

# 线路负载及故障检测装置设计报告

**【摘要】：**本系统是基于 FPGA 和 STM32 单片机的线路负载及故障检测的装置，主要由高速 AD/DA 电路、恒流源电路、微弱信号放大电路等组成。该系统测量阻抗是利用 FPGA 控制 DAC 产生正弦波激励信号，经过标准电阻和负载网络分压，再通过两路 AD 同步采样标准电阻和负载网络两端电压波形，利用 FFT 算法将两路电压波形转换为两个电压矢量，通过两个电压矢量的比例求出电容、电阻、电感的参数。线路故障点检测是通过恒流源与长度已知的标准导线和负载线路串联，通过分别测量标准导线和负载线路的两端电压，通过比例计算可以判断出短路故障点的精确位置。通过扫频测量负载网络的幅频特性，根据负载网络的幅频特性的差异，判断出负载网络的结构。装置测量电容、电阻和电感参数误差均在 5% 以内，位置测量精度可达 3mm，响应时间不大于 5s。

**【关键词】** 线路故障点检测、RLC 元件参数测量、负载网络结构检测

## 一、系统方案论证与选择

根据题目要求，线路负载及故障检测装置设计的重点和难点在于负载元件参数的测量和线路短路故障点的测量。

### 1、电阻、电容、电感参数测量方法

方案一：将标准电阻和负载网络串联，并施加正弦激励电压，利用有效值检测芯片和比较器测量标准电阻和负载网络两端的电压和电压波形的相位差，通过标准电阻和负载网络的电压比例、电压波形的相位差、激励电压频率和标准电阻阻值求出负载网络的阻抗，从而求出电阻、电容、电感的参数。该方案模拟电路相对复杂，测量准确度较难提高。

方案二：将标准电阻和负载网络串联，并施加正弦激励电压，利用两路高速 ADC 同步采样标准电阻和负载网络两端的电压波形，然后利用快速傅里叶变换算法(FFT)计算出两路电压波形的幅值和相位，通过两路电压波形的幅度比例、相位差、激励电压频率和标准电阻阻值求出负载网络的阻抗，从而求出电阻、电容、电感的参数。该方案采用数字信号处理，软件相对复杂，硬件电路简单，测量准确度较高。

为确保作品精度和稳定性，最终选择方案二作为电阻、电容、电感参数测量方案。

### 2、线路短路故障点测量方法

方案一：利用脉冲反射法进行线路短路故障点的定位，其理论基础是认为线路是分布参数元件，在线路的一端施加电压后，由于电感电容的惰性，电缆的另一端不能立即得到电压，需要经历一定的时间。当线路在某处发生故障时，该点的输入阻抗就成为故障点，传输阻抗与负载阻抗不匹配，电磁波在此处发生反射，根据入射脉冲行波和反射脉冲行波的时间差和行波在电缆中的传播速度确定故障距离。该方案原理简单，但要求产生的脉冲上升沿、下降

沿和脉冲宽度要求很窄，并且经过测试，由于题目检测线路过短，导致脉冲反射现象不明显，无法进行测量。

方案二：利用导线电阻与导线长度呈线性关系的特性，将长度已知的标准导线与待测线路串联，利用恒流源施加恒定电流，分别测量标准导线与待测线路两端的电压，通过两者电压比例和标准导线长度计算出待测线路长度，从而确定短路点具体位置。该方案电路结构简单，测量结果精确稳定。

