

同轴电缆长度与终端负载检测装置

摘要：本设计实现的同轴电缆长度与终端负载检测装置，可以测量电缆长度并判断终端负载的种类和参数。系统由主控制器、激励源、增益相位检测模块、自平衡电桥、显示屏五部分组成。系统采 STM32H743 作为主控制器，采用锁相环输出激励信号进入待测电缆，检测入射信号和反射信号的幅度相位信息，进而推导导线长度；采用自平衡电桥测量终端负载，检测同轴电缆和负载的阻抗，进而推出负载类型和参数。测量同轴电缆长度范围为 50cm~2000cm，误差小于 0.5%；待测电阻范围为 $5\Omega\sim50\Omega$ ，待测电容范围为 20pF~500pF，相对误差绝对值不超过 5%，判断时间不超过 2s。

关键词：电缆长度测量；自平衡电桥；矢量网络分析；负载检测

一、 系统方案

1. 方案描述

系统框图如图 1 所示。系统主控制器采用 STM32H7 系列单片机，系统通过串口显示屏实现人机交互，开机进行长度自校正，接入指定长度的电缆，完成校正。在测量电缆长度时，主控使用模拟锁相环芯片输入激励信号，通过定向耦合器得到反射信号，并用相位检测模块测量输入信号与反射信号相位差，以此计算电缆的长度。在测量负载种类和参数时，主控通过控制模拟锁相环输入激励信号，使用自平衡电桥电路测量负载，自动判断负载种类并测量对应参数。

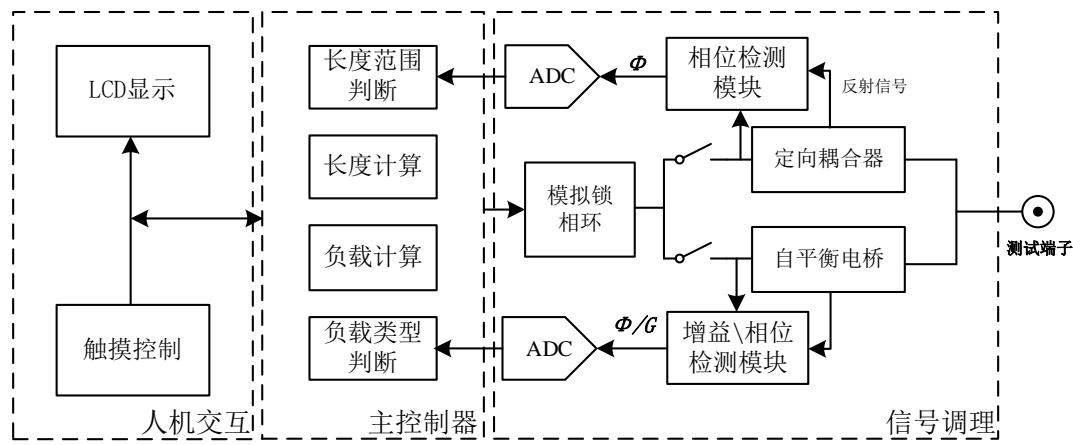


图 1 系统框图

2. 比较与选择

2.1 电缆长度测量方案

方案一：采用时域反射方案，通过测量开路电缆的入射与反射脉冲时间差，计算得到电缆长度。

方案二：采用矢量网络测量方案，端口加以激励信号，测量入射、反射信号相位差，计算得到电缆长度。

方案选择：方案一，时域反射法原理简明，但是由于入射与反射脉冲时间差较小，难以精准测量，且需要入射脉冲上升沿陡峭，实现较为困难；方案二，系统结构复杂，但可控制信号波长与电缆长度接近，得到较大的相位变化范围，相较时域反射法精度更高。因此采用方案二。

2.2 电阻电容测量方案

方案一：S 参数法，测量网络散射参数 S_{11} ，由此计算负载阻抗。

方案二：自平衡电桥法，通过测量电缆和负载的阻抗，进而计算负载的阻抗。

方案选择：方案一，由于 S 参数法要求系统工作在较高频率，电路中的寄生电容和寄生电感等非理想因素，会影响 S_{11} 的测量精度；方案二，系统工作在较低频率，电路中的寄生参数影响较小，因此可以实现较高精度的测量。综合考虑，使用方案二。

