

同轴电缆长度与终端负载检测装置

摘 要

本实验的目标是设计并制作一个同轴电缆长度与终端负载检测装置，通过使用 STM32F4 主控和滤波电路、脉冲电路、振荡电路进行实现硬件电路，并采用 TDR 时域反射算法。装置需要能够显示工作状态、电缆长度、负载类型和负载参数。在终端开路条件下，装置要能够检测电缆长度，相对误差的绝对值不大于 5%，一次检测时间不超过 5 秒。同时，装置还需在接入负载后正确判断负载类型，并显示负载的电阻或电容值，相对误差的绝对值不大于 10%。关键词：同轴电缆、长度检测、负载检测、STM32 主控、模拟电路

关键字： STM32F4；TDR 技术；定向电桥；RC 振荡；滤波电路

一、系统方案

1.1 方案比较与选择

1.1.1 激励信号方案选择

方案一：

方案二：

方案选择：由于方案一需要搭建乘法器和低通滤波器，电路复杂度较高，而方案二的电路设计简单，且精度较高，所以选择方案二。

1.1.2 信号检测与处理方案选择

方案一：

方案二：

方案选择：

1.1.3 长度测量方案选择

方案一：信号时间差直接测量。

方案二：TDR 间接测量时间差。

方案三：谐振法。

方案选择：方案三的结构相对简单，精度高，而且

1.1.4 电容测量方案选择

方案一：使用自平衡电桥测量电容。

方案二：谐振法。

方案选择：方案二

1.2 方案描述

1.2.1 系统框图

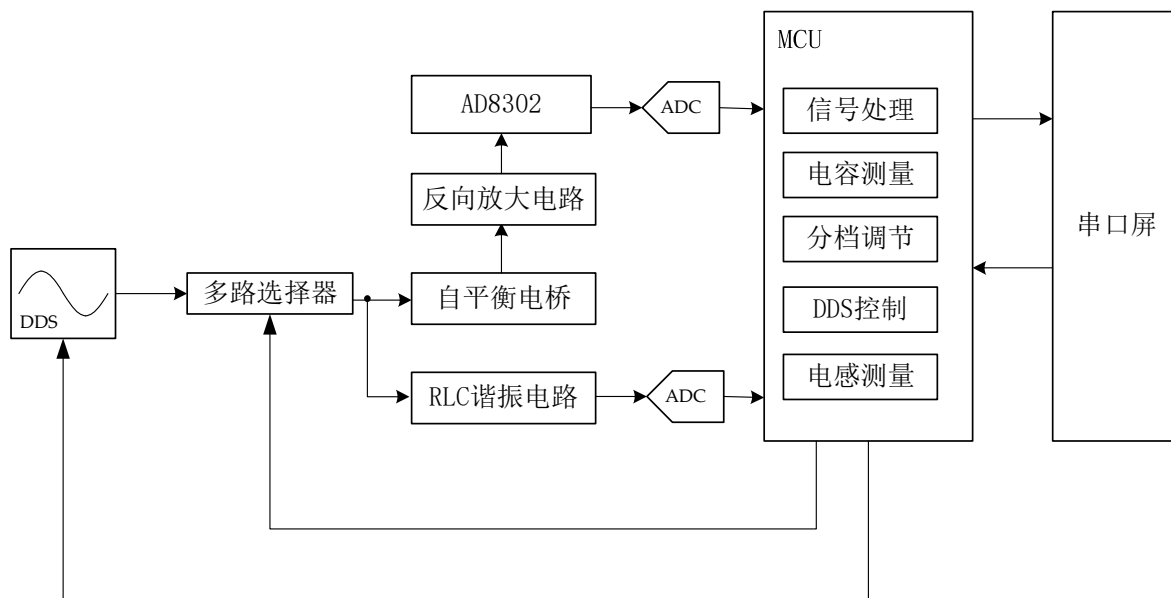


图 1 系统框图

1.2.2 总体思路

本系统使用 STM32F4 作为主控制器芯片，使用其内置的 ADC 测量信号。测量长度时，采用单脉冲产生脉冲信号输入同轴电缆，并使用定向电桥分离输入与反射信号，通过对信号的反傅里叶变换得到时间时间差，计算待测电缆的时间差。测量电容时，NE555 产生方波信号输入到接入负载的电缆中，然后单片机通过片上 ADC 得到信息后，再通过谐振法，计算待测电容的 C 值。

二、理论分析计算

2.1 实际电容的等效电路分析

实际电容可以看成电容、电阻、电感三者的串联，影响电容性质的参数主要有等效串联电阻 (ESR) 和等效串联电感 (ESL)。由于通常实际电容的 ESL 较小，且只在高频的情况影响电容性质，所以在测量中可以忽略。