综合考虑，最终选择方案二进行故障点的位置测量。

二、理论分析与参数计算

1、电阻、电容和电感参数测量

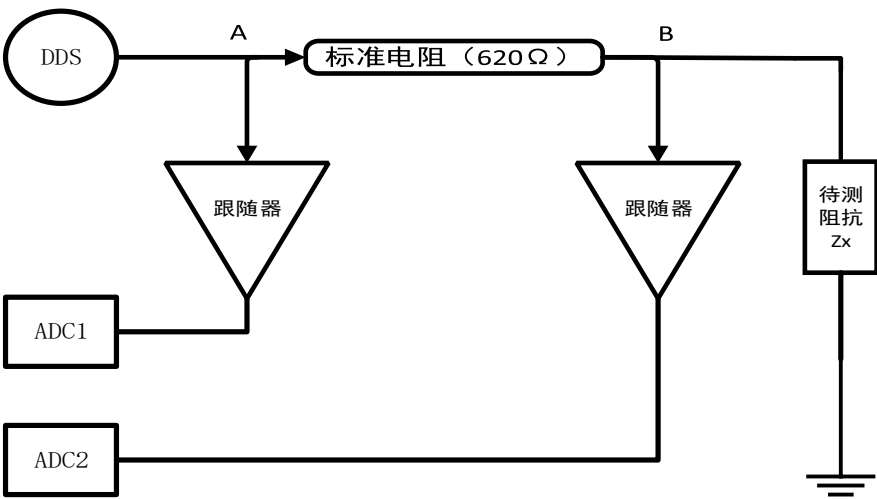


图 2-1 阻抗参数测量结构图

如图 2-1，先将标准阻抗和待测阻抗串联，利用 DDS 对其施加一个正弦激励信号，然后通过高速 ADC 采集 A、B 两点电压信号波形，ADC 记录波形时长为信号周期的整数倍，避免傅里叶变换计算时出现频谱泄漏，采集到波形数据后，利用快速傅里叶算法（FFT）将时域波形数据转换为频域电压矢量数据，通过 A、B 两点电压矢量比例、标准电阻阻值计算出待测阻抗  $Z_x$ ，再根据激励信号频率求出电阻、电容、电感具体参数。

设正弦波每个周期采集 256 点，每通道采样点数为 4096，则 FFT 计算后，第  $i=4096/256=16$  个频点为该正弦波的矢量表示，令两段波形数据 FFT 计算后，得到的电压矢量为  $\dot{A}$ 、 $\dot{B}$ 、标准电阻阻抗为  $\dot{z}_0$ ，则待测阻抗  $\dot{z}_x$  计算公式如下：

$$\frac{\dot{B}}{\dot{A}} = \frac{\dot{z}_x}{\dot{z}_0 + \dot{z}_x}$$

=>

$$\dot{z}_x = \frac{\dot{B}}{\dot{A} + \dot{B}} \dot{z}_0$$

再通过阻抗的实部虚部大小关系去判断当前负载是电阻、电容、还是电感。然后根据正弦激励频率和阻抗模计算出具体元件参数。

## 2、负载结构判断

如图 2-1，将标准电阻与负载网路串联，从 0-1MHz 均匀选择 10 个频率点，利用 DDS 对其施加正弦激励信号扫频信号，每次切换频率后，利用高速 ADC 对 A、B 两点信号进行同步采样，然后利用 FFT 算法计算出 A、B 两点电压，求出以 B 为输出，A 为输入时的增益，扫频完成后得到幅频特性，通过对幅频特性的分析最终判断负载结构。