二、 理论分析与计算

1. 电缆长度与终端负载检测的原理及分析

1.1 电缆长度测量的原理及分析

散射参数，简称 S 参数，是网络分析仪的工作语言。在测量双端口网络散射参数时，可以用散射矩阵计算：

$$\begin{bmatrix} V_1^- \\ V_2^- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1^+ \\ V_2^+ \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中 V_1^- 、 V_1^+ 表示 1 端口输出和输入电压， V_2^- 、 V_2^+ 表示二端口输出和输入电压。 S_{11} 、 S_{12} 、 S_{21} 、 S_{22} 为网络散射参数。

反射参数 S_{11} 可以表示为：

$$S_{11} = \Gamma_L = |\Gamma_L|e^{j\phi_0} \quad (2)$$

其中 $|\Gamma_L|$ 为幅值增益系数， $e^{j\phi_0}$ 为系统固有相位延迟因子。

当双端口网络为一段长度为 d 的电缆时，入射波以特定波速在电缆中传播，到达导线端头后反射，引入新的相位延迟因子，此时幅值增益系数 Γ_L 转变为：

$$S_{11} = \Gamma_d = |\Gamma_d|e^{j\phi_0}e^{-j2\beta d} \quad (3)$$

其中 $|\Gamma_d|$ 为电缆的幅值增益系数， $e^{j\phi_0}$ 为系统固有延迟因子， $e^{-j2\beta d}$ 为电缆带来的相位延迟因子， β 为延迟系数。

根据式(1)，可以令 $V_2^+ = 0$ ，此时由(1)式可以推导出：

$$V_1^- = S_{11} \times V_1^+ \quad (4)$$

因此通过使用定向耦合器，将反射信号耦合至定向输出端，可以得到 V_1^- 、 V_1^+ 的幅值与相位信息，进而可计算指定电缆的网络散射参数。在排除网络固有延迟因子 $e^{j\phi_0}$ 后，得

到与距离相关的因子 $e^{-j2\beta d}$ ，完成了电缆长度的测量。电缆的长度范围在 1m 以下到 20m 之间，利用反射参数的相位延迟因子，可以对电缆长度进行计算，根据波长与频率的关系公式：

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad (5)$$

其中， v 为电缆中的波速， f 为信号频率。

我们使用的电缆型号为 RG316,速率参数为 70%，因此，电缆中的波速 $v = \alpha \times c$ ， $c = 3 \times 10^8 \text{m/s}$ 。我们将入射正弦信号波长设为 $\lambda_0 = 80\text{m}$ ，此时信号频率 $f = 2.625\text{MHz}$ 。当接入 10m~20m 的电缆时，反射波与入射波的相位差在 $90^\circ \sim 180^\circ$ 之间，测量反射系数 Γ_d ，可以得到相位差 $\Delta\varphi = \frac{2d}{\lambda_0} \times 360^\circ$ ， d 为电缆长度。完成 10m~20m 电缆长度的测量。

当电缆连接为 10m 以下的线时，当通过式(5)可知，当频率较低时，相位变化不明显，不利于长度 d 的测量。通过扫频测量相位差与频率之间的斜率关系，可以对 10m 以下不同长度区间的线缆进行分类，然后使用精度更高的固定频点测相位方式进行长度测量。

1.2 终端负载检测的原理及分析

在正弦信号的激励下，电阻电容表现出不同的阻抗特性，电容为线路中的正弦信号带来一个与阻抗辐角相同的相位偏移，因此，将待测终端负载接入自平衡电桥电路中，分别读取待测负载 Z_x 与已知负载 R_0 上的正弦信号，如下：

$$u_x = U_x \cos(\omega t) \quad (6)$$

$$u'_x = -U_x \sin(\omega t) \quad (7)$$

$$u_r = U_r \cos(\omega t + \phi_r) \quad (8)$$

根据正交分解原理：

$$\begin{cases} u_1 = \frac{U_x U_r}{2U_z} \cos \phi_r \\ u_Q = \frac{U_x U_r}{2U_z} \sin \phi_r \end{cases} \quad (9)$$