实际电容的复阻抗为：

$$Z = ESR + jX_C \quad (1)$$

其中 $X_C = -\frac{1}{\omega C}$ ，为容抗，电容值为：

$$C = \frac{1}{\omega |X_C|} \quad (2)$$

耗散角正切为：

$$D = \frac{ESR}{|X_C|} \quad (3)$$

2.2 实际电感的等效电路分析

实际电感可以看成电感并联分布电容 (C_p) 和等效串联电阻 (ESR)。在高频测量情况下，分布电容可以忽略。实际电感的复阻抗为：

$$Z = ESR + jX_L \quad (4)$$

电感值 L 为：

$$L = \frac{X_L}{\omega} \quad (5)$$

品质因数为：

$$Q = \frac{|X_C|}{ESR} \quad (6)$$

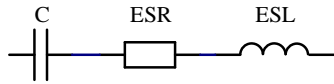


图2 实际电容的等效模型

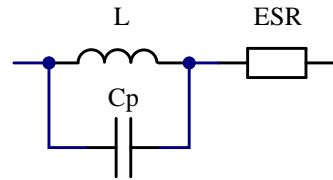


图3 实际电感的等效模型

2.3 自平衡电桥原理

在自平衡电桥实现调零时，电路输入信号 U_{in} 与输出信号 U_{out} 满足运放“虚短”“虚断”条件，有：

$$\frac{U_{in}}{Z_x} = -\frac{U_{out}}{R_f} \quad (7)$$

读取到输入输出信号的相位差 $\Delta\varphi$ 与幅度比 A_V ，进而可以计算待测电容的 C 值和 D 值。

$$R_x = |Z'_x| \sin \Delta\varphi - R_s \quad (8)$$

$$X_c = |Z'_x| \cos \Delta\varphi \quad (9)$$

$$C_x = \frac{1}{2\pi f X_C} \quad (10)$$

$$D = 2\pi R_x C_x \quad (11)$$

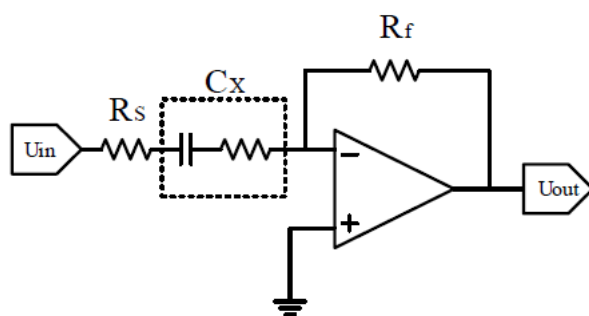


图 4 自平衡电桥

三、电路与程序设计

3.1 电路设计

3.1.1 自平衡电桥设计

自平衡电桥电路如图 5 所示，分为两级电路。第一级为电桥电路，电阻 R_S 和 R_F 的值根据待测电容的容值大小进行分档取值，如表 1 所示。第二级为反向放大电路，将前后信号的相位差控制在 AD8302 的工作范围内。

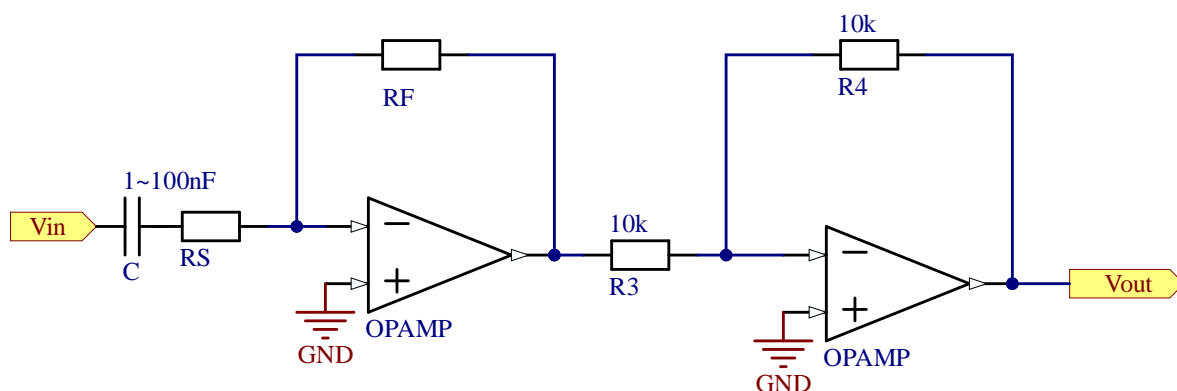


图 5 自平衡电桥电路

表 1 R_F 和 R_S 的取值

待测电容容值	R_F	R_S	挡位
1 ~ 8nF	9K Ω	4K Ω	一
8 ~ 30nF	1K Ω	470 Ω	二
30 ~ 100nF	180 Ω	60 Ω	三

