

# 地铁接触网阻抗测试及 短路仿真软件的研发

薛磊

(中铁一局集团电务工程有限公司)

**摘要：**地铁接触网整定计算时采样电流电压数据量庞大，运算过程复杂，无界面友好适配原 AD 采样器的测试软件，因此研发了地铁接触网阻抗测试及短路仿真软件，软件采用 WPF 框架开发，MVVM 架构，适配 Windows10 及以上版本操作系统，能够完成参数配置、线路阻抗计算、电流仿真、自动生成报告等主要功能。界面友好，能够显著提高运算效率。

**关键词：**地铁接触网；阻抗测试；短路电流仿真；MVVM 架构

2024.01.DQGY  
62

## 0 引言

整定计算是地铁接触网继电保护装置在遇到短路故障时能否及时有效地切断电源的关键。由于各地接触网的线索类型、长度、安装形式等条件差异大，造成估算的线路阻抗误差大，且计算过程复杂<sup>[1]</sup>，从而导致整定计算结果难以有效地指导继电保护整定。因此，研发了一种通过低压电源测试线路阻抗并能仿真地铁接触网整定计算的装置。

## 1 研究背景与意义

本装置采用低压电源进行短路试验，设计同步采样电路采样短路试验过程的电流电压，由基于牛顿迭代法的线路阻抗求解方法求解线路阻抗，进行短路电流仿真计算。由于短路试验采样的电流电压数据量庞大，阻抗计算时运算过程复杂，因此，开发了地铁接触网阻抗测试及短路仿真软件，能完成短路试验参数设定，地铁接触网的线路阻抗计算，基于双边供电模型的短路电流仿真，并能自动生成试验报告等功能。

## 2 硬件配置及软件功能分析

### 2.1 高速 AD 采样与传输技术

为了更好地对数据进行分析 and 传输，选用某厂家 DAQ-USB4010 型号的高速 AD 采样电路对电压电流信号进行同步采样。如图 1 所示，该高速 AD 采样电路具有以下优势：①可实现 8 通道 16 位数据的同步采样。②采样频率最高 200k，即采样周期最低为 5 $\mu$ s，采样精度高。③可支持 C#、Matlab、C++、Qt 等多种语言上位机界面编程。④可采用 USB 传输线实现采样数据的同步上传和下载。



图 1 双通道高速 AD 采样装置

选用高速 AD 采样电路的 0、1 采样通道连接到采样电路两端，同步采样地铁接触网短路试验过程的电压电流。其采样的数据样式如表 1 所示，采样周期为 5μs，采样点数为 10000 点。

表 1 采样数据样式

类别	1	2	3	...	n
通道 0	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	...	A <sub>n</sub>
通道 1	B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>	B <sub>3</sub>	...	B <sub>n</sub>

如表 1 所示，通道 0 采样数据为 A<sub>1</sub>~A<sub>n</sub>，通道 1 采样数据为 B<sub>1</sub>~B<sub>n</sub>，通道 0、1 采样的数据均必须在 0~10 之间。

$$0 \leq A_n \leq 10$$

$$0 \leq B_n \leq 10$$

因此，为了满足通道采样要求，在设计电路时

对电压电流值进行缩放处理，其缩放比例分别为 k<sub>0</sub>、k<sub>1</sub>，则有：

$$U_n = k_0 A_n$$

$$I_n = k_1 B_n$$

## 2.2 功能需求分析

综合考虑基本功能需求及考虑软硬件设备的情况，本软件应当具备的基本功能需求如表 2 所示，主要有采样参数配置、数据导入、数据处理、参数计算、结果展示、电流仿真、自动报告生成等功能。

## 2.3 软件的功能架构

软件功能架构图如图 2 所示，包括采样参数配置、线路阻抗计算、电流仿真、自动生成报告。采样参数的配置主要配置通道、模式、点数、周期、触发模式等信息，线路阻抗计算主要包括数据导入、数据处理、阻抗计算。电流仿真主要包括单边记录、

