

# 阴极自动测试系统的设计与实现

王泓涵, 黄桃, 宫大鹏, 李斌

电子科技大学, 微波电真空器件国家级重点实验室, 四川 成都  
Email: 764248383@qq.com

收稿日期: 2020年10月19日; 录用日期: 2021年1月20日; 发布日期: 2021年1月29日

---

## 摘要

本文介绍了阴极自动测试系统的设计与实现, 阐述了系统的总体设计。考虑架构和软硬件模块之间的相互关系; 然后详细介绍了测试系统的功能和实现方法, 给出了相应的结果。最后说明了现有系统的不足之处, 并对后续工作安排进行了规划。

## 关键词

阴极, 自动测试系统, C++/Qt

---

# Design and Implementation of the Cathode Automatic Testing System

Honghan Wang, Tao Huang, Dapeng Gong, Bin Li

National Key Laboratory of Science and Technology on Vacuum Electronics, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu Sichuan  
Email: 764248383@qq.com

Received: Oct. 19<sup>th</sup>, 2020; accepted: Jan. 20<sup>th</sup>, 2021; published: Jan. 29<sup>th</sup>, 2021

---

## Abstract

This paper introduces the design and implementation of the cathode automatic test system, and expounds the overall design of the system. Consider the interrelationships between architecture and hardware and software modules; then the function and implementation method of the test system are introduced in detail and the corresponding results are given. Finally, the deficiency of the existing system is explained, and the follow-up work arrangement is planned.

## Keywords

Cathode, ATS (Automatic Test System), C++/Qt

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

作为行波管、速调管、磁控管、回旋管中的核心器件，热阴极被广泛地应用于各种高功率微波器件中，特别是在卫星雷达等军用设备中，应用更是日趋成熟，因此热阴极的发展已成为国防装备的关键技术[1] [2]。阴极作为大功率真空器件的核心，为满足各类器件的要求而不断更新发展，从最早的纯金属阴极到目前广泛应用的各类扩散阴极。

在电真空器件制造行业，阴极质量的优劣，很大程度上决定电真空器件的性能，因此，阴极性能的精确测试对提高电真空器件质量是十分重要。为评估性能，阴极必须安装在一定的测试载体中，目前广泛采用的测试载体通常有两种，一种是专用电子枪，需要较复杂的测试系统，测试成本较高，实施起来有一定难度；另一种常用的测试载体即常说的水冷阳极二极管，结构简单，测试系统容易搭建，较容易实现，在实际研究工作依然得到了广泛应用[3]。长期以来，阴极发射特性都是采用手动测量来完成的，手动测量不但误差大，而且有很大的局限性[4]。目前主要存在以下几个问题：1、测试过程和测试结果数据记录零散，无法系统地记录和分析测得的数据；2、测试时间、测试温度及真空度等外界因素的不稳定会干扰测试的最终结果。测试人员操作技能参差不齐、参数读取方式不确定等都严重影响了行波管的参数测量精度和准确度；3、阴极测试项目众多，完成完整的阴极测试需要众多步骤，耗费很多时间。因此，采用高自动化的，高精度的测量方法才能更好的满足我们测试生产的需要。

## 2. 系统功能及总体设计

### 2.1. 系统功能介绍

阴极自动测试系统将用于水冷二极管的加热，可以实现的功能包括直流测试阴极伏安特性、脉冲测试阴极伏安特性、阴极欠热特性测试、应急断灯丝测试。

同时阴极自动测试系统可以对测试得到的原始数据进行分析处理，得到阴极伏安特性曲线、电流对电压一次微分曲线、阴极双对数曲线、阴极零场发射电流特性曲线、阴极欠热特性曲线、理查森曲线、二次微分曲线、Miram 曲线以及有效功函数 PWFD 曲线并绘制在软件界面中。并且可以对分析曲线作线性拟合，通过控件调整线性拟合线的斜率和截距，并进行取点。

对于测试的信息和原始数据，可通过 XML 格式进行标准格式存储，也可以报表输出为 Excel, Word 和 PDF 格式。

### 2.2. 总体设计

阴极自动测试系统主要由直流电源，脉冲电源和灯丝电源三个电源和一台工控机(计算机)构成。有外接阴极的接口设备，可直接连接被测阴极。

工控机既可直接在本地直接控制电源和获取测量数据并分析，也可以通过网线实现远程操作。

电源的通断由计算机直接控制，同时阴极上可得到的初始测试数据也通过数据采集模块采集回计算机。测试和分析功能设计在同一软件中。如图 1 是阴极自动测试系统的总体设计图。

