

同轴电缆长度与终端负载检测装置

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。系统采用 STM32F407 作为主控制器，采用 DDS（直接数字合成）模块输出激励信号进入待测电缆，并采用功分器获得多路相同的输入信号，并且检测入射信号和反射信号的幅度相位关系，进而推导导线长度；采用自平衡电桥测量终端负载，根据不同频率点相位关系判断阻抗类型，同时检测同轴电缆和负载的幅度关系，从而得到元件的值。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 $5\Omega \sim 50\Omega$ ，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： 定向耦合；自平衡电桥；矢量网络分析；负载检测

一、系统方案

1. 方案比较与选择

1.1 电缆长度测量方案

方案一：采用时域反射方案，输入窄脉冲波，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，当电缆较短时，难以精准测量，且需要入射脉冲上升沿陡峭，实现较为困难，对运算放大器压摆率要求较高；方案二，系统结构复杂，但可控制信号波长与电缆长度接近时，可以得到较大的相位变化，并且受到长度影响较小，相较时域反射法精度更高，在测量较短的电缆时，效果更好。因此采用方案二。

1.2 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，将信号输出电缆，并接入电桥电路，通过测量输入输出信号的幅值之比，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极大地影响 S_{11} 的测量精度；方案二，系统工作在较低的频率，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，同时可以在粗测之后选择更适合的频率进行精准测量。综合考虑，使用方案二。

2. 方案描述

2.1 系统框图

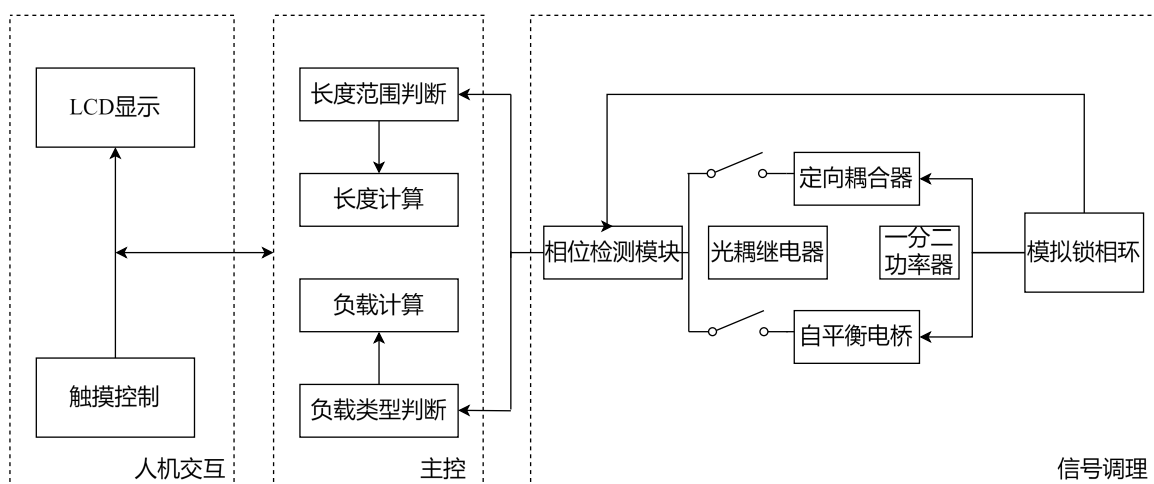


图 1 系统框图

2.2 总体思路

系统主控制器采用 STM32F4 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 DDS 模块输入激励信号，通过定向耦合器得到电缆中的反射信号，并用相位检测模块测量输入信号与反射信号相位差，采用固定相位差来进行扫频的方式，得到特定相位差下的信号频率，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 DDS 模块输入不同频率的激励信号，使用自平衡电桥电路测量负载，利用 AD8302 自动判断负载种类并测量对应参数。