## 3、线路短路故障点测量

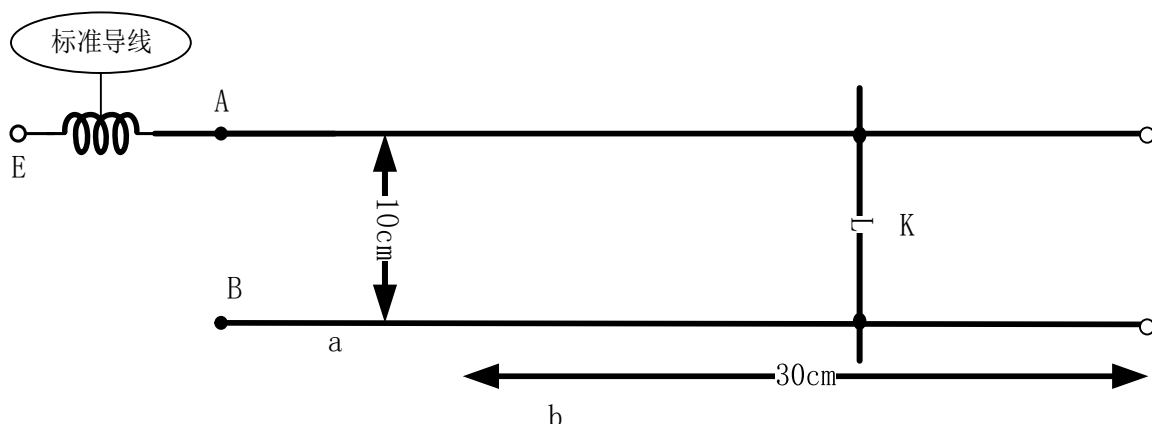


图 2-2 线路短路故障点测量原理示意图

如图 2-2，图中标标准导线长度已知为 $L_0$ ，材质、直径与待测线路相同，测量短路距离时，在点 E、B 接入恒流源，电流从 E 输入，B 输出，然后测量 E-A 两点的压差 $U_{ea}$ ，A-B 两点的电压 $U_{ab}$ ，则 AB 间待测线缆长度为：

$$L_x = \frac{U_{ab}}{U_{ea}} \times L_0 = \frac{R_{ab} \times I_{ab}}{R_{ea} \times I_{ea}} \times L_0 = \frac{R_{ab}}{R_{ea}} \times L_0 \quad (2.1)$$

