

简易频率特性测试仪（ E 题）

摘 要

本系统是基于零中频正交解调原理的简易频率特性测试仪，用于检测被测网络的幅频特性和相频特性。该系统主要包括 DDS 集成模块，RLC 串联谐振电路，乘法器电路，低通滤波器，同相放大器和测量显示模块，其中 RLC 串联谐振电路作为被测网络。本系统以 DDS 集成模块为核心，将其产生的正交扫频信号通过被测网络后，经乘法器得到高频信号；这两个信号经过低通滤波、同相放大后得到符合要求的 I、Q 直流分量；最后通过单片机进行 ADC 采样、数据处理和液晶显示，得到被测网络的幅频特性和相频特性。本系统在算法上的创新之处是，在测量之初，采用短接被测网络即内测校准的方法减小了系统误差。经最终测试，本系统能很好地完成被测网络的频率特性测试。

1 系统方案

1.1 方案比较与选择

1.1.1 扫频信号源

方案一：采用锁相环间接频率合成方案。锁相环频率合成在一定程度上解决了既要
求频率稳定精确、又要求频率在较大范围可调的矛盾。但输出频率易受可变频率范围的
影响，输出频率相对较窄，不能满足题目 1MHz-40MHz 的高频要求。

方案二：采用直接数字频率合成 (DDS) 方案。DDS 技术具有输出频率相对较宽，
频率转换时间短，频率分辨率高，全数字化结构便于集成，以及相关波形参数 (频率、
相位、幅度) 均可实现程控的优点。采用集成芯片 AD9854 或 FPGA 可实现题目对扫频
信号源的要求。因此选用方案二。

1.1.2 控制平台

方案一：采用 FPGA 或 CPLD 进行控制。利用 FPGA 可以方便地实现 DDS 信号源，
但在液晶屏上显示幅频特性曲线和相频特性曲线较为困难，且 FPGA 成本较高。

方案二：采用 C8051F020 单片机进行控制。C8051F020 与 8051 兼容，速度可达
25MIPS；它内部有两路 ADC，速度分别为 100ksps(12 位) 和 500ksps(8 位)；它具有
4352 字节内部数据 RAM ,64K 字节的 FLASH 存储器，支持在线编程。若选用 C8051F020
作为扫频仪的控制单元，用其实现产生扫频信号、进行数据采集、处理以及波形显示的
功能，能够满足题目要求，且其性价比高。因此选用方案二。

1.1.3 低通滤波器

方案一：采用有源滤波。有源滤波在实现滤波的同时可实现增益的调节，但电路较
为复杂。

方案二：采用无源滤波。无源滤波电路在实现上更加方便简单。 若要实现增益可控，
直接在其后面加一个同相比例放大器即可。因此选用方案二。

1.2 方案描述

系统总体框图如图 1 所示。采用 DDS 芯片 AD9854 及 C8051F020 单片机作为控制
单元产生扫频信号，辅以按键控制实现 1MHz-40MHz，最小步进 100KHz 范围内的连续
扫频输出和点频测量。RLC 串联谐振电路用作被测网络。经 AD835 乘法器和低通滤波
器得到同相分量和正交分量的直流信号，ADC 转换送入单片机，在单片机内进行数据
处理，计算得到相位和幅度，通过液晶显示幅频特性和相频特性曲线。