表 2 本软件的主要功能需求

序号	功能需求	功能介绍
1	采样参数配置	支持对不同型号的数据采集卡的采样参数如采样通道、采样模式、采样点数、数据保存位置、采集方式等参数配置，其中也支持用户保存自定义参数。
2	数据导入	支持将地铁接触网短路试验数据导入软件，文件格式支持 Excel 等常见格式。
3	数据处理	根据导入的数据进行数据清洗、数据预处理、数据分析、绘图展示等操作。
4	参数计算	通过计算和分析短路试验数据中的关键参数，如电压、电流等信息，得出相应的计算结果，如电阻、电感、时间常数、迭代系数等，并可进行导出和报表打印。
5	结果展示	支持直观的图表展示，以及对计算结果的解释和说明。
6	电流仿真	通过特定算法，仿真出采集数据的电流走向。
7	自动报告生成	支持自动将计算结果以及曲线图以特定的格式生成 Word 文档报告。

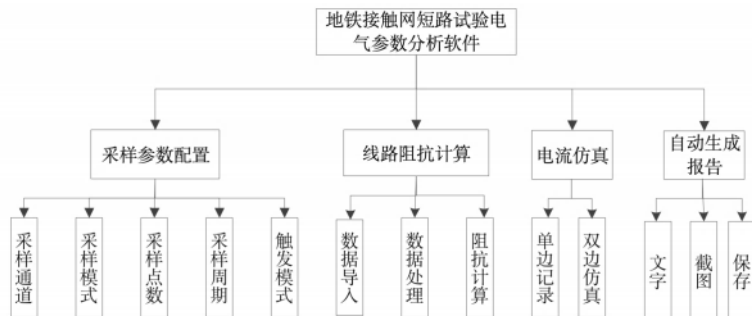


图 2 软件的功能架构图

双边仿真。自动生成报告有 Word 中保存文字和截图，自动保存 Word 文档等功能。

### 3 软件整体设计

#### 3.1 整体架构设计

软件采用 WPF 框架开发，实行 MVVM 架构。各模块分工明确，系统的开发、维护和迭代便捷。如图 3 所示，整个架构分为 Model 层、View 层、ViewModel 层。Model 层是原始数据层，负责为 ViewModel 层提供数据模型。View 层是数据展示层，负责将数据用特定的方式展示给用户。ViewModel 层是数据交互层，负责 View 层与 Model 层之间的数据交互。对 Model 层的数据做数据处理然后让 View 层进行展示，当用户对数据进行更改时，ViewModel 层对 Model 层进行相应的更改。

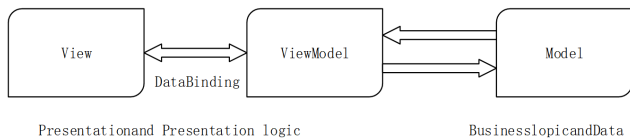


图 3 WPF 框架的 MVVM 架构

#### 3.2 逻辑功能的设计

逻辑控制流程图如图 4 所示，逻辑功能主要为：  
 ①参数配置：用户打开软件后，点击参数配置，开始连接设备，如果连接成功则进入配置参数，如果连接不成功，则返回继续配置。  
 ②采集数据：当参数配置完成后，开始短路试验，高速 AD 采样器采样数据，并将采样的数据保存到 xlsx、txt 的文件中。  
 ③阻抗计算：选择前面保存的数据文件，判定数据是否有效，然后数据处理，再通过曲线拟合进行阻抗计算。  
 ④电流仿真：将此次阻抗计算的结果记录，再进行判断，如果是记录的双边结果，则电流仿真，如果单边记录则继续选择文件。  
 ⑤生成数据报告：将阻抗计算结果及仿真结果写入 Word 文档中，并自动生成报告<sup>[2]</sup>。

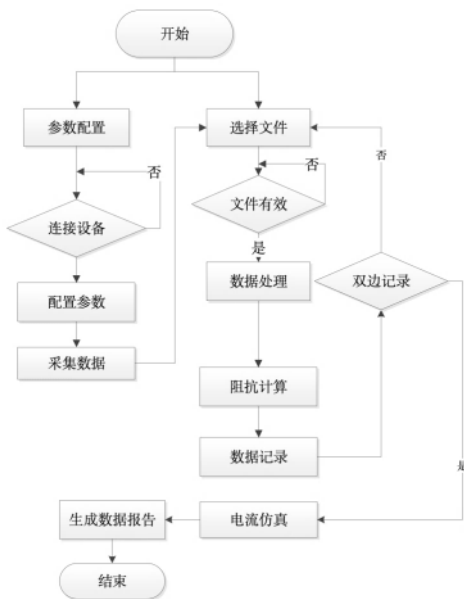


图 4 控制流程图

### 4 软件实现

#### 4.1 软件开发环境

本软件使用的操作系统为 Windows10，使用 Microsoft Visual Studio 进行开发，采样 C# 语言编程<sup>[3-4]</sup>，运行环境为 NET6.0。