则短路点距离 D 为：

$$D = \frac{L_x}{2} \quad (2.2)$$

由式 2.1 可得，最终测量结果与导线上电流大小无关，这极大的提高了测量精度和稳定性。

## 三、系统硬件电路设计

### 3.1. 系统总体框图

经过方案论证和讨论，最终确定该装置的总体设计框图如图 3.1 所示：

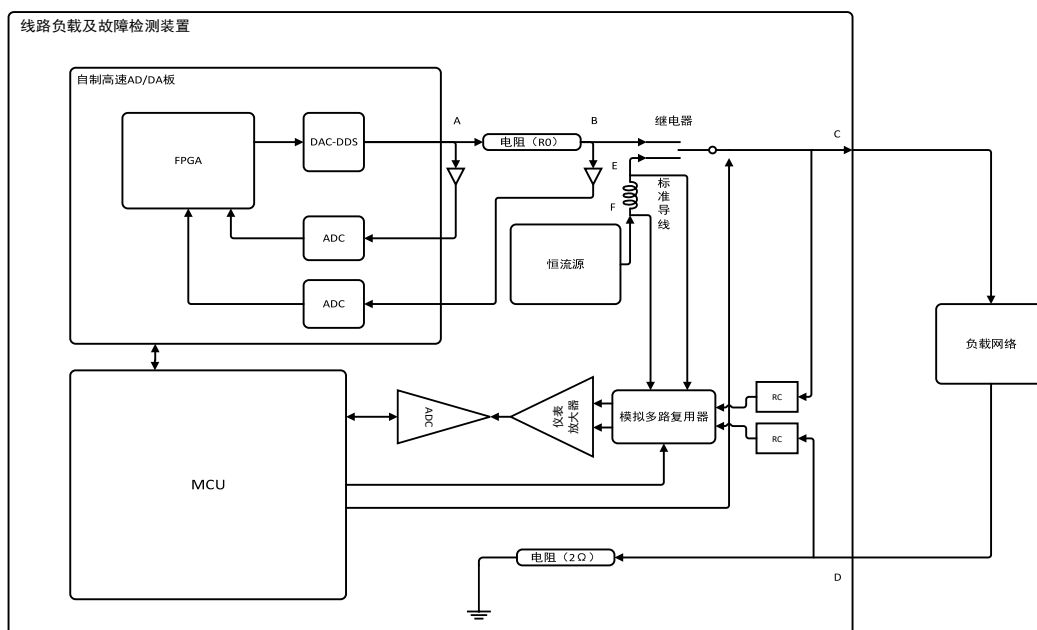


图 3-1 线路负载及故障检测装置

如图 3-1，测量负载元件参数时，继电器切换到标准电阻 $R_0$ 一端，单片机控制 FPGA 通过高速 DAC 产生一个频率固定的正弦激励信号，该激励信号通过标准电阻 $R_0$ 进入到负载网络，然后利用 FPGA 控制高速 ADC 对 A、B 两点电压波形进行采集并缓存到 FPGA 内部 RAM 中，单片机通过 SPI 接口读出采样数据，对其进行计算分析，得到负载元件参数。当负载阻抗模小于某个阈值时(作品中为  $10\Omega$ )，将会被判定为短路，当负载阻抗模大于某个阈值时(作品中  $4K\Omega$ )，将会判定为开路。

测定负载结构时，继电器切换到标准电阻 $R_0$ 一端，FPGA 控制高速 DAC 产生正弦扫频激励信号，扫频点数为 10 点，频率范围从 0Hz 到 1MHz，每切换一次频率，FPGA 将控制两路 ADC 对 A、B 两点电压波形进行采样，单片机读出数据后利用 FFT 算法计算出两点电压幅值的比例，从而得到幅频特性曲线，根据不同负载幅频特性曲线不同的特性，分析得到电路负载结构。

测量短路距离时，继电器切换到恒流源一端，单片机控制模拟多路复用器和 ADC，分别采样标准导线两端电压 $U_{ef}$ ，待测导线两端电压 $U_{cd}$ ，利用导线电阻和导线长度成正比的特性和标准导线的长度求出待测线路的长度。

## 3.2 单元电路设计

**1. 恒流源电路**如图 3.1,恒流源电路是使用 TI 的高电流的功率运算放大器 OPA569 构成的 Howland 恒流源电路， OPA569 芯片可单电源 5V 供电，最高可达 2A 的输出电流。满足恒流源电流输出的需要。其中电阻 R7 采用的 25W 的电阻，确保电阻不因为电流过大而损坏。电路产生的恒定电流：

该电路在反馈电阻 R1 两端并入了 1uF 的电容器抑制振荡，使电路达到稳定，大幅减小输出的电流纹波。



图 3-3 微弱直流信号放大电路

由于线路上压降由于 20mV 左右, 本作品使用的是 TI 公司的零漂移、轨到轨输出仪表放大器 INA188, 该芯片具有高共模抑制比, 通过外接单电阻可设置 1——1000 倍的增益。电路如图 3-3 所示,  $R_3$  和  $C_3$  构成一个低通滤波器, 用于滤除题目中 A 点和 B 点加入的频率较高的噪声信号。

图 3-4 ADC 前端单端转差分电路

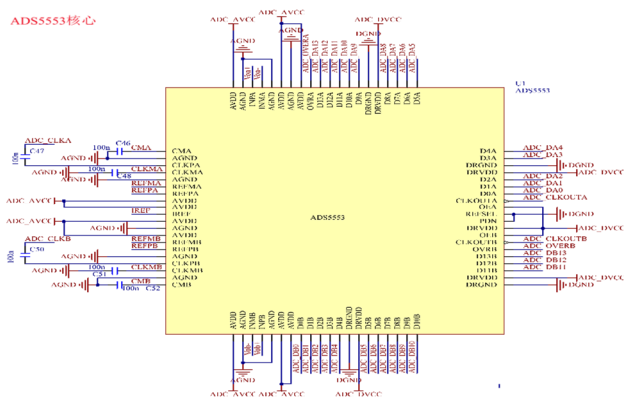


图 3-5 ADS5553 核心

图 3-4 和图 3-5 为 A/D 转换电路，其中 ADS5553 是 TI 双通道、14 位模数转换器，采样率可达 65MSPS，图 3-4 为单端转差分电路，芯片使用 TI 的 THS4503 差分放大器，该电路将外部输入的单端信号转换为差分信号，并将电压抬升至正电压供 ADC 采集，电路输入阻抗：