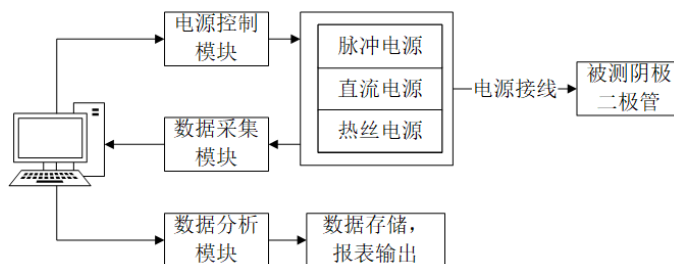


Figure 1. General design figure  
图 1. 总体设计图

### 3. 系统详细设计

阴极自动测试系统主要由软件和硬件两大部分组成，接下来我将着重从这两方面详细介绍系统的设计。

#### 3.1. 硬件系统结构

如图 2 电源分为直流电源、脉冲电源和热丝电源。被测阴极可以通过控制开关的开合选择工作的电压状态为直流电源或者脉冲电源。计算机可以直接控制各个电源对阴极或灯丝供电的电压大小，可以以一定步长逐步加压，以得到一系列数据，方便分析处理。红外测温仪用于测量阴极温度。各器件的电参数数据通过采样采集进计算机，计算机对采到的数据进行分析处理得到最终所需要的结果。

测试工作台配备的工控机可在本地直接进行软件操作以完成测试和数据分析功能。同时，也可以通过网络接口通过远程计算机进行操作控制。

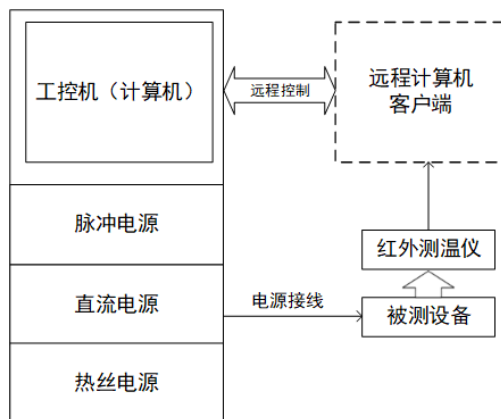


Figure 2. System structure figure  
图 2. 系统结构图

#### 3.2. 开发环境

我们所用的开发工具主要为 C++和 Qt。

C++中提供了大量的函数其中包括系统生成的函数和用户定义的函数。 C++编译器自带的头文件，其中包括可用于开发程序的许多基本功能列表。同时，程序员还可以创建功能，按他们的要求被称为用

户生成/定义的函数。在此次的工程中，需要用到很多复杂的数学计算和分析，C++提供的大量函数和用于自定义函数的优势对我们的开发提供了很大的帮助。

而 Qt 作为 GUI 设计工具，拥有优良的跨平台特性、面向对象、丰富的 API 等诸多优。Qt 提供了信号槽机制，可以很好的降低耦合，提升代码的复用性。

此软件的开发环境是 VS2015+Qt5.12。我们的工控机的操作系统是 Windows，VS 是 Windows 下的标准 IDE。功能强大齐全，操作界面舒服，流畅。

### 3.3. 程序设计

该软件主要包含三个部分：工程文件、测试控制以及分析展示部分。工程文件所包含的主要内容如图 3。

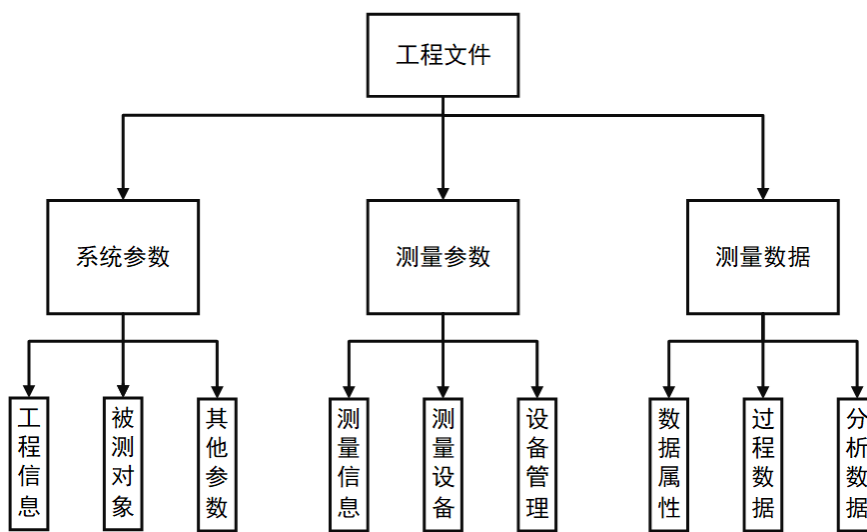


Figure 3. Contents of engineering documents.