所以

$$\begin{aligned} U_r &= \frac{2U_z}{U_x} \sqrt{u_1^2 + u_Q^2} \\ \phi_r &= \text{atan } 2(u_Q, u_1) \end{aligned} \quad (9)$$

由上式可求得待测负载的阻抗模与辐角。当终端连接电阻时，辐角始终为 0° ，而如

果为电容，辐角随激励信号频率变化而改变。通过这一特征，可以对电容电阻进行分辨。当判断为电容时，通过系统扫频的方式可以计算电容容抗。

三、 电路与程序设计

1. 激励信号发生电路设计

激励信号发生电路如图 2 所示，使用宽带锁相环模块 ADF4351 产生用于测量同轴电缆长度的高频正弦激励信号，ADF4351 具有一个集成电压控制振荡器(VCO)，其基波输出频率范围为 2200 MHz 至 4400 MHz。利用 1/2/4/8/16/32/64 分频电路，可以输出满足测量要求的激励信号。

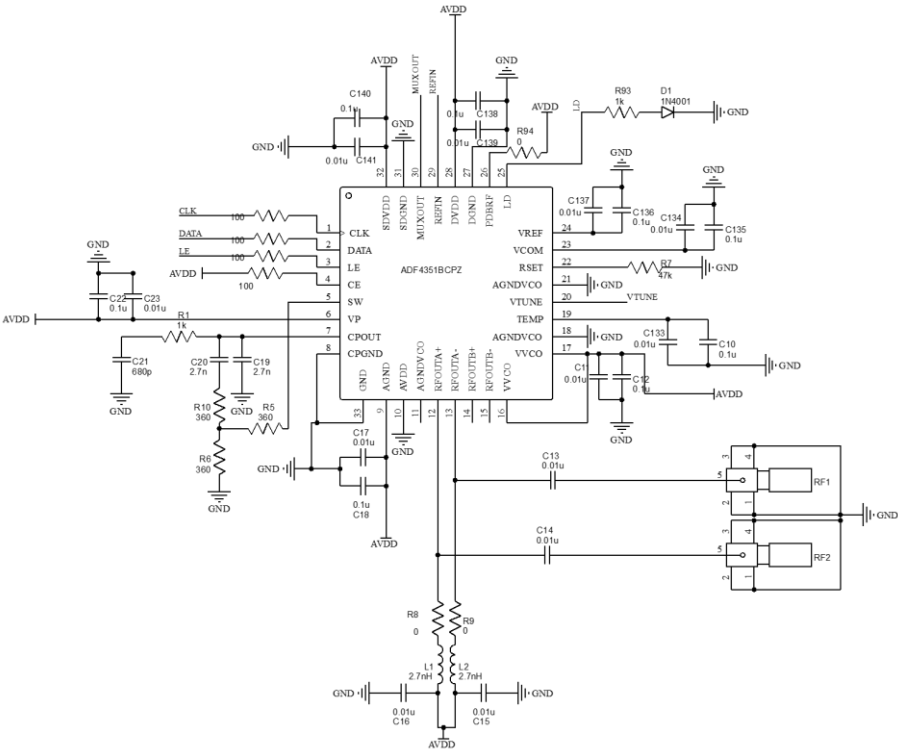


图 2 ADF4351 激励信号发生电路

2. 信号检测及处理电路设计

2.1 幅度相位检测电路设计

幅度相位检测电路如图 4 所示，选用幅度相位检测模块 AD8302，可以测量高至 2.7GHz 频率范围内 2 个输入信号的相位差，输出电压与两端口输入电压关系式为：

$V_{PHS} = V_{\phi}[\Phi(V_{INA}) - \Phi(V_{INB})]$, $V_{\phi} = 10\text{mV}$, 相位测量误差小于 0.5° , ADC 测量精度