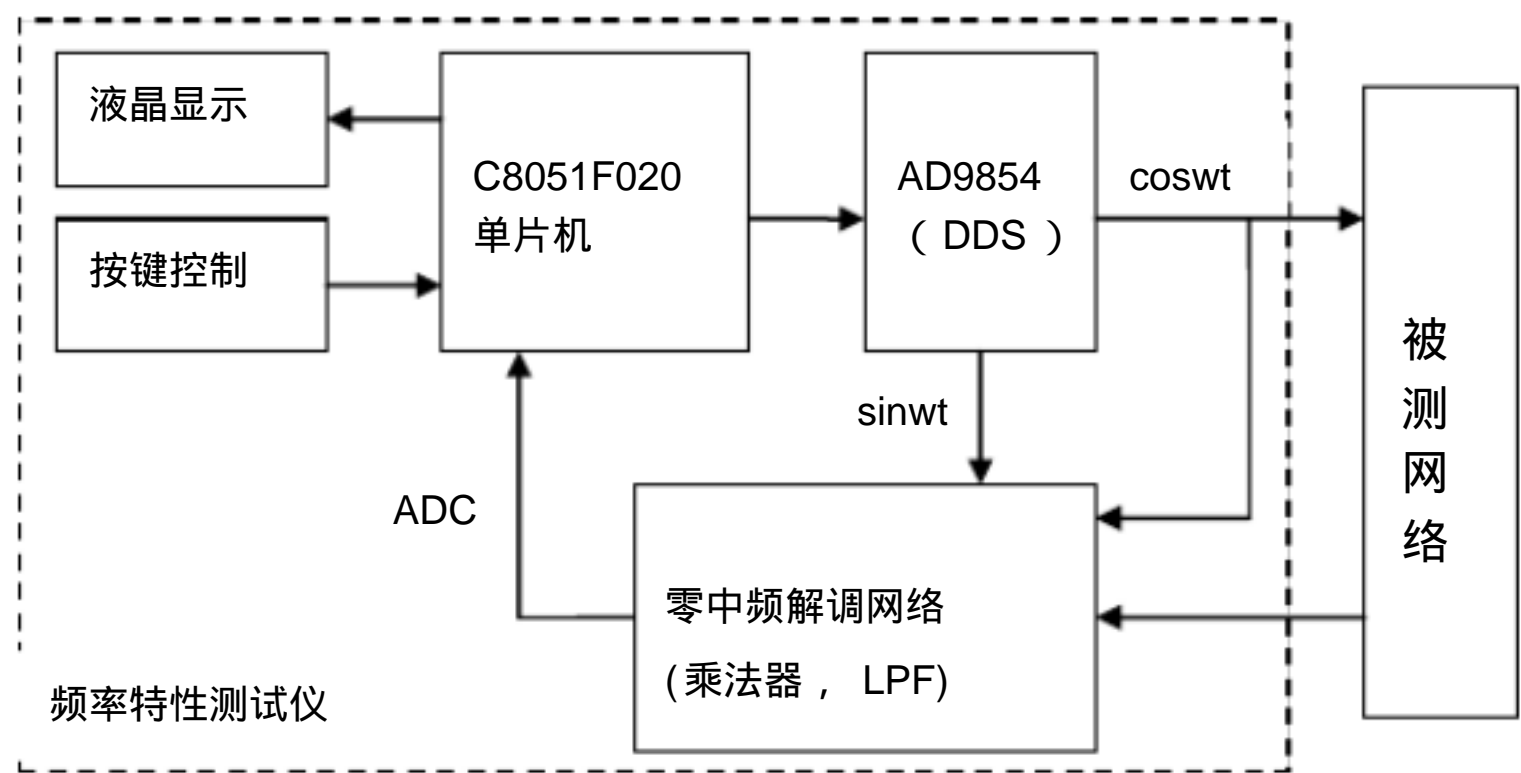


图 1 系统总体框图

2 理论分析与计算

2.1 系统原理

设正交信号源产生的信号 $A\cos(\omega t)$ 经被测网络后的输出为 $B\cos(\omega t + \phi)$ 。

则同相分量支路：

$$I = A\cos(\omega t) \cdot B\cos(\omega t + \phi) = \frac{AB}{2} [\cos(2\omega t + \phi) + \cos\phi] \quad (1)$$

低通滤波后（假设滤波器对幅度的影响为 C ）：

$$I = \frac{ABC}{2} \cos\phi \quad (2)$$

类似的，得到正交分量支路：

$$Q = A\sin(\omega t) \cdot B\cos(\omega t + \phi) = \frac{AB}{2} [\sin(2\omega t + \phi) - \sin\phi] \quad (3)$$

低通滤波后（假设滤波器对幅度的影响为 C ）：

$$Q = -\frac{ABC}{2} \sin\phi \quad (4)$$

由（2）式和（4）式，可得相位：

$$\phi = \arctan\left(\frac{Q}{I}\right) \quad (5)$$

幅度：

$$B = \frac{\sqrt{2(Q^2 + I^2)}}{AC} \quad (6)$$

2.2 滤波器设计

经乘法器输出的信号如式（1）（3）所示，需设计低通滤波器，滤除高频分量，留下直流分量。据式（1）（3）分析，滤波器截止频率低于 1MHz 即可，但考虑到电路会不可避免地产生其他频率干扰，因此低通滤波器的截止频率越小，滤波效果越好，测量精度越高。

2.3 ADC 设计

C8051F020单片机自带两路 ADC，其中 ADC0 为 12 位，最高速度 100ksps；ADC1 为 8 位，最高速度 500ksps。出于精度考虑，两路 AD 均选用 12 位的 ADC0（即中间进行分时转换实现）。题目要求频率范围为 1MHz-40MHz，最小步进 100KHz，可连续扫频输出，且一次扫频时间小于等于 2s，因此 2s 内需要 ADC 采样 390 个点，即完成单次 ADC 采样的时间不能超过 5ms，而利用 ADC0 采样一次仅需 10us，中间切换通道大概需要 22us，能够满足题目要求。