图 3. 工程文件所包含内容

每一项所包含的具体的内容见表 1。

Table 1. Specific information on the contents of engineering documents.

表 1. 工程文件内容具体信息

| 工程文件内容 | 所包括的具体信息                 |
|--------|--------------------------|
| 工程信息   | 测试时间，测试人等；               |
| 被测对象   | 管号，阴极类型，阴极面积，极间距离等；      |
| 其他参数   | 软件版本号等；                  |
| 测试信息   | 测试要求，伏安特性，欠热特性，测试方法选择等；  |
| 测试设备   | 脉冲重频、脉宽、占空比等；            |
| 设备管理   | 红外测温仪，直流电源，脉冲电源，灯丝电源信息等； |
| 数据属性   | 数据单位，有效位数设置等；            |
| 过程数据   | 电压步长，下降百分比，起始电压，终止电压等；   |
| 分析数据   | 特性曲线选择，统计处理等；            |

如图 4 软件的程序流程框图。

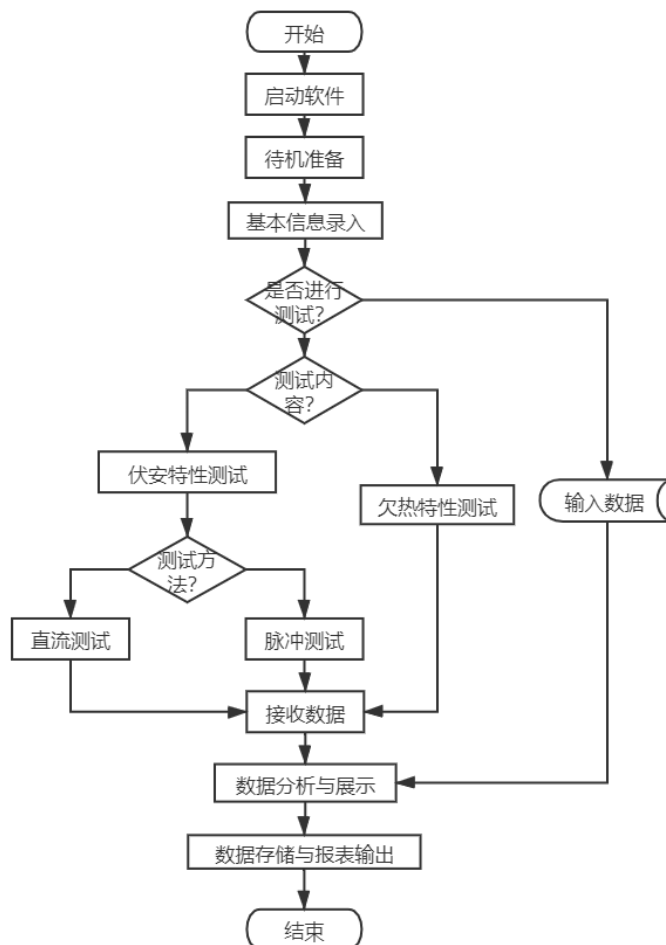


Figure 4. Program flowchart  
图 4. 程序流程框图

启动软件后会默认进入待机准备状态，随后用户可根据自己的需求，选择是否需要测试或者直接手动录入数据。选择测试内容和测试方法后，进入到后台测试控制部分。测试控制是用于后台控制电源的部分。测试控制部分在接收到指令以后，会依照对应的测试方法，控制各电源加压的顺序和大小，控制不同的变量，控制自变量的变化的程度和速度等，同时，也会将电压电流等数据，反馈给工控机。以便结果分析展示。

工程文件中可选择在展示区展示各种曲线，所有经过处理得到的曲线可以单独显示，也可以多条曲线展示在同一坐标轴下，以方便进行观察和分析。同时，还可以在曲线上做手动的调整，比如选择显示拐点坐标或斜率；控制曲线平移等功能。

