可以采集缓变信号、瞬态信号和纹波分量等参数的直流开关电源高精度检测系统<sup>[13]</sup>。这些测试系统都适用于定制化的产品中,不具有普适性。国内外学者对开关电源的自动化测试系统进行了较多研究,但是集中在高压开关电源自动测试系统方面的研究报道较少。相较于低压开关电源,高压开关电源测试系统在可靠性、安全性、稳定性等方面要求更高。

针对多型号、小批量、定制化的高压开关电源,测试方法和测试仪器都各不相同。目前,不同型号的高压开关电源主要通过搭建专用的测试电路,通过人工测试,每次测试需要手动设置测试仪器的参数,导致人工测试效率极低;每测试完一个高压开关电源还要手动进行高压端放电,如若测试人员忘记放电,还存在测试人员被高压电击的可能;测试数据需要人工记录,非常容易出现测试数据记录错误的情况,并且,手动记录的数据需上传到电脑存档,再次增加了原始数据出错的风险<sup>[14]</sup>。所以设计一款可以兼容多款型号高压开关电源的自动化测试系统具有重要的意义。针对此类问题,同时结合实际测试需求,设计了一款高可靠、高效率、多功能的高压开关电源自动测试系统,该测试系统通过开关组件电路和高压开关电源工装夹具测试电路进行级联设计,配合主控单元的高压开关电源测试软件,实现了高压开关电源时延调整端的组合逻辑切换控制和多款型号高压开关电源所有要求的电性能指标的测量。测试完成后测试数据会自动存档并自动判读,且高压端会自动完成放电。完全满足高压开关电源的测试需求,极大提高了效率,增加了测试人员的安全性<sup>[15]</sup>。

## 1 系统总体架构设计

### 1.1 测试系统功能要求

该自动化测试系统基于被测高压开关电源的外形尺寸和电性能指标要求,分别为其设计测试硬件电路和自动化测控软件,实现对多款高压开关电源的供电控制、输出信号采集、测试通道切换、放电控制等功能,从而设计出一个可以覆盖多款高压开关电源所有电性能测试指标要求的自动化测试平台<sup>[16]</sup>,根据高压开关电源的

测试指标和要求,该自动化测试平台应该具备以下功能:

- 1) 能够对高压开关电源的输出电压、稳态平均电流、延迟时间、极差、电压调整度、输出电压稳定性等指标进行测试和高精度采集;
- 2) 能够对测试数据进行自动判读;
- 3) 测试数据可以回读和保存;
- 4) 具备可扩展性,能够根据不同的测试要求,任意配置测试流程和测试指标;
- 5) 具有良好的人机交互界面,操作简便;
- 6) 具有语音播报功能,将测试过程通过语音播报
- 7) 具有自检和故障报警功能;
- 8) 测试夹具和各硬件模块连接接口采用防插错设计。

该测试系统是由高精度采集仪器、主控计算机、微控制器、测试夹具、测试软件组成的综合性测试系统<sup>[17-18]</sup>。

### 1.2 系统设计原理与组成

测试系统由机柜、示波器、程控直流稳压电源、数字多用表、信号源、放电装置、开关组件、测试附件、控制计算机、测试电缆和测试软件组成。测试系统架构采用分布式设计<sup>[19]</sup>,总体架构如图 1 所示,将其分为被测对象层、转接装置层、仪器平台层、网络交换层、系统主控层、人机交互控制层、测试应用软件层。仪器平台层的各仪器设备通过网络交换层与系统总控层连接,通过 TCP/IP 通信协议进行信息交互<sup>[20]</sup>。从而实现系统总控层对各仪器设备的统一控制。在系统的主控计算机上运行测试软件,执行测试流程,一次性完成高压开关电源电性能测试的数据采集、数据处理、数据存储、报告生成、性能曲线和性能考核全过程<sup>[21]</sup>。

被测对象层主要是自激式高压集成高压开关电源、他激式高压集成高压开关电源和集成解码高压开关电源等用户自主设计的或者定制的专用高压开关电源产品。

转接装置层主要由测试工装夹具、测试电路板、自动放电装置、测试盒和开关组件等组成。该层是连接被测高压开关电源和测试仪器的关键桥梁,保证了被测高压开关电源与测试系统的可靠机械连接和电气连接,配合测试仪器完成被测件的数据采集任务。同时是系统总控层实现时延时间控制的主要执行机构。