3.1.2 RLC 谐振电路设计

RLC 谐振电路如图 6 所示， R_{SL} 的取值根据待测电感的 L 值和 Q 值确定，通过计算 L/Q 估计待测电感等效串联电阻的大小并据此选择合适的 R_{SL} 挡位，如表 2 所示。

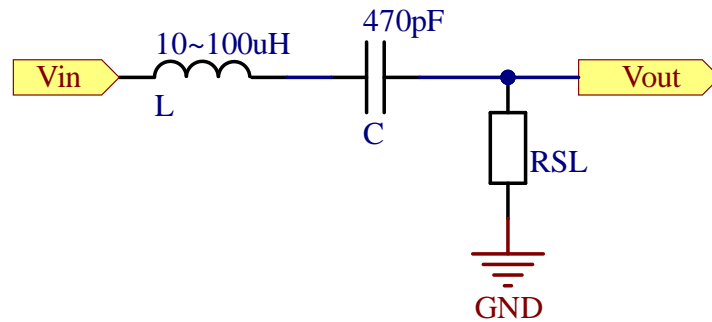


图 6 谐振电路设计

表 2 R_{SL} 的取值

待测电感 L/Q	R_{SL}	挡位
0.05 ~ 10 μH	10 Ω	一
10 ~ 30 μH	50 Ω	二
30 ~ 100 μH	402 Ω	三

3.2 程序设计

本设计由 STM32H7 为主控制器，实现 DDS 模块的驱动、AD8302 输出信号的采集、串联及反馈电阻的自动分档调节、串口屏的人机交互。上电时，MCU 发出指令对整个系统进行初始化，ADC 进行自校准，根据串口屏发出的测量指令进入电容测量模式或者电感测量模式。

测量电容时，首先 MCU 控制 DDS 输出 20kHz 的正弦信号，待电路稳定后，先将选择电阻挡位为二档，测量 AD8302 输出信号计算电容容值并据此进行判断并据此选择合适的电阻挡位，之后重新测量计算待测电容的 C 值和 D 值。

测量电感时，首先 MCU 选择电阻挡位为二档，控制 DDS 输出 20kHz~3MHz 之间的五等分点频率 f_{00} , f_{10} , f_{20} , f_{30} , f_{40} ，在这 5 个频率点之间找出对应输出电压最大的频率 f_{p0} 以及它的前后距离最近的频率点 f_{pf0} , f_{pb0} 。之后先控制 DDS 输出 $f_{pf0} \sim f_{pb0}$ 之间的五等分点频率 f_{00} , f_{10} , f_{20} , f_{30} , f_{40} ，重复之前的操作。当 $f_{pbn} - f_{pfn} < 1\text{kHz}$ 时，停止扫频操作，取 $f_{\max} = \frac{f_{pbn} + f_{pfn}}{2}$ ，作为测得谐振电路的谐振频率。在这个频率下，计算待测电感的 L 值和 Q 值并据此进行判断选择合适的电阻档位，之后重新进行扫频和计算待测电感的 L 值和 Q 值。