2.4 被测网络设计

被测网络采用 RLC 串联谐振电路。

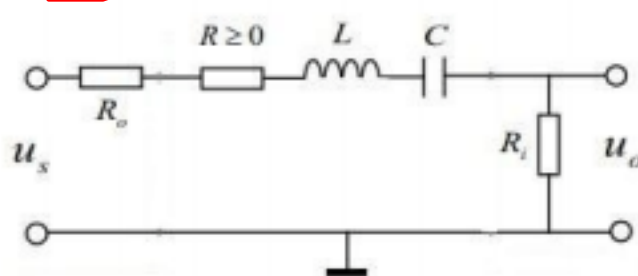


图 2 RLC 串联谐振电路

中心频率：

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (7)$$

有载品质因数：

$$Q_r = \frac{\omega_0 L}{r} = \frac{1}{\omega_0 C r} \quad (8)$$

其中 ω_0 为中心角频率， r 为环路总电阻。

回路带宽：

$$B_{0.7} = \frac{f_0}{Q_r} \quad (9)$$

题目要求被测网络中心频率 20MHz，有载品质因数 4。取电容 $C=18\text{pF}$ ，为满足中心频率为 20MHz，将 f_0 和 C 代入 (7) 式，计算得 $L=3.52\mu\text{H}$ 。

将 $Q_r=4$ ， $C=18\text{pF}$ 代入式 (8)，计算得 $r=R_o+R_i+R=110$ ，故 $R=10$ 。

2.5 特性曲线显示

液晶显示包括幅频特性和相频特性曲线。

用矢量网络分析仪测试 RLC 被测网络的幅频特性和相频特性，得到相应的图像和数据；测试零中频解调网络的 ADC_I 和 ADC_Q 采样值，导入 matlab 进行处理，得到经频率特性测试仪硬件电路输出而计算得到的幅频与相频特性曲线。最终根据实测和计算得到的特性曲线进行程序校准，得到与真实值接近的曲线，在液晶屏上显示。

3 电路与程序设计

3.1 电路设计

3.1.1 DDS 信号源

采用 AD9854 数字合成器，与电平转换电路和差分放大电路构成的自制 DDS 电路板与 C8051F020 作为控制单元共同实现正交扫频信号源。自制 DDS 电路板框图如图 3 所示。

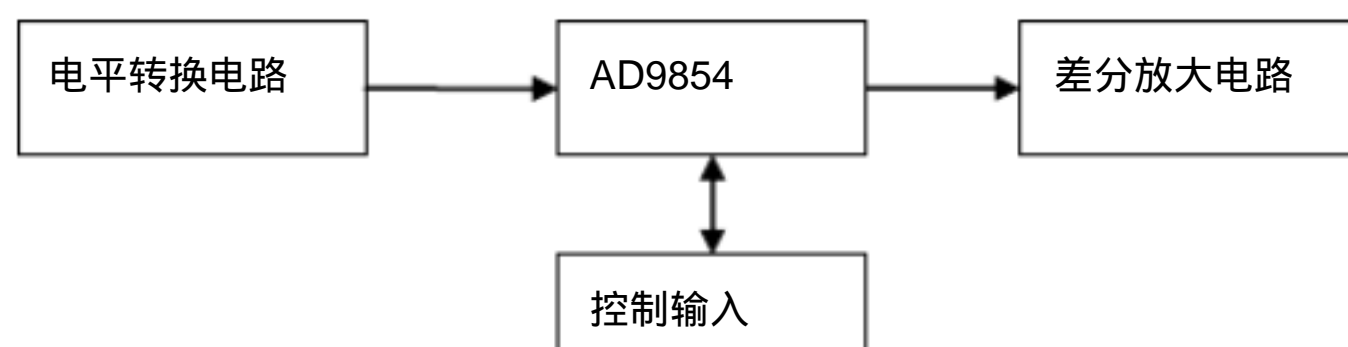


图 3 自制 DDS 电路板框图

3.1.2 RLC 被测网络

被测网络采用 RLC 串联谐振回路，根据前述对被测网络的理论分析，确定的 R 、 L 、 C 分别为： $R=10$ ， $L=3.52\mu\text{H}$ ， $C=18\text{pF}$ 。经实验调试，最终电路参数为： $R=6$ ， $L=3.36\mu\text{H}$ ， $C=18\text{pF}$ （其中 L 为自绕电感），如图 4 所示。被测网络幅频特性和相频特性的理论仿真如图 5 所示。