### 3.4. 软件界面

阴极自动测试系统的软件界面是基于 Qt 来编程实现的。用户界面采取开门见山的直接设计，减少测试人员在测试生产中的学习成本，直观便捷。测试软件主界面只有一个，为了容纳大量不同测试项目的参数设置需要，软件采用弹出对话框的形式，为用户提供设置相关参数的途径。

如图 5~图 9 为测试系统界面。

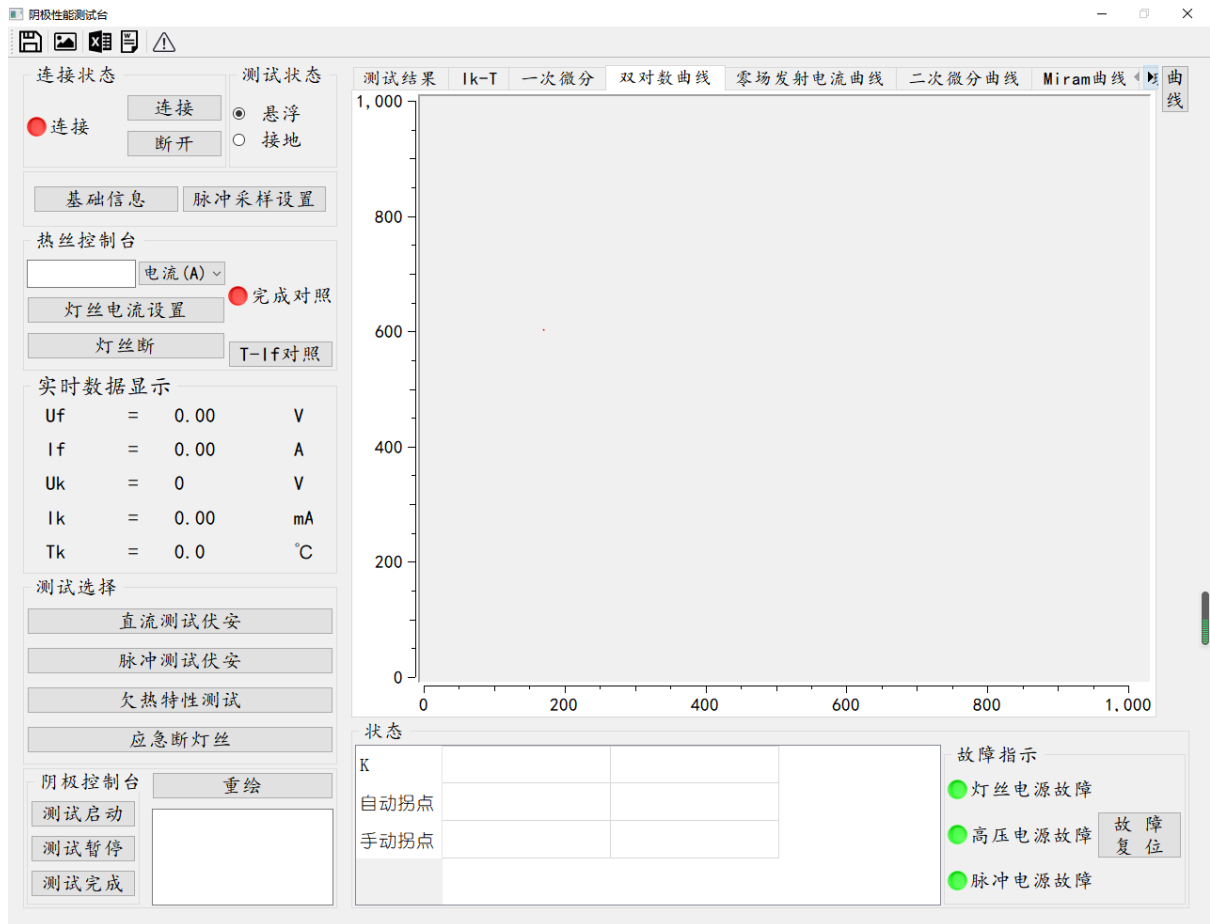


Figure 5. Main interface of test software.  
图 5. 测试软件主界面



Figure 6. U-I characteristics of AC test  
图 6. 脉冲测试伏安特性

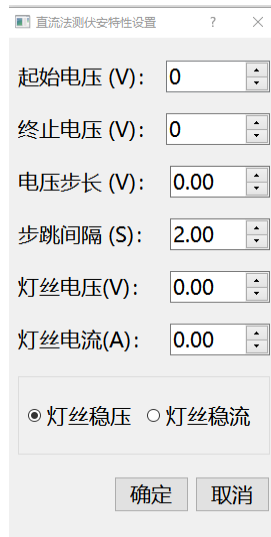


Figure 7. U<sub>I</sub> characteristics of DC test  
图 7. 直流测试伏安特性

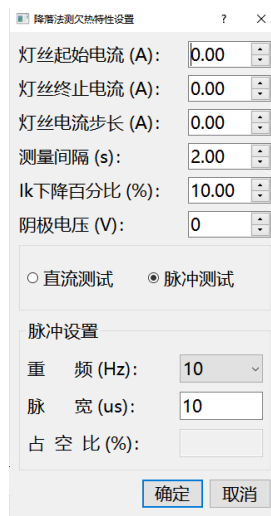


Figure 8. Underheating characteristics  
图 8. 欠热特性



Figure 9. Characteristics of filament breaking  
图 9. 应急断灯丝特性

### 3.5. 数据存储

如图 10 阴极自动测试系统的测试数据, 测试信息, 测试数据以及分析数据等将会一定的模板以 XML 的文件格式存储在本地。

```

*20200916.xml - 记事本
文件(F) 编辑(E) 格式(O) 查看(V) 帮助(H)
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8" ?>
<Model>model</Model>
<Area>1.</Area>
<Testtime>testtime</Testtime>
<Teststaff>teststaff</Teststaff>
<Number>number</Number>
<Distance>0.</Distance>
<Ik-Uk size="60">
  <Voltemmetric>
    <Uk0>50.</Uk0>
    <Uk1>100.</Uk1>
    <Uk2>150.</Uk2>
    <Uk3>200.</Uk3>
    <Uk4>250.</Uk4>
  </Voltemmetric>
  <Current>
    <Ik0>40.</Ik0>
    <Ik1>80.</Ik1>
    <Ik2>120.</Ik2>
    <Ik3>160.</Ik3>
    <Ik4>200.</Ik4>
    <Ik5>240.</Ik5>
  </Current>