二、理论分析计算

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 端口输入和输出电压， V_2^+ 、 V_2^- 表示 2 端口的输入和输出电压。 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, 会引入新的相位延迟因子, 此时幅值增益系数 $|\Gamma_L|$ 转变为:

$$S_{11} = \Gamma_d = |\Gamma_d|e^{j\phi_0}e^{-2\beta d} \quad (3)$$

其中为 $|\Gamma_d|$ 电缆的幅值增益系数, $e^{j\phi_0}$ 为系统固有延迟因子, $e^{-2\beta d}$ 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:

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

因此通过使用定向耦合器, 将反射信号耦合至定向输出端, 再与输入信号一同输入 AD8302 鉴相器, 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 $e^{-2\beta d}$, 完成了电缆长度的测量。电缆的长度范围在 1m~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 a 为 70%, 因此, 电缆中的波速 $v = ac, c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ 。

我们将入射正弦信号波长设为 $\lambda_0 = 80\text{m}$, 此时信号频率 $f = 2.65\text{MHz}$ 。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, 通过测量反射系数 γ_d , 可以得到相位差:

$$\Delta\phi = \frac{2d}{\lambda} \times 360^\circ \quad (6)$$

其中 d 为电缆长度。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:

$$\begin{cases} u_x = U_x \cos(\omega t) \\ u'_x = -U_x \sin(\omega t) \\ u_r = U_r \cos(\omega t + \phi_r) \end{cases} \quad (7)$$

根据正交分解原理：

$$\begin{cases} u_1 = \frac{U_x U_r}{2U_z} \cos \phi_r \\ u_Q = \frac{U_x U_r}{2U_z} \sin \phi_r \end{cases} \quad (8)$$

所以

$$\begin{cases} U_r = \frac{2U_z}{U_x} \sqrt{u_1^2 + u_Q^2} \\ \phi_r = \arctan 2(u_Q, u_1) \end{cases} \quad (9)$$

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，先通过系统扫频的方式粗略确定电容容抗，然后选取合适的频率进行精测。

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所示，使用直接数字频率合成器 DDS 模块 AD9959 产生用于测量同轴电缆长度的高频正弦激励信号，AD9959 由四个直接数字频率合成器（DDS）内核构成，每个通道均可提供独立的频率、相位和幅度控制，可输出 $0\text{MHz}\sim 200\text{MHz}$ 之间的信号，可以输出满足测量要求的激励信号。

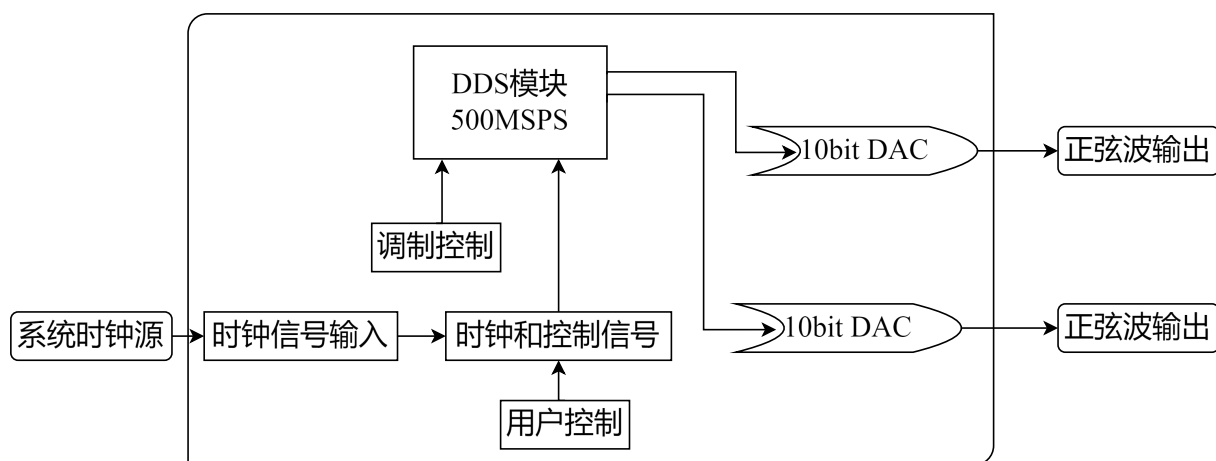


图 2 AD9959 发生激励信号

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: $V_{PHS} = V_{\Phi}[\Phi(V_{INA}) - \Phi(V_{INB})]$,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。