仪器平台层主要由国际先进的程控直流稳压电源、示波器、示波电流探头、示波高压探头、信号源、表类高压探头、数字万用表等高精度的仪器仪表组成,该层设备主要是为被测高压开关电源产品提供模拟的工作环境和试验测试环境并完成数据采集任务。

网络交换层由网络交换机和线缆组成,该层实现仪

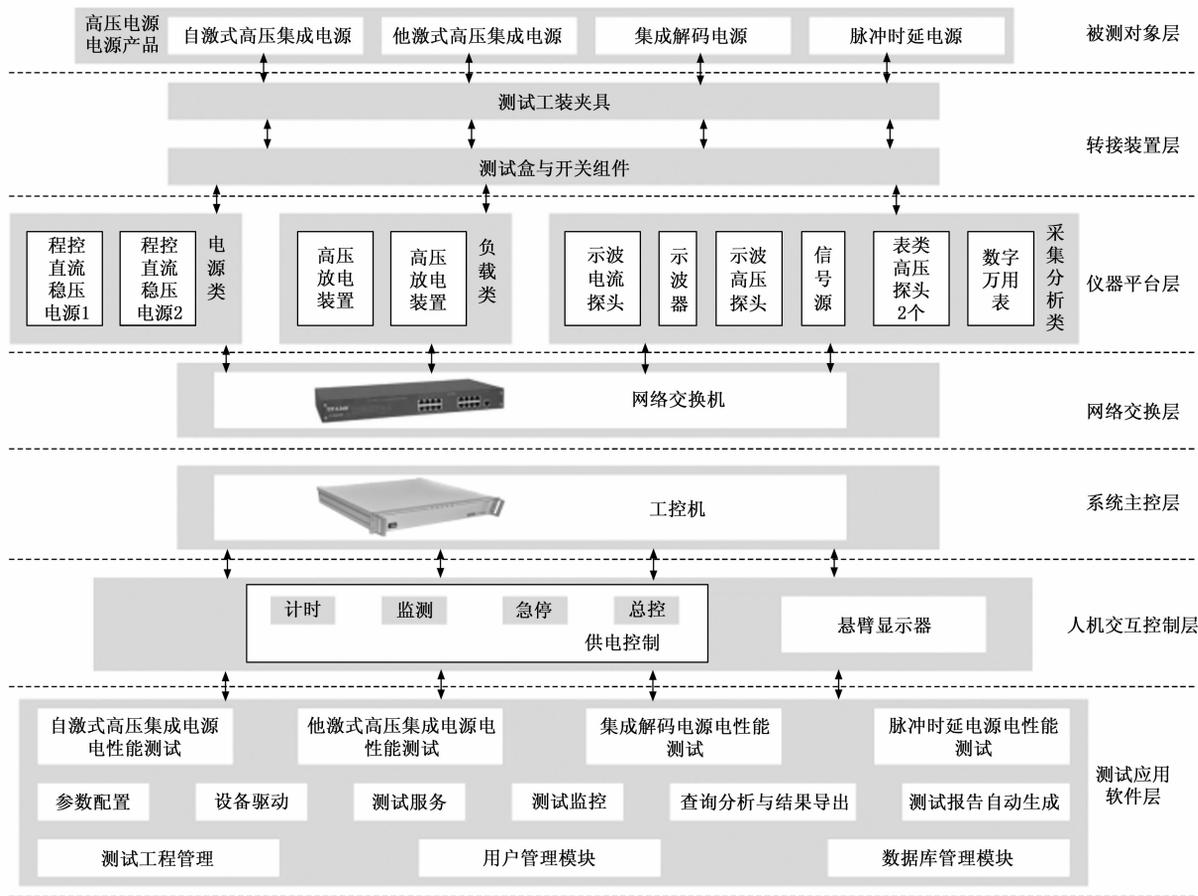


图 1 系统总体架构图

器平台层各类仪器设备与主控计算机的网络连接，从而实现仪器设备的统一控制，完成仪器平台层和主控计算机之间的数据传输。

系统主控层是整个高压开关电源测试系统的控制中枢，在主控计算机上运行操作系统环境、仪器驱动环境、应用软件环境、数据库环境和辅助工具软件环境。负责整个系统的逻辑控制、数据处理、数据采集控制、数据存储、生成测试报告、数据判读等功能。