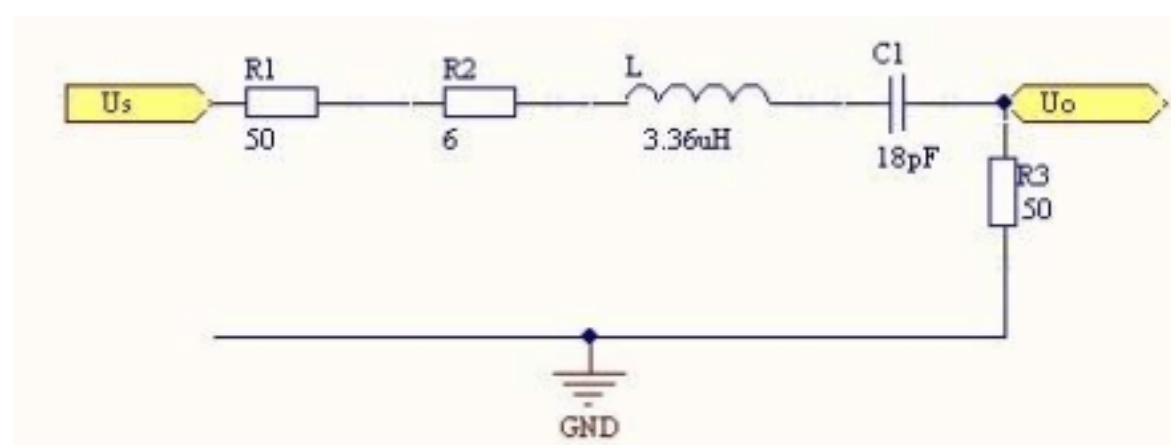


图 4 被测网络

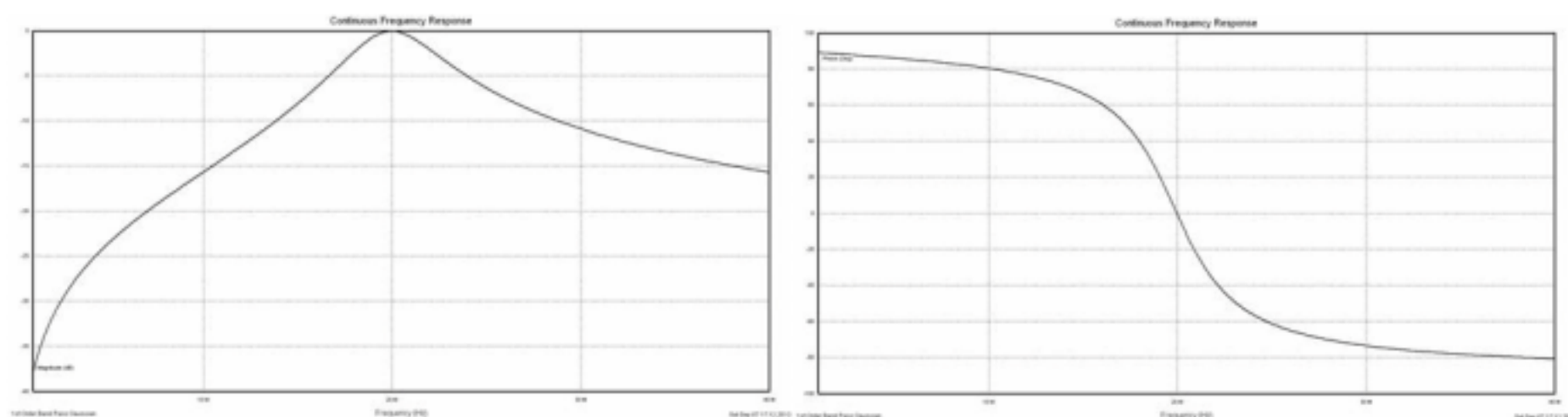


图 5 被测网络幅频、相频特性曲线图

3.1.3 乘法器

采用乘法器专用芯片 AD835。它是一个电压输出四象限乘法器，能完成 $W=XY+Z$ 的功能；其带宽高达 250MHz，满足题目 1MHz-40MHz 信号输入的要求；且其输出噪声典型值小，保证了输出信号尽可能小的失真。此外 AD835 所需外围电路少，配置方便。

信号经乘法器和低通滤波后输出的直流信号范围在 $-1V \sim +1V$ ，为保证送入单片机的直流信号为正，必须在进行 AD 转换前加 1V 以上的直流偏置，本设计选择在乘法器模块加 125mV 的直流偏置（即 $Z=125mV$ ），经后级 10 倍的同相比例放大可满足上述要求。其中 125mV 的直流偏置，采用 TL431 稳压输出 2.5V 后经过电阻分压得到，同相比例放大选用 OPA227 实现，具体乘法器电路如图 6 所示。