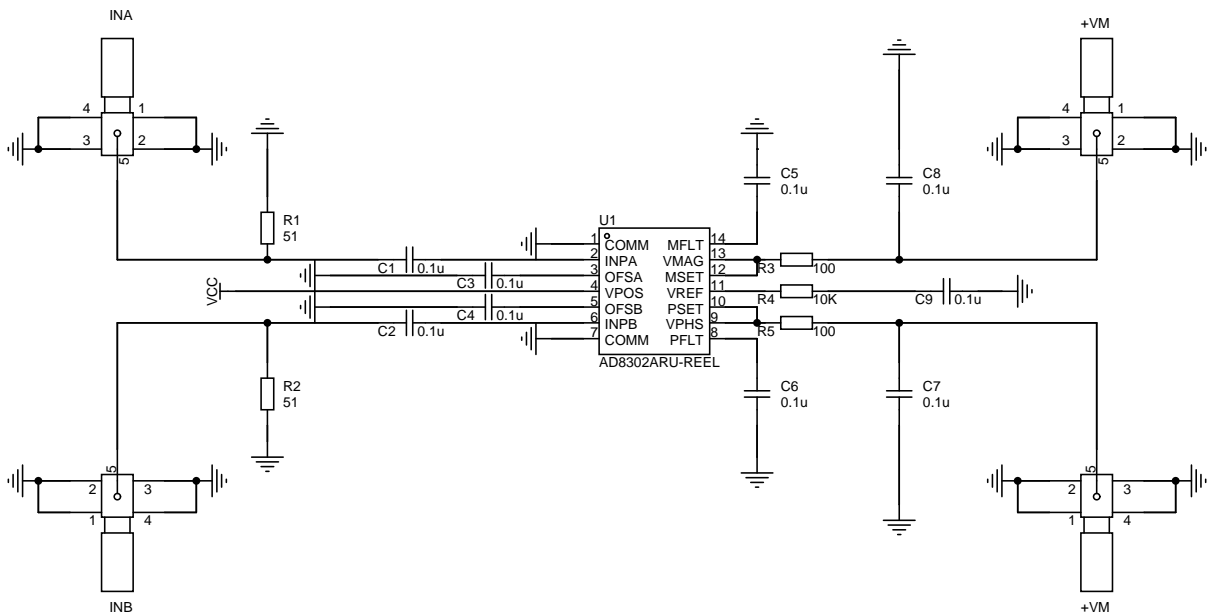


图 3 AD8302 幅度相位检测电路

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 (8) 可以计算出负载阻抗模和辐角。

3. 软件程序设计

程序设计流程图如图所示,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 DDS 输出 2.625MHz 的相对较低的频率,粗略判断线缆长度范围,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 DDS 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。