人机交互层主要用于实现测试人员与高压开关电源测试平台的信息交互与控制，主要包括工作台面上的供电控制与监测、机柜侧板悬臂显示器，其中机柜内部配置视频切换矩阵（可灵活切换示波器或工控机显示界面）。

测试应用软件层主要是通过主控计算机控制仪器资源实现被测对象高压开关电源产品的激励加载和参数测试功能，主要功能包括他激式高压集成高压开关电源、自激式高压集成高压开关电源和集成解码高压开关电源等电性能参数指标的测试工作等，另外还有用户管理模块、测试工程管理模块、配置管理模块、数据库管理模块、设备驱动、参数配置、测试监控模块、查询分析与

结果导出模块、测试报告自动生成模块等。

控制计算机通过 TCP/IP 协议向直流稳压电源传输指令，按照测试流程使其分别输出直流电压，该电压作用到被测试件的电压输入端。测试后的输出数据通过示波器和数字万用表显示，再通过 TCP/IP 协议向控制计算机传输测试仪器显示的测试数据。测试数据会自动存储在控制计算机中。选择测试电路板上不同的测试通道，可以进行不同型号的高压开关电源的测试。

## 2 系统硬件设计

系统硬件是高压开关电源自动化测试功能实现的基础，根据高压开关电源的输出电压能力、电压调整度等要求，测试系统需要完成高压开关电源的输出电压、稳态平均电流、充电时间等电性能参数的测试。根据不同型号的测试需求，分别为其设计了测试原理图，其中 I 型高压开关电源的外围测试原理图如图 2 所示，图中 DUT 为该型号被测开关电源模块。依照测试原理图进行自动化测试系统硬件电路搭建。为了使得测试系统操作方便、安全可靠、覆盖率高<sup>[22]</sup>，为本测试系统设计了可以兼容三款高压开关电源的测试盒。测试电路板按

照高压开关电源的型号设计了 3 个测试通道, 每个测试通道相互独立互不干扰。这些硬件电路与高精度的仪器设备共同作用, 完成高压开关电源所有电性能指标的测试。

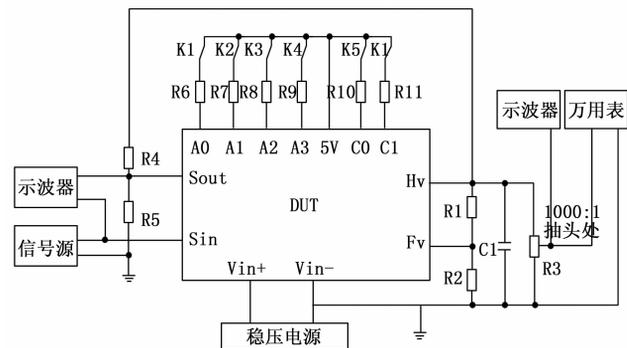


图 2 I 型高压开关电源测试原理图

### 2.1 测试盒设计

目前所用的三款高压开关电源的测试指标和指标合格范围各不相同, 所以为每一款高压开关电源分别设计了测试电路, 同时为其设计了相匹配的测试工装夹具, 将三款电路集成在同一个测试盒中。测试时, 只需将机柜中仪器的输出信号电缆和监测信号电缆插接到对应的工装夹具接口即可。如图 3 为测试盒组成框图, 测试盒由电源输入端、控制端、电压监测端、信号监测端、高压泄放端、被测组件放置区和组件外围电路组成。直流稳压电源通过电源输入端接入到测试盒, 为被测件提供稳定的高压电源。控制端接信号源和开关组件, 为被测高压开关电源提供触发信号以及控制高压开关电源的时间参数。电压监测端连接万用表, 通过高精度万用表实现对被测件电压信号的实时监测。信号监测端连接示波器, 通过高性能示波器实现对被测件时延时间参数、峰