主程序的流程图如图 7 所示：

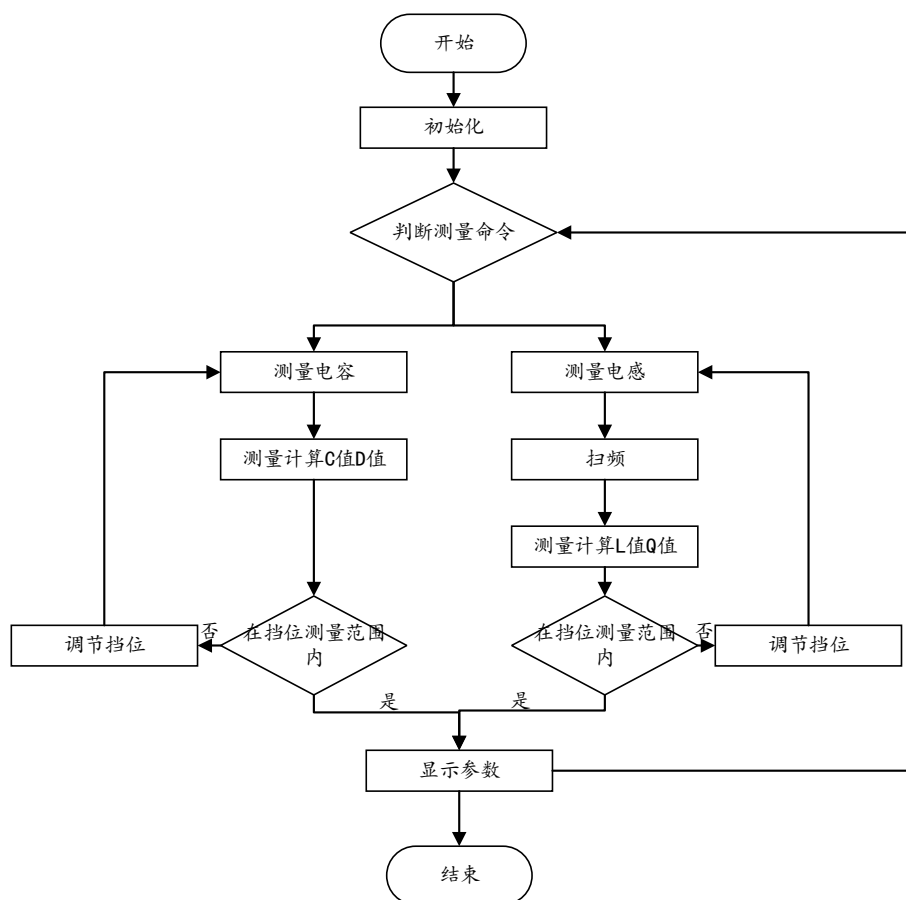


图 7 程序流程图

四、测试方案与测试结果

4.1 测试环境

设备	品牌	型号
示波器	GWINSTEK	MDO-2204ES 型数字示波器
信号发生器	RIGOL	DG1062 型信号发生器
电源	RIGOL	DP832 型稳压源
LCR 测试仪	GWINSTEK	LCR-6300 型 LCR 测试仪
Q 表	爱仪	QBG-3E 型全数显高频 Q 表

4.2 测试结果

4.2.1 电容量 C 及其损耗角正切 D 的测量测试

系统开机，接入 C 值在 1 到 100nF，D 值在 0.005 到 1 的样品电容，系统输出 20kHz 的正弦信号进行电容测量。记录系统测量的电容值 C、损耗角正切 D 和测量时间，与 LCR 测试仪测量的标准值对比，计算误差，测量结果如表 3 所示。

表 3 电容量 C 及其损耗角正切 D 的测试结果记录表

序号	C 标准值	C 测量值	相对误差	D 标准值	D 测量值	相对误差	测量时间
1	8.97nF	9.29nF	3.6%	0.619	0.645	4.1%	0.9s
2	4.88nF	4.79nF	-1.8%	0.207	0.206	-0.4%	0.7s
3	29.74nF	30.48nF	2.4%	0.710	0.736	3.6%	0.8s
4	86.65nF	86.55nF	-2.1%	0.172	0.175	1.9%	0.8s

4.2.2 电感量 L 及其品质因数 Q 的测量测试

系统开机，接入 L 值在 10 到 100μH，Q 值在 1 到 200 的样品电感，系统启动扫频模式进行电感测量。记录系统测量的电感值 L、品质因数 Q 和测量时间，与 LCR 测试仪测量的标准值对比，计算误差，测量结果如表 4 所示。

表 4 电容量 L 及其品质因数 Q 的测试结果记录表

序号	L 标准值	L 测量值	相对误差	Q 标准值	Q 测量值	相对误差	测量时间
1	15.26 μ H	14.89 μ H	-2.4%	139.00	135.76	-2.3%	2.1s
2	25.23 μ H	24.71 μ H	-2.1%	127.30	129.93	2.1%	1.8s
3	36.07 μ H	35.96 μ H	-3.1%	159.60	153.90	-3.6%	2.2s
4	73.80 μ H	73.90 μ H	0.1%	156.10	155.12	-0.6%	2.0s

参考文献

- [1] 罗杰. 谢自美. 电子线路. 设计 · 实验 · 测试 (第五版), 2015, 电子工业出版社.
- [2] 康华光. 电子技术基础 (模拟部分) (第六版). 2013, 高等教育出版社.
- [3] [美] Bruce Carter. 运算放大器权威指南 (第四版) 2014, 人民邮电出版社.
- [4] 全国大学生电子设计竞赛组委会. 第十一届全国大学生电子设计竞赛获奖作品选编, 北京理工大学出版社.