#### 4.2 采样参数配置及数据采集的实现

用户将采集卡连接至嵌入式电脑，打开参数配置页面，软件自动读取设备信息以及自定义参数配置。采样主要界面如图 5 所示，由设备信息、采样通道、



图 5 自动读取设备信息及参数配置界面

采样模式、文件保存、触发模式等构成。

设备信息展示高速 AD 采样器的设备类型和设备

名称，用以校验采样设备连接是否良好。采样通道用以配置采样通道模式及具体的采样通道。采样模式主要配置采样周期、采样次数、采样点数等信息。文件保存主要设置文件保存的类型及路径。触发模式主要用以配置短路试验触发方式是软件触发还是硬件按钮触发。

### 4.3 阻抗计算实现

当完成采集任务或选择了需要处理的数据文件并且已做数据处理操作，点击阻抗计算，各类参数计算结果以及数据分析图将会出现在右侧，阻抗计算模块的运行界面如图 6 所示。

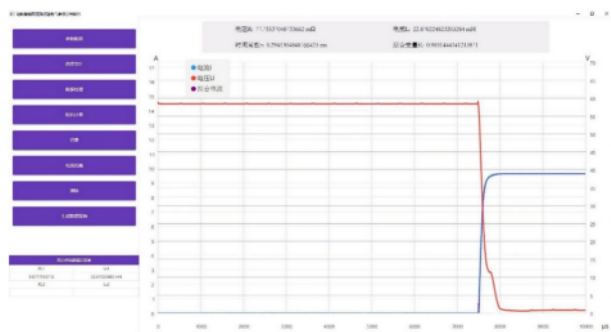


图 6 阻抗计算模块的运行界面

电感参数需要通过拟合变量  $K$  去计算，而  $K$  则需要通过牛顿迭代法实现计算，在代码中使用递归法来实现牛顿迭代法计算拟合变量  $K$ 。

### 4.4 短路电流仿真

如图 7 所示为基于 1500V 直流双边供电模型的电流变化趋势预测，结果显示，其稳态值结果为 21812A。

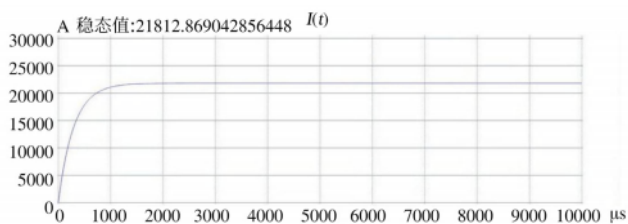


图 7 预测双边供电情况下的电流变化

## 5 结束语

为了解决在地铁接触网整定计算过程中线路阻抗估算误差大的问题，提出了低压短路试验求线路阻抗的方法，由于采样数据量大，计算过程复杂，因此开发了地铁接触网阻抗测试及短路仿真软件。本软件采用 WPF 框架开发，MVVM 架构，适配 Windows10 及以上版本操作系统，能够完成参数配置、线路阻抗计算、电流仿真、自动生成报告等主要功能，具有兼容性、安全性和易用性等多方面优势。应能够提高数据处理的效率和精度，减少试验成本，在城市轨道交通的接触网短路试验和继电保护装置整定计算中发挥出重要的作用，具有广阔的应用前景。

### 参考文献

- [1] 盛庆广. 基于多导体传输线模型的接触网电气参数计算方法 [J]. 铁道技术监督, 2010, 38 (7): 39-41, 48.
- [2] 刘成. 客户程序自动读写 Word 文档的实现 [J]. 计算机应用, 2001 (3): 96.
- [3] 杨胡萍, 左士伟, 钟耀星, 等. 基于 C# 的继电保护整定系统关键技术研究 [J]. 郑州大学学报 (工学版), 2014, 35 (6): 100-103.
- [4] 孙文华. C 语言快速实现低压网络短路电流计算 [J]. 电工技术, 2003 (8): 9-10.

(收稿日期: 2023-09-23)