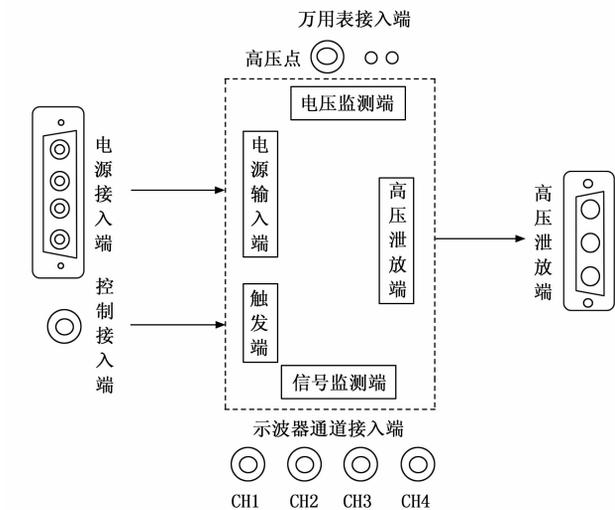


图 3 测试盒组成框图

值电流和充电时间等工作特性信号的监测。被测件通过高压泄放端与放电装置直接连接, 完成测试过程中的高压放电工作。测试工装夹具依据被测件机械尺寸、电气接口类型等参设计的放置区域以实现被测件与测试系统的快捷可靠连接。

### 2.2 开关组件模块

由于高压开关电源的选通端的逻辑组合不同, 则输出的时间参数不同, 所以为了实现高压开关电源时间参数的任意组合控制, 设计了一个由继电器矩阵组成的开关组件模块, 开关组件组成框图如图 4 所示。该模块的输入端通过 LAN 控制接口连接到网络控制层, 开关组件的输出端通过测试盒的控制接入端与高压开关电源的时延参数选通端相连, 在工控机中设计测试软件可任意编辑开关组件模块中 6 个开关的组合状态, 从而改变高压开关电源的时间参数。其中开关组件的状态也可以通过 LAN 控制接口传输到上位机测试软件中, 实现其开关状态在线监控的功能。

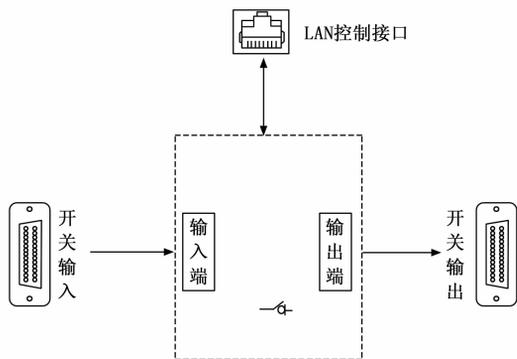


图 4 开关组件组成框图

### 2.3 放电装置设计

高压开关电源的测试过程中, 要多次进行充放电, 手动放电效率低, 测试过程中高压开关电源的输出电压高达到几千伏, 测试电路裸露在外面会存在人员被电击的风险, 同时测试过程中如果检测人员误操作作用放电棒将电路高压端直接对地, 还可能损坏被测高压开关电源。所以, 为了测试人员和被测件的安全性, 同时为了提高测试效率, 设计了自动放电模块, 放电装置的组成框图如图 5 所示。放电装置的高压泄放接入端连接到测试回路的高压端, 为该模块配置了一个 2 通道的控制模块, 该模块通过 LAN 控制接口与主控模块相连, 通过软件设计实现对放电装置的控制。在测试流程结束后具备选择“自动放电”或“不自动放电”的功能。同时对于“自动放电模式”, 可通过 LAN 接口自动设定放电装置中不同放电模式, 以区别不同“放电时间”的时长。放电模式采用三级放电程序, 第一级 5 MΩ (5 W) 对地放电模式、第 2 级 100 KΩ (5 W) 对地放电模式、