$$k = \frac{R_{11}}{R_7}$$

$$R_i = (\frac{1 + k}{1 + 0.5k} \times R_{11}) // R_8 \approx 50 \Omega$$

### 4、高速 DAC 电路

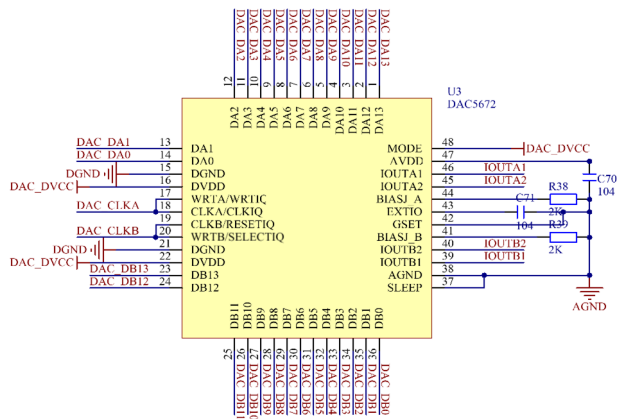


图 3-6 DAC 差分转单端电路

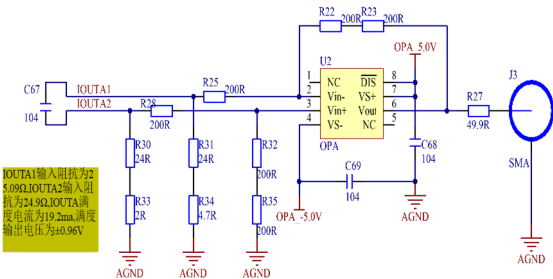


图 3-7 DAC5672 核心

图 3-6 和图 3-7 为 D/A 电路，其中 DAC5672 为 TI 双通道，14bitDAC，数据转换率高达 275MSPS，图 3-7 为差分转单端电路，图 3-6 中，IOUTA1 和 IOUTA2 输出差分电流信号，通过差分转单端电路的输入电阻，将电流信号转化为电压信号，两路差分电压信号相减得到单端电压信号。