达到 1mV，满足设计中对待测开路同轴线 S_{11} 参数的相位测量要求。

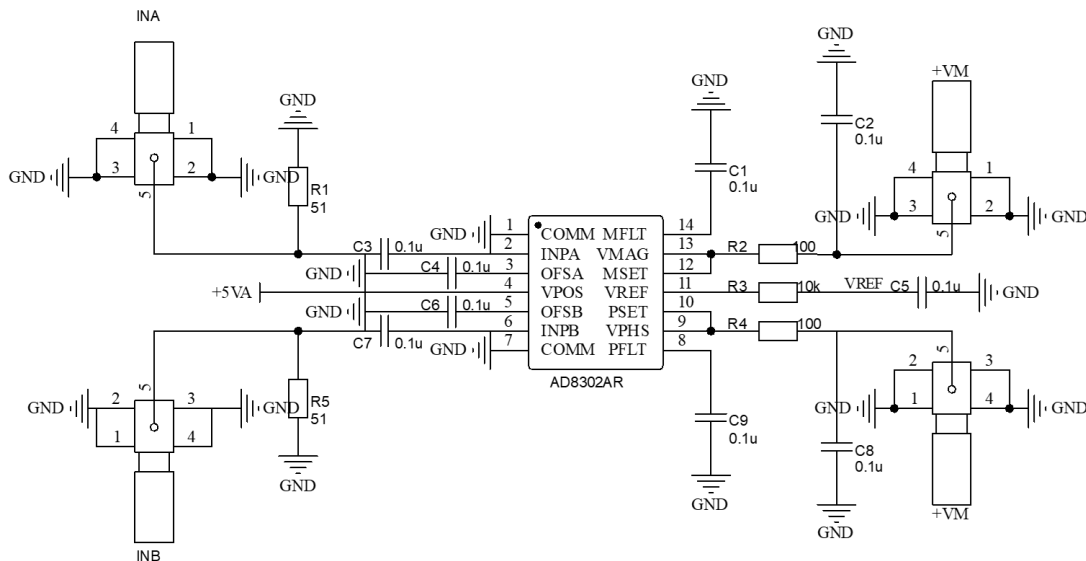


图 4 AD8302 幅度相位检测电路

2.2 自平衡电桥电路设计

自平衡电桥电路如图 5 所示，选用 325MHz 带宽的电压反馈运放 AD8058。利用运放虚短特性，将其反相输入端口的电压始终保持在 0V， R_r 为参考电阻， Z_x 为待测阻抗，实际情况 Z_x 包含同轴电缆的附加电容，在计算负载容抗时需要减去，利用式(9)可以计算出负载阻抗模和辐角。

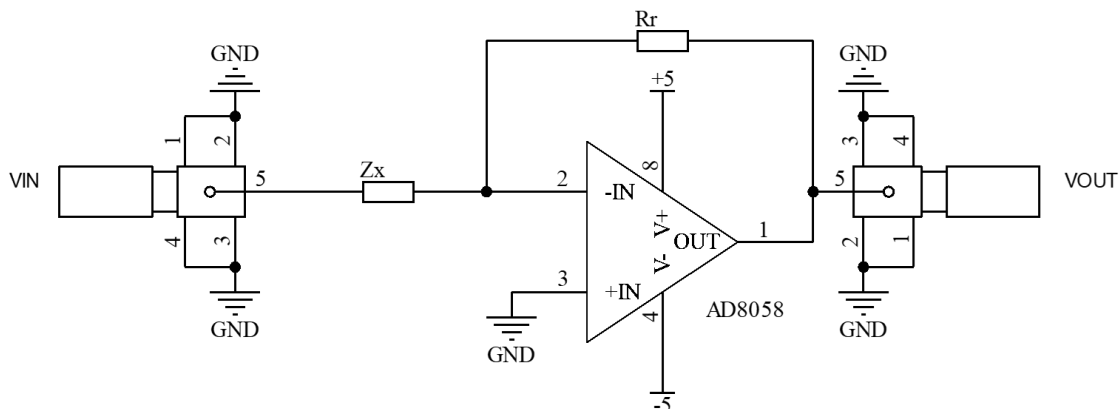


图 5 AD8058 自平衡电桥电路

3. 软件程序设计

程序设计流程图如图 6 所示。

系统使用串口屏交互的方式对待测参数进行选择，初始化后，通过串口屏选择“长度

检测”或“负载检测”模式，在“长度检测”模式下，主控制器控制锁相环输出扫频信号，以判断线缆长度范围，随后输出对应此范围的单频信号，精确测量线缆长度；在“负载检测”模式下，主控制器控制锁相环输出激励信号，判断负载类型，进行负载参数测量。将结果输出在显示屏上。