第三极直接对地短路模式。同时该模块还支持被测组件通道选择, 时序关系设置。

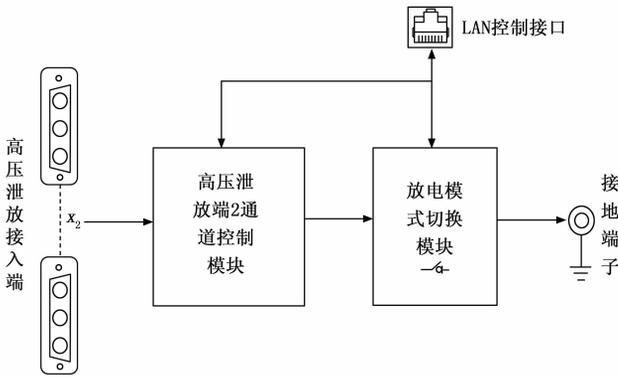


图 5 放电装置组成框图

### 3 系统软件设计

自动测试系统软件是以硬件平台为基础, 在主控计算机上用 C++ 语言开发的一种多功能的自动化测试软件, 系统软件是整个自动测试系统的核心, 它完成被测高压开关电源的所有电性能参数的测试, 生成测试结果及分析测试数据等。测试系统的功能都是通过软件设计实现的, 其充分利用了 Windows 操作平台提供的图形界面、同步、异步通讯、多进程、多线程等特性, 将动态数据与静态数据融为一体, 实时分析测试数据, 对测试数据进行实时保护, 能有效避免断电或其他原因引起的数据丢失; 同时设计的人机交互界面友善, 操作便捷, 操作指令执行可靠。

如图 6 为该高压开关电源自动化测试系统检验操作流程。首先, 进行系统自检, 系统自检是对系统的硬件连接情况和设备的工作状态进行检查, 如果自检成功, 则表示程控电源、数字多用表、示波器、放电装置等设备间成功连接, 并能与测试软件正常通信, 各测试设备都能正常工作。如果自检失败, 则需要根据自检报错提示项, 对设备和连接情况进行检查。自检完成后, 在软件中选择该试验件的测试流程。测试过程中如果有检测项超过合格范围, 系统会主动报警, 提醒测试人员, 如果测试人员忽略不合格项, 测试流程会继续执行, 如果测试人员强制终止, 测试流程会立即结束, 且测试硬件会重新刷新并为下次测试做好准备。所有测试项目完成后, 软件会自动生成测试报告, 并且在测试报表中会对测试结果进行合格判定, 对不合格项会自动标红并说明。

整个软件测试平台采用模块化设计。主要由测试监控软件、数据库和测试服务软件 Server 组成。测试监控软件是整个软件系统的核心。测试监控软件执行测试

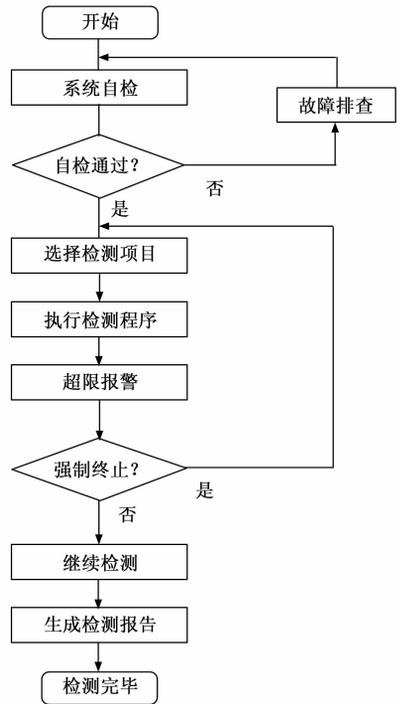


图 6 高压开关电源自动化测试系统检验操作流程

人员的操作指令, 完成所有的测试流程和测试任务, 并显示测试结果。数据库是测试软件的基础, 所有的测试数据、检测起止时间、操作日志、运行日志都存储在数据库中。测试服务软件接收测试人员的测试命令, 并通过程序将命令传送给测试监控软件。测试监控软件由内核、界面框架及辅助功能模块组成。内核包含测试工程、Monitor、ICD引擎和监显插件。界面框架包括工作窗口、ICD树、插件图标以及输出窗口等。辅助功能包括满足测试的辅助工具, 如打印功能、日志审计、数据回放等。如图 7 为测试监控软件层次结构图。Br-Monitor 为测试监控软件完成网络通讯和数据调度, 是测试监控软件和数据库之间数据传输的桥梁。如图 8 为测试监控软件架构图。