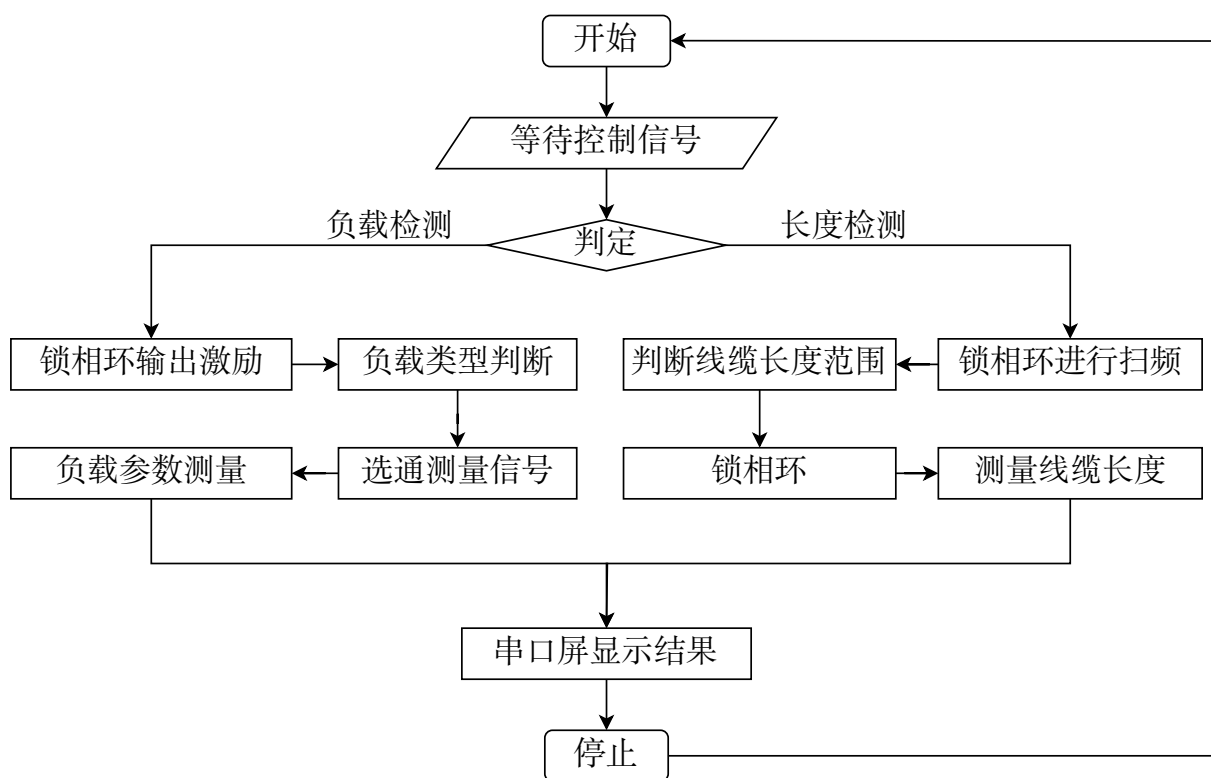


图 4 软件设计流程图

四、测试方案与测试结果

1. 测试环境

设备	品牌	型号
示波器	TELEDYNE LECROY	wavesurfer 3054 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
矢量网络分析仪	KEYSIGHT	E5063A 型矢量网络分析仪

2. 测试方案

2.1 10m 至 20m 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、10Ω、20Ω 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、100cm、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 至 20m 长电缆长度测量

表 1 10m 至 20m 长电缆长度测量

序号	介入电缆长度	电缆长度测量结果	测量误差/%	测量时间	能否 5s 内完成测量
1	1000cm	1000.27cm	0.27	1.0	能
2	1450cm	1449.78cm	0.15	0.7	能
3	2000cm	2000.84cm	0.42	0.8	能

3.2 负载检测与测量

表 2 负载检测与测量

序号	负载类型	负载值	测量负载值	测量误差	能否在 5s 内测量
1	电容	100pF	100.31pF	0.31%	能
2	电容	150pF	150.29pF	0.19%	能
3	电阻	10Ω	10.03Ω	0.30%	能
4	电阻	20Ω	19.97Ω	0.15%	能
5	开路	/	/	/	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

序号	接入电缆长度	电缆长度测量结果	测量误差	能否在 5s 内测量
1	800cm	800.15cm	0.018%	能
2	450cm	449.93cm	0.015%	能
3	100cm	100.18cm	0.18%	能
4	50cm	50.21cm	0.42%	能

3.4 测试结果分析

由测试结果可得，在测量 10m 到 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%，满足基本和发挥要求；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%，满足基本和发挥要求；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%。在测量的长度满足 $L \leq 100\text{cm}$ 中，所有测试时间均小于 5s，且精度满足发挥部分要求。

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.