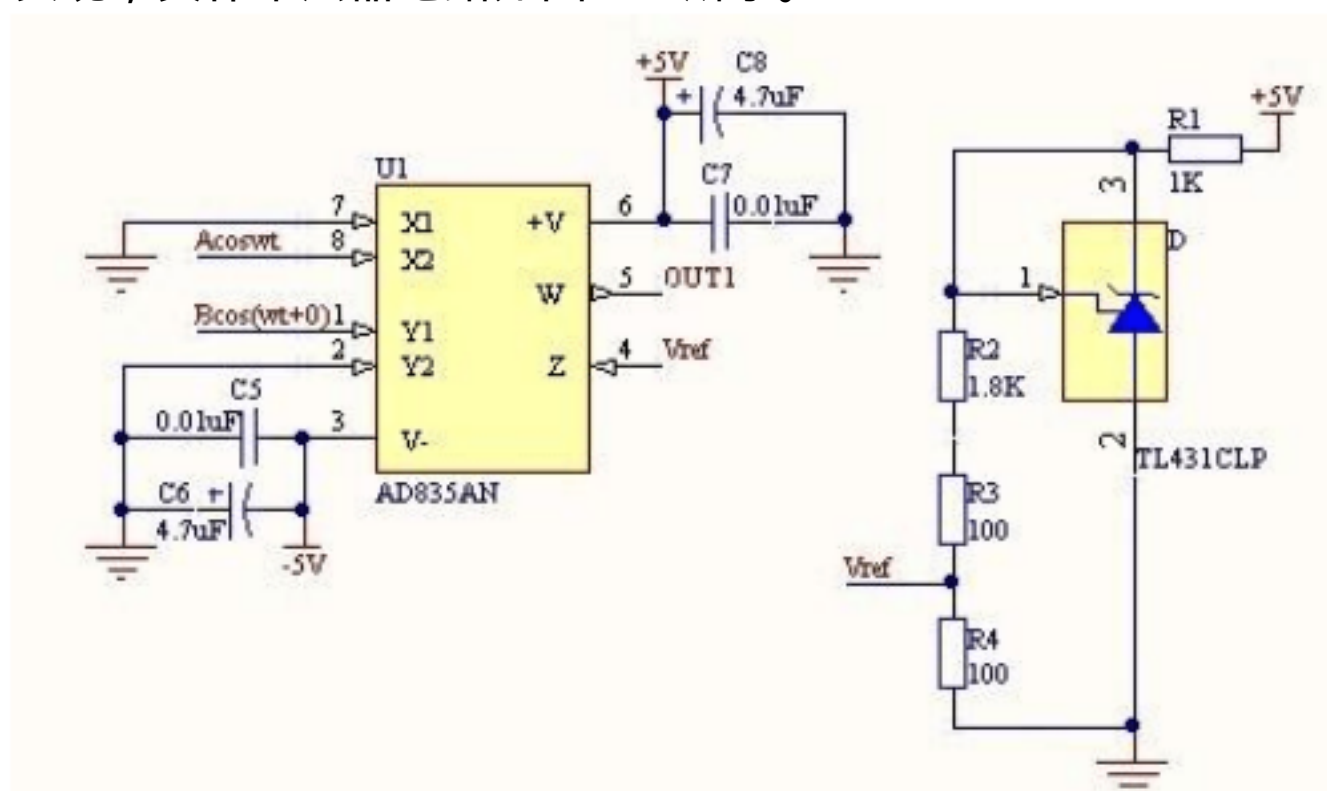


图 6 乘法器电路

3.1.4 低通滤波器

设计采用 2 阶无源低通滤波器，其截至频率为：

$$f = \frac{1}{2\pi RC} = 338.8\text{Hz} \quad (10)$$

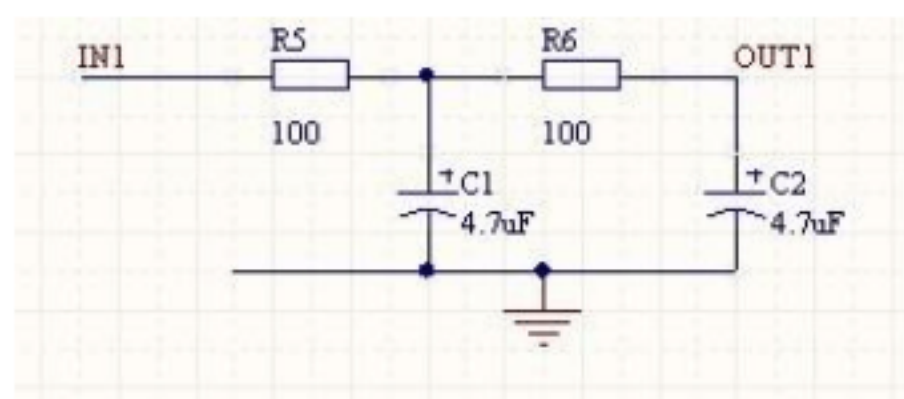


图 7 低通滤波器

3.2 程序设计

该设计软件部分采用 C 语言编写。为使 AD9854 输出的正交信号的频率稳定度高、幅度平坦度好，选用单片机内部 25MHz 晶振用作时钟。总程序由调度模块，键盘服务程序，ADC 模块及显示服务子程序构成。其中自动校准时将被测网络短接，经过一次扫频将系统误差存储在单片机中，然后接入被测网络，对应的每一个频率点的误差将被纠正得到误差较小的值计算得到幅频和相频。主程序流程图如图 8 所示，ADC 采样流程图如图 9 所示，按键处理流程图如图 10 所示。