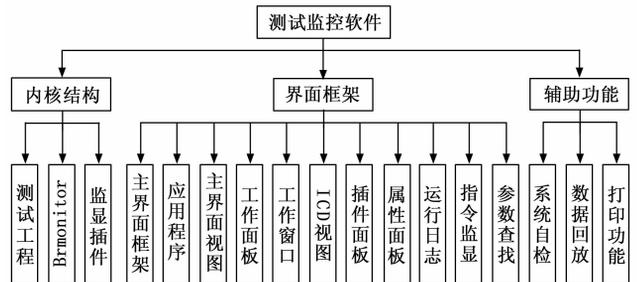


图 7 测试监控软件层次结构图

为了提高运行速度和效率, 整个测试软件采用多线程技术<sup>[23]</sup>。在程序运行的过程中多个线程任务并行执



计、监控信号配置等操作。在指令执行过程显示窗口显示本次测试项目中所有指令的执行过程，如果某条指令执行异常，则会在执行结果栏标红警示。测试过程中示波器、数字多用表等采集的测试数据会传输到测试软件中，软件将采集的测试结果以曲线的形式直观地显示出来。系统硬件的运行过程和运行状态会在程序运行日志中显示出来。在测试软件中将该项目测试流程配置好后，开始对该试验件进行检测以验证测试系统的功能。

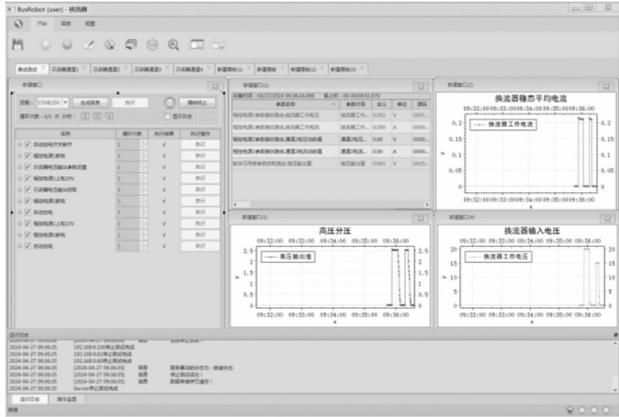


图 10 高压开关电源自动化测试平台软件操作主界面

用该高压开关电源自动化测试平台先后对三款不同型号的试验件分别进行了测试，测试结果表明这 3 个型号高压开关电源生成的检测报表包含了所有的要求的测试指标。选取一只Ⅲ型高压电源进行测试功能验证，其测试结果如表 1 所示。

表 1 Ⅲ型高压电源测试结果

序号	测试指标	标称值	测试结果	误差
1	15 V 输出电压	2.51	2.511	0.01
2	20 V 输出电压	2.51	2.512	0.01
3	30 V 输出电压	2.51	2.513	0.02
4	15 V 稳态平均电流	0.21	0.21	0
5	20 V 稳态平均电流	0.21	0.21	0
6	30 V 稳态平均电流	0.21	0.21	0
7	延迟时间平均值	0.50	0.501	0.01
8	极差	2	2	0
9	输出电压稳定性	0.05	0.04	0.01
10	充电时间	0.25	0.249	0.001

所以该高压开关电源自动化测试系统完全满足这三款高压开关电源的所有电性能指标的测试需求。测试报表如图 11 所示，测试软件会对采集的测试数据进行分析，判断该产品是否合格，对不合格的产品会标红警示。并且测试结果的采集曲线也可以通过测试报表展开查看。