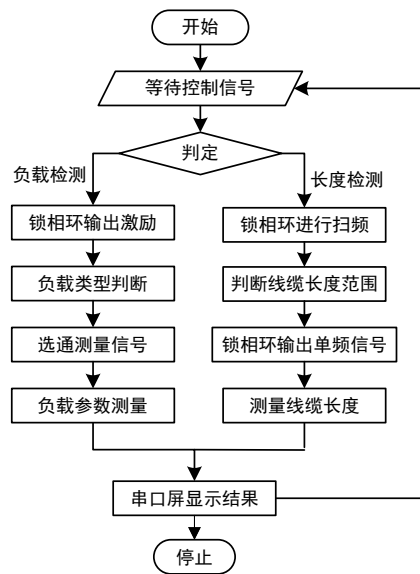


图 6 软件设计流程图

四、 测试方案与测试结果

1. 测试环境

示波器：	GWINSTEK	MDO-2204ES 型数字示波器；
信号发生器：	RIGOL	DG1062 型 60M 任意波形发生器；
电源：	RIGOL	DP832 型稳压源；
矢量网络分析仪：	KEYSIGHT	E5063A 型 100kHz~6.5GHz ENA 网络分析仪；
频谱分析仪：	KEYSIGHT	N9000B 型 9kHz~7.5GHz 信号分析仪。

2. 测试方案

2.1 10m~20m长电缆长度测量测试方案

分别接入长度为 1000cm、1450cm、2000cm 长度的电缆，终端开路，按“长度检测”键启动检测，装置检测并显示电缆长度，观察装置能否在 5s 内完成测量，并读取检测结果。

2.2 负载检测与测量测试方案

分别接入长度为 1000cm、1450cm、2000cm 长度的电缆,在终端分别接入 100pF、150pF、270pF、 10Ω 、 20Ω 、 30Ω 的负载以及开路的情况,按“负载检测”键启动检测,观察装置能否在 5s 内完成测量,并读取负载容值或阻值。

2.3 10m以下短电缆长度测量测试方案

分别接入长度为 800cm、450cm、50cm 长度的电缆,终端开路,按“长度检测”键启动检测,观察装置能否在 5s 内完成测量,并读取电缆长度。

3. 测试结果与数据

3.1 10m~20m长电缆长度测量

表 1 10m~20m 长电缆长度测量表

测量次数	接入电缆长度/cm	电缆长度测量结果/cm	测量误差/%	能否 5s 内完成测量
1	1000	1000.27	0.27	能
2	1450	1449.78	0.15	能
3	2000	2000.84	0.42	能

3.2 负载检测与测量

表 2 负载检测与测量表

负载种类	电容			电阻			开路
负载容值/pF (阻值/ Ω)	100	150	270	10	20	30	
判断负载类型	电容	电容	电容	电阻	电阻	电阻	开路
测量负载容值/pF (阻值/ Ω)	100.31	150.29	269.97	10.03	19.97	29.99	
测量误差/%	3.10	1.93	0.11	3.00	1.50	0.33	
能否在5s内完成测量	能	能	能	能	能	能	能

3.3 10m以下短电缆长度测量

表 3 10m 以下短电缆长度测量表

测量次数	接入电缆长度/cm	电缆长度测量结果/cm	测量误差/%	能否在 5s 内完成测量
1	800	800.15	0.1875	能
2	450	449.93	0.1556	能
3	50	50.21	4.200	能

3.4 测试结果分析

由测试结果可得，在测量 10m~20m 长电缆长度的测试中，测量结果相对误差的绝对值小于 0.1%；在负载类型与参数测量测试中，负载类型与开路情况判断均正确，相对误差的绝对值均小于 0.5%；在 10m 以下短电缆长度测量测试中，电缆长度测量结果相对误差的绝对值小于 0.5%。所有测试时间均小于 5s，满足所有题目要求的指标。

五、 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.