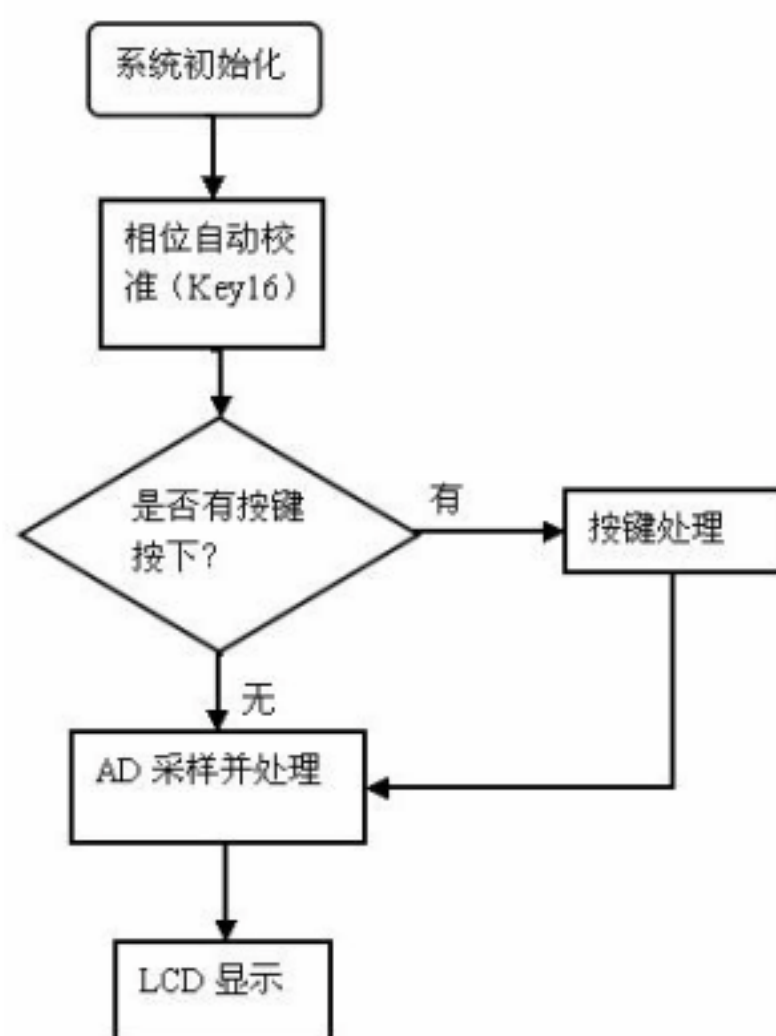


图 8 主程序流程图

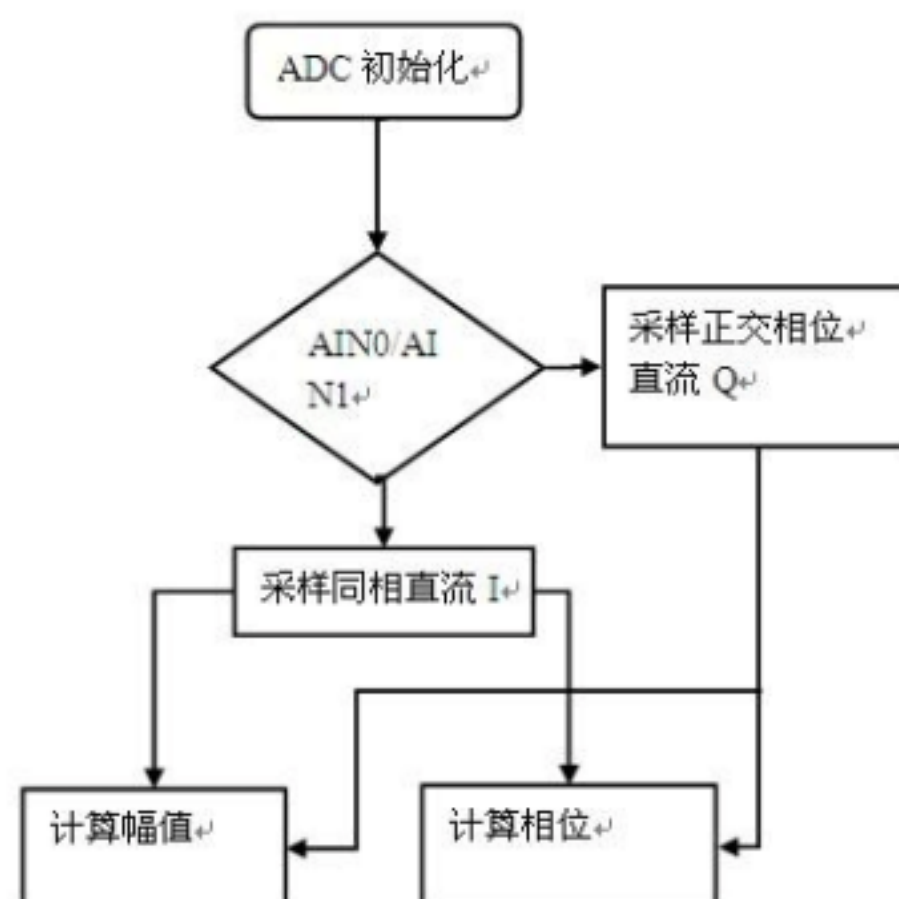


图 9 ADC 采样流程图

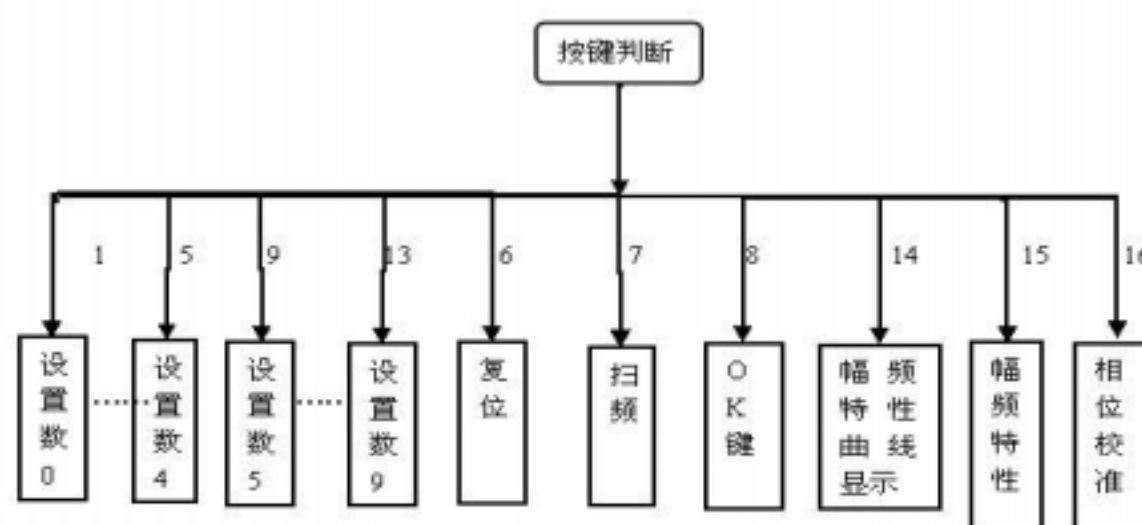


图 10 按键处理流程图

4 测试方案与测试结果

4.1 测试仪器及测试方案

4.1.1 测试仪器

表 1 测试仪器

仪器	型号
混合信号数字示波器	Tekeronix MSO 2012
程控直流电源	MYWAVE MPD-3303
台式万用表	UNI-T UT802
多功能计数器	绿扬 YB3371
矢量网络分析仪	Agilent Technologies E8362B

4.1.2 测试方案

- (1) 采用混合信号数字示波器和多功能计数器，测量正交扫频信号源的性能。
- (2) 将被测网络接入制作完成的简易频率特性测试仪进行测试。将测得的幅频特性曲线和相频特性曲线与理论值进行对比，检验此仪器的性能。

4.2 测试数据

(1) 基础部分

表 2 I 通道、 Q 通道输出频率、幅度及误差测试表

按键输入频率 /MHz	I 通道输出频率 (频率计测量) /MHz	Q 通道输出频率 (频率计测量) /MHz	I 通道输出幅度 /Vpp	Q 通道输出幅度 /Vpp	幅度平衡误差
1	1.0000003	1.0000003	1.70	1.70	0.000%
5	4.9999989	4.9999989	1.68	1.70	1.190%
10	10.000010	10.0000101	1.72	1.72	0.000%
15	15.0000020	15.0000020	1.72	1.74	1.163%
20	19.9999889	19.9999889	1.70	1.74	2.353%
25	25.0000030	25.0000030	1.70	1.76	3.529%
30	30.0000050	30.0000050	1.72	1.76	2.326%
35	35.0000100	35.0000100	1.70	1.70	1.176%
40	40.0000001	40.0000001	1.72	1.72	1.176%