为了验证该自动化测试系统的可靠性，对同一批 I 型高压开关电源的全部指标分别进行了手动和自动测

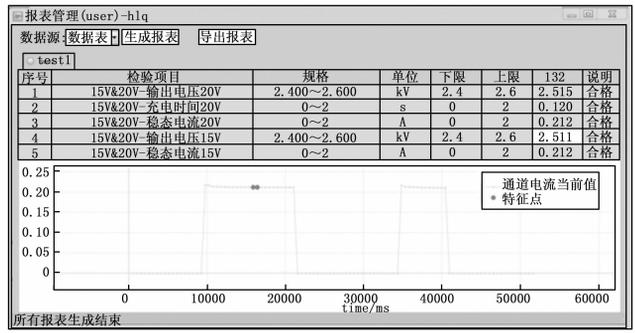


图 11 I 型高压开关电源测试报表

试，分析自动测试平台的可靠性。本次测试随机选取了 30 只 I 型高压开关电源，分别采用手动和自动的方法对该高压开关电源的电性能进行全指标覆盖性测试。每只高压开关电源用两种方法分别进行了 3 次测试，取 3 次测试结果的平均值对手动和自动测试进行对比，如图为 30 只高压开关电源全指标自动和手动测试结果对比图。由图 12 和图 13 可以看出，这 30 只高压开关电源的手动测试和自动测试的测试数据都在标称值附近波动。自动测试数据的平均值和标准差都比手动测试小，数据波动性更小。自动测试在同一时间内采集的数据多，平均值和标准差更能反映测量结果。所以该高压开关电源自动化测试系统测试结果准确性好、可靠性高，符合产品规范的所有测试要求。此外，对 100 只 I 型高压开关电源分别进行了手动和自动测试，统计两种测试方式所用的测试时间，同一检验员采用不同的测试方法花费的时间为：手动 1 250 分钟、自动 720 分钟，所以较传统的手动测试，自动测试将测试效率提高了 42.4%。

表 2 手动和自动测试数据对比

测试方法	20 V 电压 平均值	15 V 电流 平均值	20 V 电压 标准差	15 V 电流 标准差
手动	2.511 1	0.209 8	0.002 51	0.002 18
自动	2.510 5	0.209 7	0.001 25	0.001 17

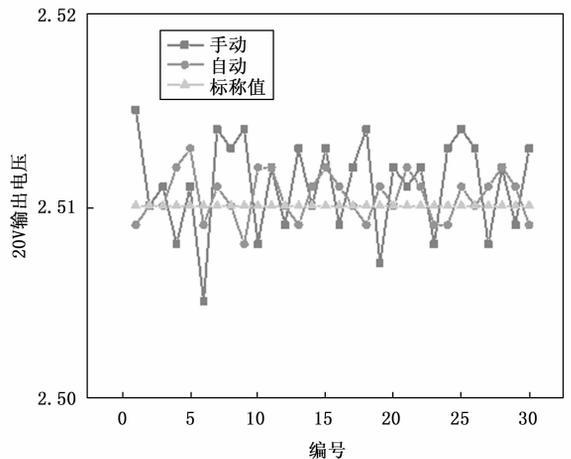


图 12 20 V 输出电压手动与自动测试结果对比图

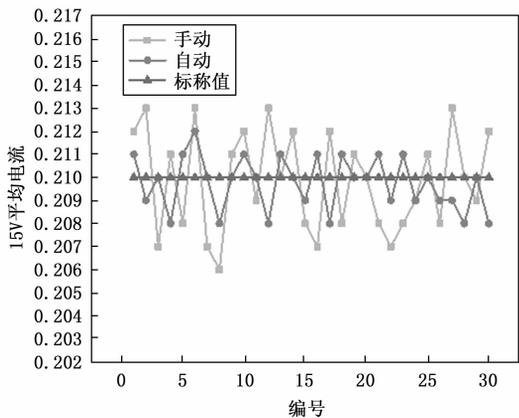


图13 15 V平均电流手动与自动测试结果对比图

## 5 结束语

为了提高测试效率,增加测试过程的安全性和测试方法的可靠性,采用模块化的理念,通过对系统进行硬件设计和软件设计,成功研制了一款适用于多款型号高压开关电源的自动化测试平台,该测试平台操作方便、安全可靠、配置灵活,检验员在测试软件中可以根据测试需求,任意搭配测试指令,完成多款高压开关电源任一阶段的所有测试指标要求,且该系统具备自动存储测试数据、自动生成测试报表、超限报警、语音播报等功能。通过对I型高压开关电源的测试验证表明,该款高压开关电源自动化测试系统测试结果准确性好、可靠性高,并且采用该系统进行自动测试可将测试效率提高42.4%。

### 参考文献:

[1] 雷鑫,高成,李嘉,等. DC-DC电源模块寿命评估技术综述[J]. 电源技术,2022,46(3):240-246.