</Ik-Uk>
<Inflection_x_lg>301.77</Inflection_x_lg>
<Inflection_y_lg>0.2384</Inflection_y_lg>
<Inflection_ax_lg>2500.</Inflection_ax_lg>
<Inflection_ay_lg>2.</Inflection_ay_lg>
<Inflection_x_ik>970.3</Inflection_x_ik>
<Inflection_y_ik>0.95278</Inflection_y_ik>
<Inflection_ax_ik>3000.</Inflection_ax_ik>
<Inflection_ay_ik>2.4</Inflection_ay_ik>
<Grad_lg>0.99</Grad_lg>
<b_lg>-8.291e-002</b_lg>
<Grad_ik>1.6488e-002</Grad_ik>
<b_ik>2.4723</b_ik>
<Standardk>1.</Standardk>
<Standardb>0.</Standardb>

```

Figure 10. Data storage format

图 10. 数据存储格式

## 4. 总结

目前该系统已经基本研制完成, 各项功能均能够实现, 现在正在测试中。目前系统仍存在一些不足之处: 1、硬件电源的实际电参数值与软件获取到的数据存在一定程度的偏差, 在高精度要求的测试中还有待提升的空间; 2、用户界面的交互设计还有改善的空间; 3、软件在运行过程中, 会有较小概率会出现一些未知原因的 BUG, 且软件加载速度较慢。

下一步, 将针对上述的几个问题, 对阴极自动测试系统的软硬件部分做进一步的修正和完善。

## 参考文献

- [1] 廖复疆. 大功率微波真空电子学技术进展[J]. 电子学报, 2006(3): 513-516.
- [2] Liu, Y.W., Tian, H., Han, Y., Xu, Z.Y. and Zhang, H.L. (2008) Temperature Variation of a Thermionic Cathode during Electron Emission. *Science in China (Series E: Technological Sciences)*, **9**, 1497-1501.



<https://doi.org/10.1007/s11431-008-0161-2>

- [3] 于志强, 高玉娟. 阴极平板二极管测试状态分析[J]. 真空电子技术, 2009(5): 15-18.
- [4] 黎晓云, 鄢扬, 蒙林, 胡大容, 王曙光. 阴极发射特性及阴极活性自动测试系统[C]. 第八届真空技术应用学术年会论文集. 厦门, 2005: 95-97.