(2) 发挥部分

表 3 频率特性测试仪、 RLC 被测网络参数

输入电阻	50
输出电阻	50
是否可以 进行点频测量	是
RLC 被测网络中心频率	20.35MHz 误差 1.750%
RLC 被测网络 3dB 带宽	5.05MHz
RLC 被测网络有载品质因数	4.03 误差 0.700%
RLC 被测网络有载最大增益	-0.7443dB (>-1dB)

表 4 RLC 串联谐振电路特性曲线

按键输入 频率	幅度测量 /dB	相位测量 /度
1MHz	-43.2	-76.0
5MHz	-24.7	87.6
10MHz	-16.3	82.3
15MHz	-9.3	69.3
20MHz	-0.9	7.2
25MHz	-6.8	-57.2
30MHz	-11.9	-75.2
35MHz	-14.9	-80.6
40MHz	-16.0	-83.6

利用制作的简易频谱特性测试仪测得待测网络的幅频特性曲线和相频特性曲线如图 11、12 所示。

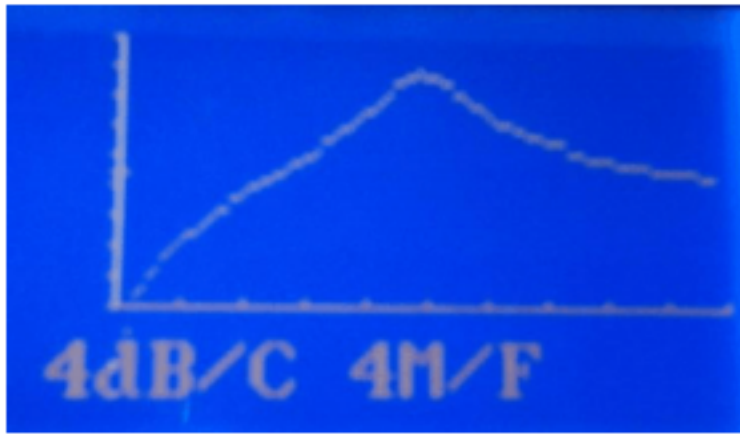


图 11 幅频特性曲线液晶显示

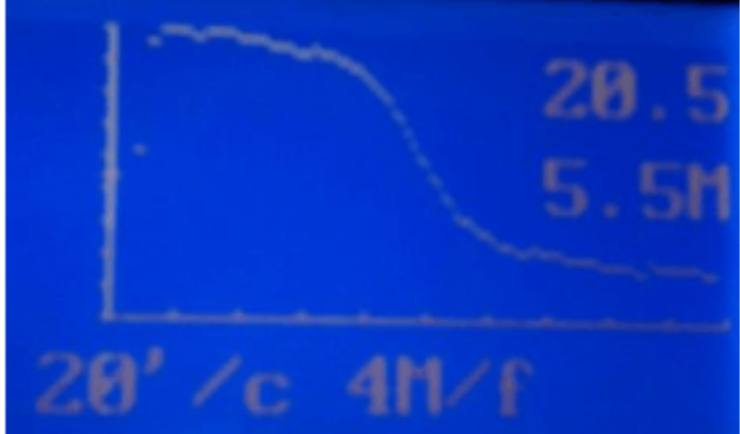


图 12 相频特性液晶显示

(3) 其他部分

本设计的一大创新之处是，在测量之初，采用短接被测网络即内测校准的方法减小了系统误差。

4.3 测试结果分析

对上述测量数据进行分析计算可知，信号源的频率稳定度均小于 10^{-4} ；I 路信号幅度平坦度为 2.381%，Q 路信号幅度平坦度为 3.529%；正交信号幅度平衡误差最大为 3.529%；RLC 被测网络中心频率误差为 1.750%；有载品质因数误差为 0.700%，各项指标均在误差允许范围之内，很好的完成了简易频率特性测试仪的设计任务。

5 结束语

本设计采用零中频正交解调的方法制作实现了简易频率特性测试仪，采用 AD9854 DDS 集成芯片、C8051F020 作为控制平台实现正交扫频信号源，RLC 串联谐振电路用作被测网络，AD835 乘法器、二阶无源低通滤波器、同相比例放大电路构成零中频解调模块，与正交扫频信号源共同构成简易频率特性测试仪，最终对被测网络进行测试，液晶显示其幅频特性和相频特性。经最后测试，本系统能很好地完成被测网络的频率特性测试。在系统设计的过程中，我们遇到了一些问题，通过小组成员间的交流最终得以解决。同时我们深刻地体会到共同协作和团队精神的重要性，并且也提高了自己发现问题、解决问题的能力。