[2] 李演明,邵丽丽,贾亚飞,等. 一种Buck型DC-DC电源模块并联供电系统设计[J]. 电源技术,2013,37(8):1431-1434.

[3] 丛恩佳. 固态小型高压电源的设计[D]. 沈阳:沈阳师范大学,2018.

[4] 袁昕. 高压开关电源关键技术研究与设计[D]. 西安:西安电子科技大学,2023.

[5] CHEN J, LIU C, LIU H, et al. Zero-voltage switching full-bridge high voltage switching power supply with reduced filter requirement and wide ZVS range for variable output application[J]. IEEE Trans. Ind. Electron., 2022, 69(7): 6805-6816.

[6] 高士喜. 开关电源的工作原理及技术趋势探索[J]. 中国新技术新产品,2020,(11):40-42.

[7] 宋健,宋平,靳言. 用于电力系统电气设备过压检

测的高压电源研究[J]. 机电信息,2024,(10):12-15.

[8] ARDANA I W R, WIRANATA L F, PURNAMA I B I. Simulation and implementation PID controlling buck high voltage switching power supply DC[J]. Journal of Computer Science and Technology Studies, 2021, 3(2): 72-81.

[9] 保兴润,刘一杉. 单片DC/DC转换器批量测试技术研究[J]. 电子测量技术,2020,43(20):47-52.

[10] 马程,阎燕山,刘春冉. DC-DC电源模块通用测试方法设计[J]. 计算机与数字工程,2021,49(4):625-629.

[11] 张文忠,褚洪喜,刘晓莉,等. 基于labview开关电源生产线自动测试系统的实现[C]//天津市电子工业协会,天津市电子工业协会2021年年会论文集. 天津光电惠高电子有限公司,2021:4.

[12] 周磊. 基于LabVIEW的开关电源自动测试系统设计[D]. 淮北:淮北师范大学,2021.

[13] 张翔. 直流开关电源高精度检测系统的设计与实现[D]. 北京:北京交通大学,2021.

[14] 陈岑. 开关电源测试性设计与故障诊断研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2019.

[15] 郭壮壮,武梦龙. 基于虚拟仪器的自动测试系统设计[J]. 计算机测量与控制,2018,26(12):30-33.

[16] 周律,朱金龙,周昱明,等. 基于虚拟仪器的电子镇流器自动化测试系统[J]. 电源技术,2015,39(6):1302-1304.

[17] 赵海涛,张平峰,陈余,等. 通用化测试系统的设计与实现[J]. 电气应用,2020,39(8):78-82.

[18] 吴文君,于汇琳. 基于LabVIEW的多路高压电源自动化测试系统[J]. 真空电子技术,2024(2):106-110.

[19] 杨璞杰,商龙. 基于分布式架构的综合化航电系统测试平台设计:第二届中国航空测控技术年会[C]//西安,2023.

[20] 钟泽宇,吴可,吴秋轩,等. 通用化多功能微飞轮测试系统的设计与实现[J]. 测控技术,2023,42(9):12-23.

[21] 李彦成. 微飞轮自动测试系统设计与实现[D]. 杭州:杭州电子科技大学,2020.

[22] 何章强. 功率驱动芯片的自动测试系统设计[D]. 南京:东南大学,2019.

[23] 吴传贵,陈海牛,黄明俊,等. 基于多线程技术的1553B总线测试系统的设计与实现[J]. 测控技术,2012,31(10):85-87.

[24] 齐善鲁,范宝德. 多线程可视化数据处理方法设计及应用[J]. 计算机与数字工程,2023,51(11):2541-2545.