### 四、软件设计

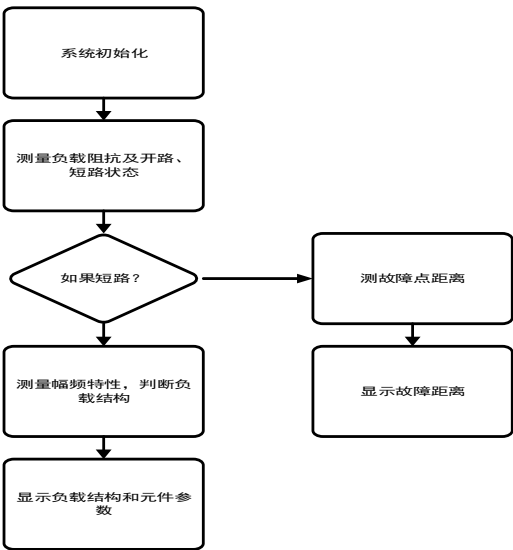


图 4-1 软件流程图

软件部分主要需要完成控制 FPGA 采样、DDS 输出正弦波频率、ADC 采样、模拟开关和继电器

切换，并完成数据分析及最终结果显示，软件流程图如图 4-1 所示。

## 五、测试方案与测试结果

### ● 测试仪器

160M 信号源 RIGOL DG4162

6 $\frac{1}{2}$ 位万用表 PM890D

直流稳压电源 DF1797B-3103

### ● 测试方法

1. 首先对短路故障点距离测量功能进行校准。
2. 将测试线路短路，观察屏幕是否能在 5s 内准确给出指示。
3. 将测试线路开路，观察屏幕是否能在 5s 内准确给出指示。
4. 依次将若干个电阻，电感、电容接入到测试线路上，记录屏幕上显示的测量结果，再利用数字电桥测量被测电阻、电感、电容，记录电桥测量结果，然后将单片机测量结果与数字电桥测量结果对比，计算相对误差，观察相对误差是否在 5%以内。
5. 将所有可能出现的负载结构依次接入到测试线路（元件参数随机选择），观察屏幕是否能正确显示负载结构。
6. 将测试线短路，记录单片机屏幕上显示的测量距离数据，与实际距离对比，计算绝对误差，观察绝对误差是否在 1cm 以内。
7. 将 A 点通过 1pf 电容，接入题目指定的噪声信号，记录单片机屏幕上显示的测量距离数据，与实际距离对比，计算绝对误差，观察绝对误差是否在 1cm 以内。
8. 将 B 点通过 1pf 电容，接入题目指定的噪声信号，记录单片机屏幕上显示的测量距离数据，与实际距离对比，计算绝对误差，观察绝对误差是否在 1cm 以内。

### ● 测试结果

1. 经过测试，线路短路或开路，屏幕可以在 5s 内给出准确指示。

#### 2. (a) 电容测试结果

实际电容 值/nF	测量电 容值/nf	相对误差 (%)
100.31	99.53	0.4
383.54	379.90	0.8
850.41	858.12	0.9

#### (b) 电阻测试结果

实际阻值( $\Omega$ )	测量值( $\Omega$ )	相对误差 (%)
678.6	677.21	0.2
1480.8	1453.3	1.8
1990.2	1960.5	1.5

(c) 电感测量结果

实际电感值 (uH)	测量电感值	相对误差 (%)
334	346.31	3.5
605	626.29	3.5
994.5	1026.54	3.1

3. 负载网络结构判断

负载网络结构	是否正确显示	负载网络结构	是否正确显示
电阻和电容串联	是	电阻、电感和电容串联	是
电阻和电感串联	是	电阻和电容并联再和电感串联	是
电容和电感串联	是	电阻和电感并联再和电容串联	是
电阻和电容并联	是	电感和电容并联再和电阻串联	是
电阻和电感并联	是	电感和电容串联再和电阻并联	是
电容和电感并联	是	电阻和电容串联再和电感并联	否
电感、电容和电阻并联	否	电感和电阻串联再和电容并联	否

4. 线路短路故障点测量

实际故障点 (cm)	测量故障点 (cm)	绝对误差 (cm)
28	28.22	0.22
37	37.12	0.15
44.5	44.54	0.04

5. A 点接入噪声短路故障点测量

实际故障点 (cm)	测量故障点 (cm)	绝对误差 (cm)
27.5	27.75	0.25
39	39.12	0.12
47	47.34	0.34

6. B 点接入噪声短路故障点测量

实际故障点 (cm)	测量故障点 (cm)	绝对误差 (cm)
25	25.21	0.21
33	33.17	0.17
42	42.14	0.14

● 误差分析及改进

1. 大电阻测量误差较大，经分析是由两路 AD 性能不完全一致造成的，可以通过将一路 AD 测量结果软件乘以一个系数使两路 AD 测量相同电压时结果相同，从而提高最终测试精度。

## 五、参考文献

- [1] 华成英 童诗白 主编. 《模拟电子技术基础》 高等教育出版社. 2006 年;
- [2] 康光华 主编. 《电子技术基础》. 模拟部分高等教育出版社. 2006 年;
- [3] 赛尔吉欧 弗朗哥 主编. 刘树棠等译. 《基于运算放大器和模拟集成电路的电路设计》，西安交通大学出版社，2010；
- [4] 阎石 主编. 《数字电子技术基础》， 高等教育出版社，2005；